

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.043>
UDC 004.94:574.9

T. P. FEDONIUK¹, Full Doctor in Agricultural Sciences (Ecology), Professor,
Head of the Educational and Scientific Center for Ecology and Environmental Protection
<https://orcid.org/0000-0002-6504-0893>
E-mail: tanyavasiluk2015@gmail.com

O. V. SKYDAN¹, Full Doctor in Economic Sciences, Professor, Rector
<https://orcid.org/0000-0003-4673-9620>
E-mail: skydanolegv@ukr.net

T. V. MELNYCHUK², Deputy Director for Research and International Cooperation
<https://orcid.org/0000-0003-0828-4362>

A. A. ZYMAROIEVA¹, Ph. D. in Biology, Associate Professor, Head of Department for Ecology
<https://orcid.org/0000-0002-6504-0893>

V. M. PAZYCH¹, Ph. D. in Agriculture, Associate Professor, Deputy Head of the Educational
and Scientific Center for Ecology and Environmental Protection
<https://orcid.org/0000-0002-1597-2334>

¹ Polissia National University

7 Staryi Blvd., Zhytomyr, 10008 Ukraine

² Chornobyl Radiation and Ecological Biosphere Reserve

28 Tolochyna Str., village Ivankiv, Kyiv Region, 07201 Ukraine

25 Preobrazhenska Str., Kyiv, 03110 Ukraine

GIS-BASED LANDSCAPE MANAGEMENT OF THE UZH RIVER BASIN: A STRATEGY TO ENHANCE RIVER WATER QUALITY

The article includes the findings of a study on the Uzh River basin's surface water's quality. This region is extremely important because a fraction of it is radioactively contaminated because of the Chornobyl nuclear power plant accident. Considering this, the goal of this work was to conduct a geo-informational analysis of the state and structure of the landscapes of the Uzh River basin, to identify the surface water quality parameters of this region, and to identify potential correlations between these parameters. For this purpose, we spatially divided the territory of the basin into separate massifs, in each of which, using the method of automatic decoding, we determined the ratio of the structural components of landscapes, their disturbance by erosion processes, and compared them with ground data on the quality of surface water of the massifs. According to the salt composition, all the investigated massifs have good quality conditions. The Uzh River and its tributaries should be categorized as 4 (slightly polluted) based on the average values of the tropho-saprobological state, but the extreme values in some places shifted to 5 (moderately polluted). Most of the listed toxic substances were present at average levels and, for the most part, did not exceed the permitted concentrations for category 4-slightly polluted. Extreme concentrations frequently reached category 6 (polluted), which was primarily brought on by anthropogenic activity and the buildup of radioactive materials. It was found that the degree of erosive landscape destruction and the degree of landscape stabilization signifi-

Цитування: Fedoniuk T. P., Skydan O. V., Melnychuk T. V., Zymaroieva A. A., Pazych V. M. GIS-Based Landscape Management of the Uzh River Basin: A Strategy to Enhance River Water Quality. *Space Science and Technology*. 2023. **29**, № 4 (143). P. 43–66. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.043>

© Publisher PH «Akademperiodyka» of the NAS of Ukraine, 2022. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

cantly influence the value of the integrated water quality index. Since the collected data, a three-dimensional model was developed, allowing for accurate evaluations and projections of changes in the quality of surface water based on the structural characteristics of the land shafts. Considering that some of these territories are currently in the zone of radioactive contamination, the planning of changes in the landscape structure should be coordinated with the potential risks of surface water quality deterioration, and the model proposed in this article will have significant applied value in addressing this issue.

Keywords: landscape stabilization, water quality, spatial analysis, radioactive contamination, trophosaprobological state, erosion, surface water.

INTRODUCTION

Approximately 85 % of the world's wetlands have been drained over the last three centuries to make way for housing, industry, and agriculture [1]. Those that remain are vanishing three times faster than the rest of the world's forests. At the same time, significant parts of Polissia have remained virtually unchanged. It is one of Europe's last truly wild places. Few places on the continent offer as much space for the continent's unique aboriginal flora to survive and thrive [14, 17].

The rewilding of this area is generally linked to the Chernobyl disaster, and the issue of radioactive contamination of many landscapes will be relevant for a long time [10, 18, 22]. This is due to the presence of territories contaminated with long-lived radionuclides formed as a result of the Chernobyl nuclear power plant accident in 1986. These are extremely wet areas that cover thousands of wetland ecosystems.

With the designation of these territories as protected territories, restrictions on residence and economic activity were imposed. When the anthropogenic factor is reduced, natural complexes at various levels spontaneously restore [7, 18, 35]. According to preliminary research, the following key factors affecting the biodiversity of this wetland ecosystem are radioactive pollution (and specific reactions of plant groups to it), the protection regime, and economic activity in adjacent territories, which determines their differences from the development of other wetland land ecosystems in Ukraine [13, 20, 35, 45]. However, anthropogenic risks to the aquatic ecosystems that developed in these areas still exist. Deforestation, mining, agriculture, and proposals to construct a significant river through the area, according to experts, could result in irreparable environmental harm [15, 38, 36]. One of the most significant inland wetland ecosystems in Europe is now protected on an international scale, according to scientists, helping

to secure its future [20, 50, 51]. Additionally, it will safeguard the vital hydrological and carbon-storage functions of transboundary landscape ecosystems, as well as their immense potential as ecotourism destinations [8, 40, 52].

The flow of the biggest Pripyat River and its tributaries was artificially altered in the Chernobyl nuclear power plant area, however many areas of this land are now a boundless wild nature that is entirely free of any influence from human activity and being restored by wholly natural mechanisms. Uzh plays a particularly important function in the removal (migration) of radionuclides outside the exclusion zone as a result of the catchment areas' significant radionuclide contamination [18, 31, 44]. Here, an unusual species composition of aquatic plants develops, the distribution of which and its ecological characteristics are investigated in this study.

The restoration of wetland ecosystems to their entirely natural state started with the granting of protected status to areas that were radionuclide-contaminated as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant (Drevlyansky Nature Reserve was established on December 31, 2009, and Chernobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve on April 26, 2016). They started to restore the distinctive flora when they finally came back here after decades away. The savage nature of today is in control. Studying this area will be crucial since it is the only reminder of how nature was able to recover after a significant man-made disaster.

In light of this, a study of the landscape structure of one of the Pripyat River's largest tributaries, the Uzh River, will allow us to classify key areas that are currently protected as well as areas that are not recognized as protected landscapes, such as primeval forests, other forests of high environmental protection values, and places of growth of rare macrophyte species.

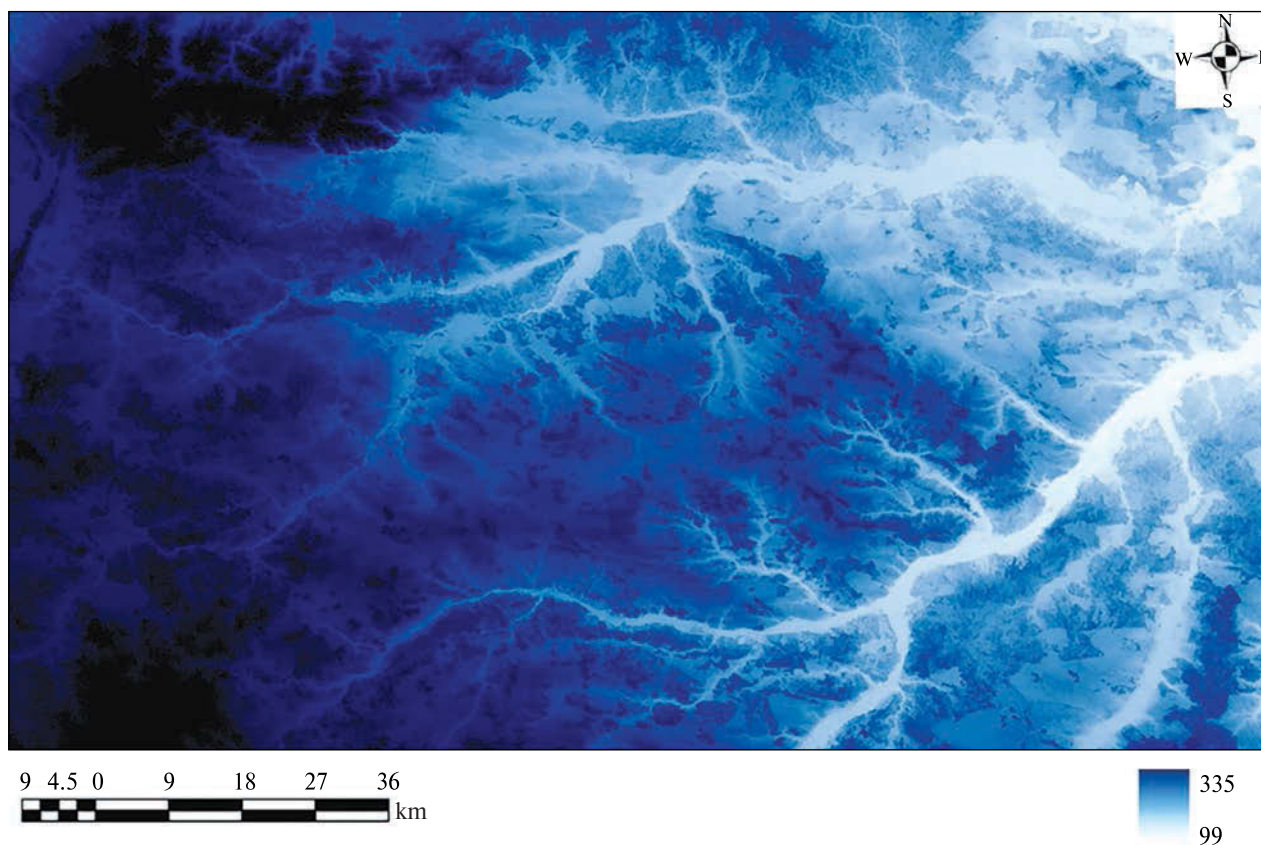


Figure 1. The elevation map of the territory of the Uzh River basin

GIS for determining optimal hydrotechnical solutions, optimal landscape structure for the purpose of stabilizing erosion processes, and modeling and monitoring soil erosion by water using remote sensing satellite data were used in many studies and showed high informativeness [4, 6, 7, 23, 25, 28, 43]. Considering this, the goal of this work was to conduct a geo-informational analysis of the state and structure of the landscapes of the Uzh River basin, to identify the surface water quality parameters of this region, and to identify potential correlations between these parameters.

STUDY MATERIALS AND METHODS

Uzh Basin system. To conduct our investigation, we selected the Uzh River and its tributaries basin (Fig. 1). The project was mapped using the software ArcGis Pro 2.5.0, and a digital terrain model was created using the Geoprocessing: 3D Analyst toolbox.

Utilizing the hydrological modeling method of the “hydrology” working module of the spatial analyst program, watercourse tracing and delineation of watercourses and their orders were performed (basin, catchment area, flow direction, etc.). Using the same software, Strahler’s approach (1952) [47] was used to estimate the order of watercourses based on an elevation map of the territory (Fig.1).

The entire territory of the basin was divided into massifs. Each of the massifs that made up the basin’s total region represented the first- and second-order tributary’s catchment area (Fig. 2). The degree of impact of both natural and human variables (such as locations where wastewater is deposited and where a lot of surface runoff enters, the structure of the landscape, etc.) was assessed within each massif. Stationary observation sites, permanent test areas, profiles, transects, and routes were laid within the boundaries of the scientific training grounds on the territories of

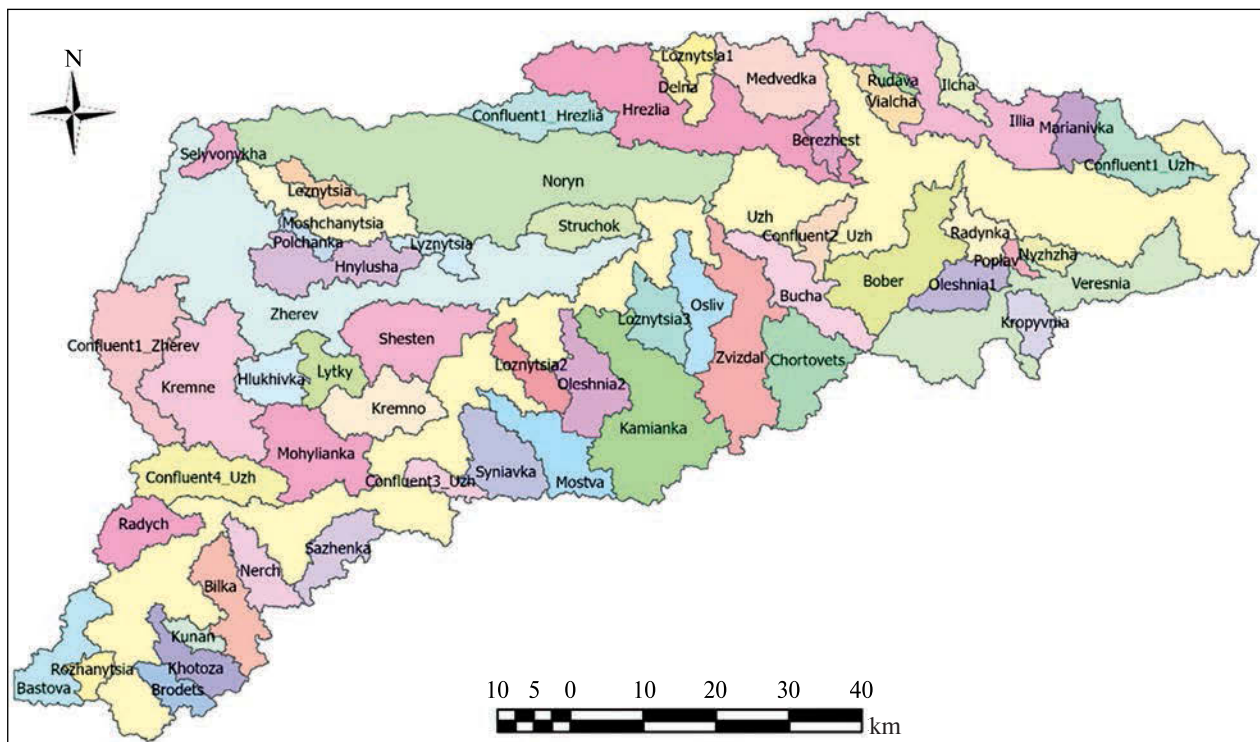


Figure 2. Massifs within the basin of the Uzh River

the massifs. They provide the study of the natural development of ecosystems and changes due to anthropogenic influence.

The coding of massifs is presented in Table 1.

Surface water quality surveys were conducted for each massif during 2017–2022. The research data were interpreted into coefficients based on salt composition, trophosaprobological condition, toxic and radioactive substance content and were interpreted into integrated surface water indexes (by the recommendations of the EU Water Framework Directive).

Thus, the water quality at the observation points was assessed in accordance with the “Methodology of ecological assessment of surface water quality by relevant categories” [37], according to which analyses for determining water quality indicators were divided into three main blocks:

Water quality evaluation block based on salt composition criteria. This category includes water quality indicators such as mineralization and electrical conductivity, as well as sulfate and chloride content. An

individual quality index was calculated for each indicator, and the average block index of I_s was calculated using all of the indicated indicators.

Water quality assessment block based on chemical saprobological criteria. This category includes water quality indicators based on the oxygen regime, suspended substances, transparency, pH, ammonium nitrogen, nitrates and nitrites, phosphorus, phosphates, permanganate oxidizability, and BOD. An individual quality index was calculated for each indicator, and the average block index of I_{ts} was calculated using all of the indicated indicators.

Water quality evaluation block based on the criteria of the content of specific substances of toxic and radiation effect. This group includes indicators of water quality based on the content of total iron, manganese, petroleum products, phenols, cadmium, copper, zinc, total chromium, and nickel in bottom sediments. For each indicator, an individual quality index was determined, and the average block index I_r was calculated, taking into account all the indicated indicators.

Table 1. Coding and measuring the Uzh River basin's massifs

Object ID	Name	Area, km ²	Object ID	Name	Area, km ²
1	Loznytsia1	27	30	Kropyvnia	43
2	Rudava	12	31	Osliv	84
3	Medvedka	130	32	Shesten	155
4	Delna	42	33	Hlukhivka	61
5	Ilcha	40	34	Veresnia	292
6	Confluent1_Hrezlia	93	35	Lytky	59
7	Vialcha	42	36	Loznytsia2	51
8	Selyvonykha	32	37	Kremno	106
9	Illia	246	38	Chortovets	127
10	Berezhest	32	39	Confluent1_Zherev	167
11	Marianivka	56	40	Oleshnia2	99
12	Hrezlia	315	41	Kremne	223
13	Leznytsia	36	42	Zvizdal	204
14	Confluent1_Uzh	95	43	Mohylianka	145
15	Moshchanytsia	118	44	Syniavka	101
16	Noryn	686	45	Mostva	105
17	Struchok	72	46	Confluent3_Uzh	32
18	Polchanka	20	47	Confluent4_Uzh	127
19	Lyznytsia	38	48	Kamianka	286
20	Radynka	51	49	Radych	82
21	Confluent2_Uzh	43	50	Sazhenka	71
22	Nyzhza	26	51	Nerch	65
23	Hnylusha	126	52	Kunan	23
24	Poplav	12	53	Bilka	96
25	Oleshnia1	65	54	Khotoza	65
26	Bober	184	55	Rozhanytsia	28
27	Zherev	642	56	Bastova	95
28	Bucha	108	57	Brodets	41
29	Loznytsia3	70	58	Uzh	1660

Table 2. Ranking of block and integrated water quality indices by relevant categories

Index value	Subcategory notation	Subcategory name
1.0...1.2	1	First
1.3...1.4	1(2)	First with a transition to the second
1.5...1.6	1-2	Between the first and the second one
1.7...1.8	2(1)	Second with a transition to the first
1.9...2.2	2	Second
...
6.5...6.6	6-7	Between the sixth and the seventh one
6.7...6.8	7(6)	Seventh with a transition to the sixth one
6.9...7.0	7	Seventh

The general ecological index of water quality I_e was calculated using the obtained data as the average of three block indices.

Certain classes and categories were assigned based on environmental conditions using the same methodology: I class has one category — excellent; II class has two categories — very good (2) and good (3); Class III is satisfactory, with two categories: satisfactory (4) and mediocre (5); IV is bad, with one category (6); and V is very bad, with one category (7) (Table 2).

The Uzh River Basin is a landfill that is still negatively impacted by industrialization and urbanization. The effects of human activity on the environment were most pronounced here because of the disaster at the Chernobyl nuclear power facility. The disaster at the Chernobyl nuclear power plant resulted in a number of issues, including those with clean water, soils, bottom sediments, etc. The most delicate aspect of the natural environment, however, turned out to be the land's surface waters. Because of this, their condition needed to be carefully monitored.

To assess the condition of the landscapes of the Uzh River Basin, we used a number of coefficients that will be able to maximally reflect the level of stability and anthropogenic transformation.

The erosion fragmentation index of the territory was calculated with Equation (1):

$$K_{ef} = R/P_{al} \quad (1)$$

where R — total length of ravines, km; P_{al} — total area of the agricultural landscape, km².

The coefficient of erosion fragmentation of the territory is estimated according to the following values:

less than 0.2 — weak dismemberment, satisfactory environmental condition;

0.2...0.7 — average dismemberment, stressed ecological condition;

0.71...2.5 — severe dismemberment, extreme environmental condition;

more than 2.5 — strong dismemberment, ecological disaster.

To estimate the ecological landscape state within the study sites, the methods of E. Klementova and V. Heinihe were used, by which the coefficient of ecological landscape's stabilization ($KESL_1$) and the coefficient of ecological stabilization of biotechnical elements as well as of the entire landscape ($KESL_2$) were determined [27]. Determining the $KESL_1$ consisted in mapping the areas occupied by stabilizing and destabilizing elements of the landscape using Equation (2):

$$KESL_1 = \frac{\sum_{i=1}^n F_{sti}}{\sum_{j=1}^n F_{nstj}}, \quad (2)$$

where F_{sti} — areas under crops and plant communities that have a positive effect on the landscape (forests, green plantations, natural meadows, reserves, arable lands used for growing perennial grasses, all given in ha), F_{nstj} — areas occupied by unstable elements of the landscape (annual cultivated arable land, unstable grasslands, built-up areas and road network, overgrown and muddy reservoirs, and other lands that exert anthropogenic impact, all given in ha). $KESL_1$ was assessed on a scale as in Table 3.

The coefficient of ecological stabilization of biotechnical elements and the entire landscape ($KESL_2$) was calculated with Equation (3):

$$KESL_2 = \sum_{i=1}^n \frac{f \cdot K_e \cdot F_{gm}}{F_t}, \quad (3)$$

Table 3. The landscape resilience scale according to the values of $KESL_1$ and $KESL_2$

Landscape characteristics	$KESL_1$		$KESL_2$	
	value	point	value	point
Unstable, with a vivid instability	≤ 0.5	1		
Unstable	0.51–1.0	2	≤ 0.33	1
Conditionally stable	1.01–3.0	3	0.34–0.5	2
Stable	3.01–4.50	4	0.51–0.66	3–4
Stable, with a vivid stability	4.5–5	5	≥ 0.66	5

where f — the area of the biotechnical element, K — coefficient characterizing the ecological value of separate biotechnical elements, K_{gm} — coefficient of geological-morphological stability of the terrain, F_t — the area of the whole territory. $KESL_2$ was evaluated on a scale as in Table 3.

According to Shishchenko's methodology [41], the coefficient of anthropogenic landscape transformation (K_{alt}) was estimated using the following formula (4):

$$K_{alt} = \sum_{i=1}^n \frac{R_i \cdot P_i \cdot Q \cdot n}{100}, \quad (4)$$

where R_i — ranking of human-induced changes by type of use (1 — protected areas, 2 — forests, 3 — marshes and wetlands, 4 — meadows and pastures, 5 — vineyards and gardens, 6 — arable lands, 7 — rural areas, 8 — built-up areas, 9 — canals and reservoirs, 10 — industrial areas); P_i — the ranks for protected areas, % (forests — 1.05, swamps, floodplains, and wetlands — 1.1, perennial grasses — 1.15, vineyards and gardens — 1.2, arable lands — 1.25, rural areas — 1.35, built-up areas — 1.35, canals and reservoirs — 1.4, industrial areas — 1.5, Q — transformation depth index), n — complete study area divisions.

The scale of assessment of anthropogenic transformation of landscapes looks like this: 2.0...3.8 are slightly transformed, 3.81...5.30 are transformed, 5.31...6.50 are mediumly transformed, 6.51...7.40 are strongly transformed, 7.41...8.0 are very strongly transformed.

The primary data analysis and their statistical processing were made with Microsoft Excel 2010 and Statistica 12.0 software.

RESULTS AND DISCUSSION

Features of the hydrographic network of the Uzh River. The Uzh River originates 0.3 km above the bridge in the Sorochen village, Yemilchyna District, the Zhytomyr Region. It is at an altitude of 223 m above sea level. The river runs from the southwest to the northeast and flows into the Kyiv Reservoir south of Chornobyl, Kyiv Region. The length of the river is 256 km, the catchment area is 8080 km², the total drop is 120.8 m, and the average slope is 0.5 % [46].

The river basin is located in the Dnieper lowland: its upper part is within the boundaries of the Volyn

Polyssia with absolute surface marks up to 239 m, and the lower part is within the boundaries of the Kyiv Polyssia [5]. The surface of the basin is a flat complex with maned and hilly-maned plains, weakly crossed by a beam network [42].

A large part of the area of the basin is plowed and used for sowing agricultural crops. Mixed forests with a predominance of pine and oak occupy 19 % of the basin area. Wetland — about 8 %. The river valley is mainly trapezoidal; it is clearly defined only near the upper reaches (to the mouth of the Bilka River); in some places, it approaches V-shaped [48]. The slopes, 9...18 m high, are concave or straight, sometimes steep; in areas with a V-shaped valley, they are steep or close to steep; in some places they are gentle, imperceptibly merging with the surrounding area; mostly they are cut, covered with mixed forest, less often open, and plowed.

Almost along the entire length of the river, the floodplain is shrubby, dry, with a flat surface, in some places it is meadowy, less often swampy, and hilly. The riparian and especially the upslope parts of the floodplain are lowered, composed mostly of silty-sandy, rarely peaty soils. The channel is mostly moderately branched and moderately winding. The width of the river varies from 5 to 40 m, the largest — 70 m, the smallest — 1.5 m (highest. Belka) [46]. The depth on the flats is 0.8...2.0 m, in some places it reaches 3.5...4.0 m; the depth varies between 0.1...0.5 m on the slopes. The bottom is uneven, mostly muddy, sandy or silty-sandy, in places pebbly-sandy, stony, and peaty [39].

The shores are mainly steep or steep, composed of sandy, less often sandy, in some areas peaty soils, overgrown with sparse shrubs or forests, on steep bends of the river they are washed away.

Climatic zoning and issues of nature protection. The Uzh River Basin fits well into the general scheme of the ecological network of Pan-European and national significance. It flows through the territories of two nature reserves: the Chornobyl radiation-ecological biosphere reserve and the Drevlyansky nature reserve. The mentioned reserves play an important role as an ecological nucleus. The territory forms the Narodytsky sub-core of the Chornobyl core of the Polissky ecological corridor of international significance. The Uzh River basin belongs to M5.1.4 — A

sub-basin of the Pripyat River, and water management area M5.1.4.52, the Uzh River. The mouth of the Uzh River is part of the “Prypyati Mouth” site, which is planned for submission to the Ramsar Convention as a unique wetland. The land was created as a result of the flooding of the Pripyat floodplain and the construction of the Kyiv Reservoir and is situated in the northern region of Kyiv Polissia. Large stretches of shallow water are a defining feature of this region, in the midst of which a network of islands and peninsulas with pine trees (on the pine terrace) and floodplain forests have developed. A spring flood that covers the majority of the estuary’s islands for around two-thirds of their surface area during the hydrological regime is a defining feature. The territory has a somewhat continental climate with 530...570 mm of precipitation annually, an average annual temperature of 6 °C in January, and a maximum annual temperature of 19 °C in July. The territory of the basin is situated in the Polish subprovince of coniferous and broad-leaved forests of the Eastern European province of coniferous and broad-leaved forests, which is part of the Kyiv right-bank district of hornbeam-oak and oak-pine forests, floodplain meadows, and eutrophic swamps. This area is dominated by a complex of aquatic (*cl. Lemnetaea, Potamogetonetea*) and coastal (*cl. Phragmito-Magnocaricetea*) flora. *Phragmites australis* communities and many swamp forb species can be found in the shallows’ highest points. In flooded shallow waters, communities of *Typha angustifolia* L. and *T. latifolia* L., as well as *Glyceria maxima* (Hartm.) Holmb., *Bolboschoenus maritimus* (L.) Palla, *Carex acuta* L., and *C. Carex riparia* Curt. have grown. Groups of *Potamogeton pectinatus* L., *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton lucens* L., *Myriophyllum spicatum* L., and *Najas marina* L. predominate among the submerged aquatic vegetation, while rigid hornwort (*Ceratophyllum demersum* L.) rules the wetlands of the inter-island shallows. Here, floating-leaf plants, including *Nymphaea candida* Presl., *Nuphar lutea* L., and *Trapa natans* L., have become common coenoses. *Stratiotes aloides* L., *Hydrocharis morsus-ranae* L., *Lemna minor* L., *Lemna trisulca* L., and *Salvinia natans* L. groups are formed in numerous channels in areas with slow currents. Also, in the area, there are areas of marshy meadows, and shrubby marshes with *Salix cinerea* L. to a

lesser extent alder (where *Urtica dioica* L., *Impatiens parviflora* DC., *Impatiens glandulifera* Royle, *Humulus lupulus* L., *Thelypteris palustris* Schott are noted with some regularity), willow-poplar (dominated by *Salix alba* (L.), *Salix fragilis* L., *Populus nigra* L.) and pine forests of grasses and open sands. Such a variety of natural conditions determines its high phytodiversity (the flora of the land preliminarily includes about 600 species of vascular plants) [14, 17, 19, 36].

Aldrovanda vesiculosa L., *Trapa natans* L., *Utricularia minor* L., *Salvinia natans* (L.) All., *Orchis palustris* Jacq., *Dactylorhiza incarnata* (L.) Soo, *Dactylorhiza majalis* (Rchb.f.) Hunt & Summerh., and *Epipactis palustris* (L.) Crantz are examples of communities of uncommon plant species. The following coenoses are classified in the Green Book of Ukraine (2009) as being among the uncommon plant communities: *Aldrovanda vesiculosa* L., *Ceratophyllum submersum* L., *Nymphaea candida* C. Presl, *Nuphar lutea* (L.) Sm, *Potamogeton obtusifolius* Mert. et Koch, *Potamogeton perfoliatus* L., *Potamogeton lucens* L., *Potamogeton praelongi* Hild, *Potamogeton rutilus* Wolfg, *Salvinia natans* (L.) All., etc [24]. Around 5—7 thousand geese, 100—150 thousand ducks, and up to 1.5 million other birds travel through the region throughout the season [17, 23, 50]. On the basin’s territory, significant colonies of the *Ciconiiformes*, *Charadriiformes*, *Anseriformes*, and *Pelecaniformes* bird series were discovered. Rare biotopes (C1.222, C1.223, C1.225, C1.32, C1.3411, C1.4, C3.4, D5.2, E1.12, E3.4, F9.1, G1.11, X35) and rare plant communities are present in significant amounts [3].

In general, it should be mentioned that the rivers in the northern part of Ukraine receive their subsurface water from a variety of aquifers, which contributes to their favorable hydrochemical conditions and the heterogeneity of the chemical composition of the waters in the “headwaters-mouth” system. The Uzh River Basin is a landfill that is still negatively impacted by industrialization and urbanization. The effects of human activity on the environment were most pronounced here because of the disaster at the Chornobyl nuclear power facility. The disaster at the Chornobyl nuclear power plant resulted in a number of issues, including those with clean water, soils, bottom sediments, etc. The most delicate aspect of the natural environment, however, turned out to be the

land's surface waters. Because of this, their condition needed to be carefully monitored.

The Uzh River basin's water bodies get a natural-technogenic character today, and the analysis of the hydrochemical data at our disposal enables us to describe the peculiarities and distinguishing characteristics of the contemporary status of the river systems. As a result, the water composition had a fairly high average annual level of mineralization (520—680 mg/l) as of 2012—2018. Additionally, a relatively high proportion of chlorides (over 30 mg/l) in the structure of the main ions indicates the intensity of the surface water pollution process from household, commercial, and agricultural effluents. The annual amplitude of the color of natural waterways changes depending on the season, ranging from the value of the qualitative scale “no color” in the second half of autumn to light gray and gray during the water pollution period to light green during the summer border period. The intense growth of phytoplankton (mainly green and blue-green algae) during the growing season and the substantial amounts of terrigenous material that enter rivers after snowmelt all point to the presence of high concentrations of biogenic nutrients in the water (nitrogen compounds and phosphorus). Thus, there was a larger concentration of biogenic materials in channel waters, particularly ammonium nitrogen (1.5...2, and in some areas even more times) and

nitrites (1.5...2.5 times higher than the ecological optimum) (0.5...1.5 times higher than the ecological optimum). Unacceptably high BOD5 values (2...3 times above the ecological optimum) show that river waters are overly contaminated with organic matter from the allochthonous and autochthonous origin (die-off products of planktonic organisms) (surface runoff). It was observed that certain products of technogenesis, such as oil products and heavy metals (chromium, zinc, copper, and nickel), were present in surface waters in quantities below, at the limit, and over the threshold levels of MPC. The presence of oxidation processes predominates in river waters, which is a sign of their significant capacity for self-purification, as long as the oxygen regime is positive.

From an ecological point of view, rivers should be considered generalized water ecosystems in which flora, fauna, and their environment are combined by the exchange of matter and energy. Therefore, to assess the ecological state of water bodies and their monitoring, in addition to abiotic environmental factors (lighting, humidity, thermal regime, etc.), it is necessary to take into account the state of plants and the dynamics of their changes under the influence of hydrophysical, hydrological, and hydrochemical factors.

The hydrographic network is quite extensive (Fig. 3). The river valleys in most of them are well-

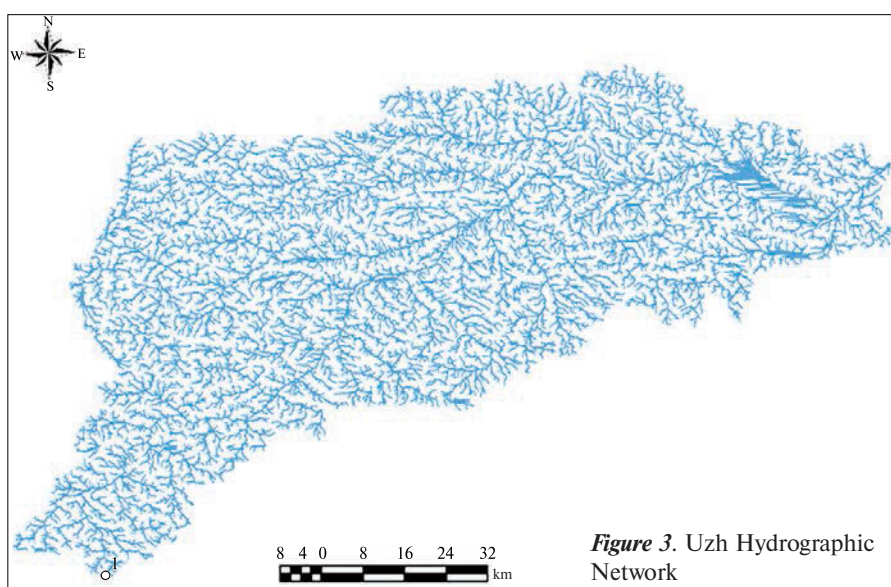


Figure 3. Uzh Hydrographic Network

defined, with clear signs of meandering. The territory of the pool includes several natural and artificial ponds. Floodplains are found almost everywhere along the river. Frequent flooding causes the floodplain to become waterlogged; the marshes are mostly eutrophic. The formation of the chemical composition of the waters of the Uzh River basin is influenced by loess deposits and soils rich in carbonates. This causes moderate mineralization and the bicarbonate-sodium type of river waters. The ratio of the main ions, the calcium group, places river water in the hydrocarbonate class, and its chemical makeup is designated as aII.

A significant drop in the piezometric level in the artesian horizon, which causes the flow of subpar waters with high concentrations of sulfates, chlorides, sodium, fluorine, ammonium, nitrites, hydrogen sulfide, and iron, poses a serious threat to the quality of surface water in the area.

Organoleptic indicators show that the surface waters are in good condition. The water smells like a river, with no additional musty smells or the presence of putrid processes. In all analyzed creations, it receives a rating of 2.

Assessment of water quality according to the criteria of salt composition. In the summer of 2019, the mineral composition of the Uzh River ranged from 211 to 237 mg/dm³. Somewhat overestimated indicators of the mineral composition are connected, first of all, with the participation of groundwater in feeding the river during this period. For the Pripyat basin, by the ecological classification of surface waters, both average and extreme indicators of the content of the main ions in the water of the river did not exceed 2 categories of the II class, which are classified as “very good: good”.

The mineral composition of the Uzh River varied somewhat depending on its creation. Obviously, this is related to the change in water content in the area downstream from the bridge near the Narodichi village and in the villages 1 km below the village. The primary ion content was 211...212 mg/dm³ and in the second — 232...237 mg/dm³.

The obtained indicators of the specific electrical conductivity, which ranged between 236...268 μS, did not exceed 2 categories of the II class, which are classified as “very good: good”, and are completely

consistent with the data on the mineral composition of the water.

The river's sulfate ion content, which ranges from 29 to 48 mg/dm³, defines its natural state since the I and II classes of background indicators vary for this region. Particularly, the water quality in the Narodichi village was distinguished by indicators of 29 mg/dm³, which is almost transitional from 2 to 3 categories (from “very good” to “good”). The high concentration of sulfates in water may be due to a number of factors, but the main one is likely the presence of large amounts of this substance in soils, which naturally contain sulfate compounds of sodium, magnesium, and calcium. However, if the concentration of sulfuric acid compounds in the water is too high, sewage from settlements, particularly sulfates, which are prevalent in animal waste, can exacerbate the problem. Additionally, a rise in anaerobic oxidation processes in water is indicated by the sulfate content.

The analysis of the content of sulfates in the water of the Uzh River and its tributaries confirmed the compliance of the water with 2-3 categories of water quality of the II class, which are identified as “good”. It is important to note that while these indicators are favorable for the Pripyat River basin, which encompasses all the rivers under study, they are a little bit too high for the Northern Polissia region. Furthermore, using retrospective data, the surface waters of this region were determined to be within the limits of the I category and the I class of quality, i.e., “excellent” about ten years ago. This attests to the fact that anthropogenic influence on the region's water ecosystems has increased, resulting in a 1-2 category deterioration of water quality.

During the study period, the chloride content of water ranged from 28 to 45 mg/dm³. Simultaneously, the average values were 37 mg/dm³. According to ecological classification, these values are typical for category 3 of the II class of water quality. These are quite high indicators for the Polissia region, which presumably are due to the strengthening of economic activity and the inflow of domestic wastewater, as well as soil factors. Because the background for this territory is the first class of water quality, it is obvious that anthropogenic activity affects this indicator.

The analysis of the dynamics of the block index of the water salinity — I_s of the Uzh River and its tribu-

taries — reveals that it can be classified as “good” or “very good” in general (Table 4). The chloride-sulfate composition of water causes a decrease in water quality within 3-4 subcategories of the II-III classes, with the tributaries of the left bank of the Uzh River Basin having the highest salt content, indicating the presence of brines of chloride-sodium composition with mineralization of more than 250 g/dm³.

Assessment of water quality according to the criteria of trophic and saprobological composition. According to the content of dissolved oxygen, the water of the Uzh River was defined as “good” (II class of water quality of 2-3 categories), although in particularly

hot periods, a decrease in the content of dissolved oxygen in the water was noted to category 5 of the III class (moderately polluted: mediocre), which was visually noted in the intensification of water bloom processes and the appearance of a light putrid smell.

Water saturation with oxygen had roughly the same level of quality, while the percentage of saturation ranged from 88 to 71 %, determining the water into 3-4 categories: good to slightly polluted.

In general, the oxygen regime of the Uzh River in the area near Narodychy village can be considered satisfactory, which does not significantly impair the vital activity of hydrobionts. However, the rivers

Table 4. Summary table of ecological assessment of the water quality of the Uzh River basin

Object ID	I_s	I_{ts}	I_t	I_e	Object ID	I_s	I_{ts}	I_t	I_e
1	1.200	3.660	3.000	2.652	30	2.000	4.231	5.410	4.750
2	3.256	4.789	5.213	5.011	31	2.000	3.000	3.800	2.970
3	1.200	3.330	3.000	2.541	32	3.300	5.200	6.530	5.745
4	1.660	3.660	3.000	2.808	33	2.660	6.000	5.500	5.333
5	1.350	2.660	3.000	2.366	34	3.000	6.000	7.000	5.399
6	2.000	3.660	3.000	2.591	35	2.330	4.660	4.500	3.877
7	2.660	4.000	5.426	4.859	36	3.000	4.330	5.000	4.161
8	3.000	3.860	3.500	3.496	37	1.800	3.000	3.500	2.801
9	2.340	2.330	3.500	2.757	38	2.330	3.600	3.330	3.125
10	1.660	3.660	3.000	2.808	39	1.660	4.660	5.000	3.820
11	2.660	3.102	2.456	2.759	40	2.000	4.000	6.000	4.785
12	2.350	3.650	3.600	3.240	41	2.000	4.000	3.500	3.206
13	2.660	3.000	3.500	3.091	42	2.000	3.550	3.500	3.054
14	2.000	3.330	3.500	2.980	43	2.660	3.330	4.000	3.371
15	3.660	5.660	5.500	5.001	44	1.660	4.000	6.500	3.103
16	2.660	4.000	4.500	3.766	45	2.660	3.660	3.550	3.331
17	3.000	5.000	5.500	4.556	46	3.660	5.660	6.660	5.392
18	2.660	5.330	5.500	5.620	47	2.660	3.330	3.660	3.256
19	2.660	5.330	4.500	4.215	48	2.660	4.660	4.330	3.931
20	1.660	5.330	5.000	4.046	49	2.000	3.000	2.800	2.632
21	3.330	5.660	4.500	4.856	50	3.000	4.330	6.000	4.498
22	2.660	5.660	3.000	3.820	51	2.330	4.660	6.000	4.383
23	1.660	3.330	3.500	2.775	52	2.660	3.660	7.000	3.037
24	1.660	2.660	5.000	3.145	53	3.330	4.330	6.500	3.314
25	2.330	3.000	3.600	3.013	54	2.670	5.142	6.351	5.123
26	1.660	3.000	3.500	2.754	55	1.660	3.660	4.500	4.778
27	2.660	5.330	5.000	4.383	56	2.377	4.498	6.253	5.412
28	3.330	5.660	5.423	5.123	57	4.568	3.585	4.431	4.256
29	2.330	3.000	3.600	3.013	58	2.780	4.230	3.650	3.126

Noryn, Zherev, Zvizdal, Loznytsia, etc., had slightly worse indicators; the content of dissolved oxygen varied from 7.3 to 6.3 mg/dm³, which corresponded to the 3rd category of the II quality class with the transition to the 4th category of the III quality class. The average value corresponded to 4 categories in the III class: 6.9 mg/dm³. Deterioration of the oxygen condition is associated with the inflow of wastewater from the city of Ovruch, which contains an excess amount of nitrogen and phosphorus compounds that provoke the eutrophication of water bodies.

This category of indicators also includes the content of suspended solids, transparency, and pH. Suspended substances are a potential source of organic substances. They enter water ecosystems with rainwater and meltwater, causing erosion of watercourses, scaling of bottom sediments, etc [16].

Changes in the amount of suspended particles and the transparency of the water are frequently influenced by the time of year: for flat rivers, the spring flood is when the suspended solids content is at its highest, while the minimum content is experienced in the winter. For mountain rivers, the turbidity of the water typically increases during the time of rain and mountain snowmelt [32]. From a toxicological perspective, control of these two water indicators is crucial due to the concentration of radionuclides and heavy metals in suspended particles [12]. Therefore, more than 90 % of lead, 30...35 % of arsenic and cadmium, more than 20 % of mercury, etc., accumulate in suspended particles for surface waters with moderate turbidity [9].

The amount of suspended particles fluctuated throughout the entire study period, staying within the range of values typical for the two categories of the II class of water quality (very good). The water's transparency was also extremely low; specifically, it ranged from 22 to 36 cm, which corresponds to the 6th category of the IV class, indicating that some essential hydrobiont processes may be suppressed. A higher concentration of iron and manganese compounds in the water may be indicated by a decrease in water transparency as well as the presence of a clay fraction.

The Uzh River is characterized by moderate transparency of water along the entire length of the river, which is due to several reasons: low plowing of the

coastal strip and insignificant input of humic substances due to the presence of a fairly dense vegetation cover along the banks. Another reason is the composition of the groundwater that feeds the main watercourse of the Uzh River, which, like most rivers in Polissia, is characterized by an increased amount of Ferrum in almost all investigated observation points. Significant areas of the river floodplain are waterlogged, which determines the increased levels of BOD and permanganate oxidizability due to the influx of hard-to-oxidize humus substances, which determines a slight decrease in water transparency to 22...36 cm.

Deterioration of hydrophysical and hydrochemical indicators was noted in the areas below the village. Narodychi, which we associate with increased plowing of the floodplain by homesteads of the population and more intensive agricultural production in this area.

The values of suspended particle content in water corresponded to the general trend in the Uzh River basin, with an average value of 11.9 mg/dm³ and variations ranging from 8.0 to 21.2 mg/dm³, i.e., within 2-4 categories of II-III quality classes. Water quality has deteriorated to category 4 due to extensive plowing of the floodplain between the villages of Latashi, Klochki, and Otruby, among others. It should be noted that the floodplain is not vegetated for the majority of the year, which leads to the deterioration of water quality in the block of trophosaprobological indicators and affects the content of suspensions, color, and nitrogen, phosphorus, and organic substances.

The Zherev River had the highest concentrations of suspended particles. The average values varied between 15.2...15.4 mg/dm³, i.e., within 3-4 categories of II-III class. Similar trends were observed in the Zherev river basin, where average values of water transparency were estimated to be within the 6th category — “poor” (class IV) at 28.6 degrees, while variations in values were only within 5-6 categories of III-IV classes. This is because almost the entire floodplain of the Zherev River along the left bank has been plowed within the boundaries of the Natural Reserve “Drevlyanskyi” and near the settlements of Korosten, Narodychi, Ovruch, and others. According to the NDVI vegetation index assessment data,

this area is devoid of vegetation and is plowed for the majority of the year, resulting in the constant washing of soil fractions into the water of the Zherev River. This also explains why mudslides occur in so many places.

The arrival of substances from agricultural fields causes significant pH changes in the acidification direction, which can be explained by the arrival of mineral fertilizer residues in water ecosystems. Thus, the pH variation range was 6.38...6.91, corresponding to 1...4 categories of I-III water quality classes (from excellent to mediocre).

According to the analysis, the ammonium nitrogen content only reached category 5 (moderately polluted) of the III class of water quality during hot periods (mediocre). The average ammonium nitrogen content was 0.273 mg/dm³, indicating that this water is “good” in both class and category. Seasonal fluctuations in ammonium ion content were typically characterized by a decrease in the indicator in the spring and an increase in the indicator in the summer, most likely due to the strengthening of organic decomposition processes. The increase in ammonium ion content during the autumn-winter period is associated with the continuation of organic substance decomposition with slight fixation by phytoplankton due to a decrease in photosynthesis intensity.

The presence of nitrite forms of nitrogen indicated a slightly worse situation in terms of water quality in the Uzh River. Nitrite nitrogen was measured in the range of 0.008...0.017, defining such water as 3 (good) — 4 (slightly polluted), with average values in the 4th (slightly polluted) category and within the transition from II to III class.

An increase in the nitrate content of the water was observed at the end of summer, which is associated with phytoplankton activity. The average summer values were 3.385 mg/dm³, which corresponds to category 7 (very dirty) of class V (poor), the worst values were recorded at the same level, and the best indicators were recorded in spring at the level of category 4 (slightly polluted) of the III class of water quality.

In general, the water of the Uzh River is classified as transitional from 4 to 5 of the III quality class based on nitrogen exchange. The deteriorated nitrogen regime is completely consistent with other tro-

phosphobiological unit data and demonstrates the anthropogenic component of the impact on water quality in the form of agricultural production in the river floodplain and wastewater inflow from settlements.

This indicator showed significant variations in the water of the Uzh River. Thus, the average values were recorded at a level of 0.064 mg/dm³, which corresponds to four water quality categories (slightly polluted) of the III class (mediocre). The lowest values indicated deterioration to category 6 (dirty) of class IV (bad). The N:P ratio is quite favorable for the lack of significant “blooming” of water bodies, as evidenced by the water’s oxygen supply.

The average value was 0.187 mg/dm³, which corresponds to water quality category 5 (moderately polluted) and III class (mediocre). The lowest values indicated deterioration to category 6 (dirty) of class IV (bad): 0.228 mg/dm³. Phosphates are very likely to have entered the Uzh River’s water ecosystems through wastewater from Ovruch City, where salvo discharges of wastewater were recorded during the summer, as well as from smaller settlements located along the floodplain. Furthermore, phosphorus ingress in the summer of 2019 may be linked to the application of phosphate fertilizers on agricultural land within the basin. Almost everywhere in the summer of 2019, areas of water bloom were observed, indicating a violation of the balance of the main nutrients in the Noryn River ecosystems.

We determined the dichromate oxidizability of the water under experimental conditions to characterize it. Since, in comparison with permanganate oxidizability, it more accurately characterizes the content of organic pollutants, since potassium dichromate oxidizes about 90 % of organic substances present in water, including those that are difficult to oxidize.

In terms of organic compound pollution, the water of the Uzh River is quite poor. This is supported by all of the water quality indicators studied. Permanganate oxidizability was averaged at 9.51 mg/dm³, classifying it as category 4 (slightly polluted) of the III class. The worst results were obtained at the category 5 (moderately polluted) level of the III class — 12.80 mg/dm³. The data on bichromate oxidation confirmed the data on permanganate oxidation because the water of the Uzh River was classified as

slightly polluted (category 4, class III) based on the average values and moderately polluted based on the worst values (category 5, class III). According to average and worst indicators, BOD5 for the Uzh River was at category 4 (slightly polluted) of III quality class (mediocre).

Assessment of water quality according to the criteria of the content of specific substances with toxic and radiation effects. Water quality has been steadily deteriorating over the past 15 years in the Polissia region, especially in the territory of the Uzh River basin. Sometimes in the summer, concentrations rise to eight or nine times the maximum permissible concentration (MPC), which translates to a drop of three to five categories in water quality. Such unfavorable dynamics point to the gradual accumulation of this element in bottom sediments as an insoluble form. During the warmer months of the year, the silt layer of aquatic ecosystems undergoes a period of recovery, and under oxygen-depleted conditions, some of the manganese stored there is released, leading to secondary water pollution.

It should be noted that the overestimated Ferrum concentrations in the Uzh River's water are the result of geochemical processes, as the Uzh River basin receives groundwater that has the highest concentration of ferrum ions on Ukrainian Polissia territory, with a natural Ferrum content of at least 8 g/dm³. As a result, the Uzh River's water's iron concentration fluctuated between 5 categories (moderately contaminated) of the III quality class, according to the overall scale (mediocre). However, the water quality of the Uzh River is classified as "quite good" (2nd category II class) on the scale interpreted for northern Polissia, taking into consideration the background level of this element's concentration, with the worst values falling at the level of 3rd category II class.

It is important to notice the concentration of cadmium, zinc, total chromium, and nickel in the water was determined at the level of 1 category of the first quality class, or "excellent" ("good"). The average indicators were set at the level of two II class groups based on the levels of lead, copper, and mercury.

Among heavy metals, manganese content was crucial. It should be mentioned that the structure of the river basin and regional elements influence,

in some ways, such content. In practically all water bodies harboring Polissia, its increased content has been observed. This may be due to peatlands having a high composition, iron-manganese soil nodules, or leaching from the forest floor. The high levels of flooding in the northern Polissia region and the close proximity to the soddy-podzolic soils typical of the region complement the overall image. The Uzh River was found to have extremely high concentrations of manganese at the level of category 5 of the III class of water quality, which cannot be fully explained by its high content in the composition of humic substances. As a result, it should be possible that it arrived with an anthropogenic component.

The amount of oil products in the Uzh River was negligible as well; the averaged data for the content of this compound was at the level of 1 category of the first quality class, with slightly higher content noted near the bridge where the road passes. Yet even at its worst, the water quality did not drop below the II class, making it safe for human consumption (good). No cyanides or phenols were found in the water. Synthetic surface-active substances were detected, albeit in low concentrations; their content was within acceptable ranges, and worst-case scenarios placed them in category 2 ("very good").

Similar values were confirmed by the calculations of the coefficients of the bottom accumulation of heavy metals and the accumulation of pollutants in hydrobionts. According to these two indicators, data were obtained that once again confirmed the previously obtained data on the content of the main categories of heavy metals and toxins. Water is determined on average at the level of 2-3 categories of the II quality class (good).

Water samples taken from the Uzh River were found to have negligible radionuclide activity. The average ¹³⁷Cs concentration was measured at 0.33 Ku/dm³, which is equivalent to the third (good) category of the II quality water classification; the worst values were also measured at 0.49 Ku/dm³ within the same classification.

The Uzh River's water quality is deemed to be positive in terms of the presence or absence of certain toxic and radiation-effect-causing substances. The geological, geomorphological, and soil conditions of the northern Polissia of Ukraine showed subcat-

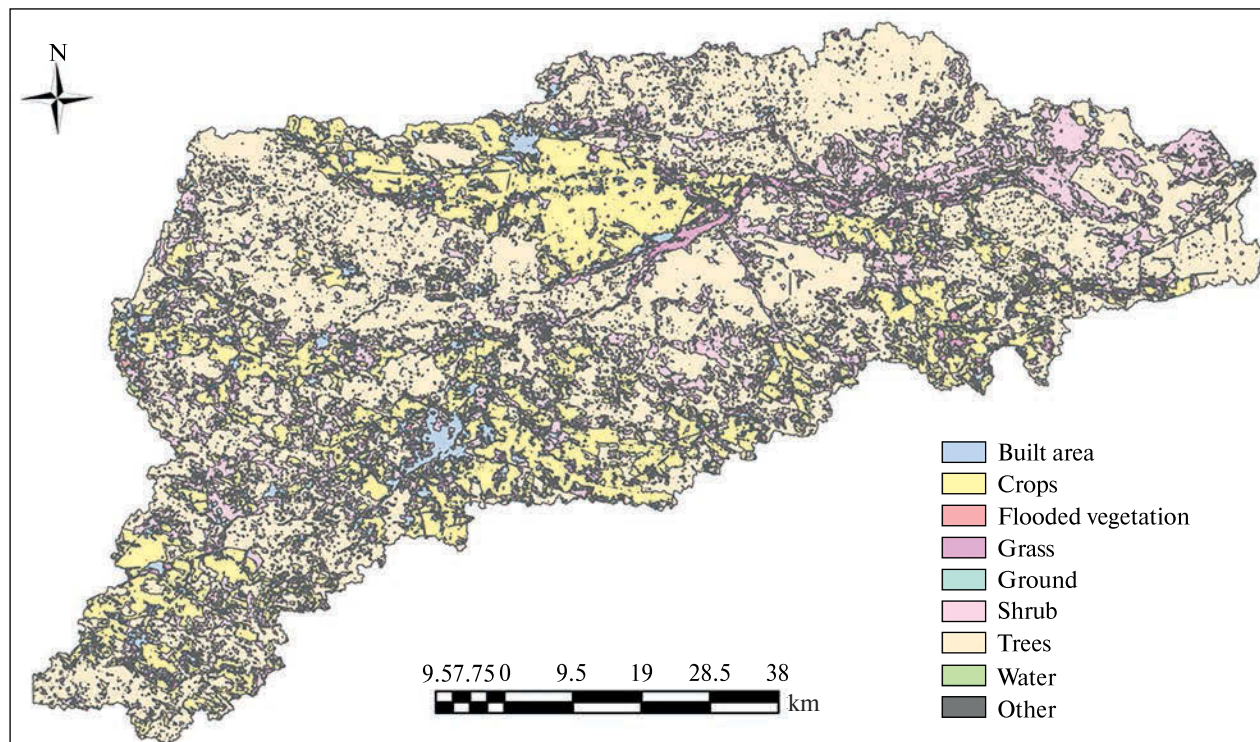


Figure 4. GIS-segmentation of landscapes in the Uzh River basin into stabilizing and destabilizing components

egory 2 with a transition to 1, with deterioration only in terms of total iron and manganese content in the water. As a result, this is how we know when the water quality has degraded to the subcategory 2-3 range (between the second and third).

Assessment of the influence of landscape structure on the formation of surface water quality. The river basin has undergone dramatic landscape shifts over the past few decades, with the expansion of both urban and agricultural areas. A comprehensive, multi-dimensional analysis is required to design a set of measures for the development and upkeep of ecologically stable landscapes.

Among the ecological problems that should be outlined when characterizing the ecological state of the main tributaries of the river basin, the sources of anthropogenic influence are primarily the plowed area of the territory, the regulation of the flow, the absence of coastal protection strips, etc. For tributaries, there is a problem with the impact of the reclamation system on the formation of runoff, the regulation of runoff, and the considerable size of pond farms. The

lack of coastal protective strips is also complemented by the general lack of local treatment facilities for the entire basin.

The Uzh River is considered to be one of those rivers that have a medium ecological significance in terms of floodplain development, but the floodplain itself is changed and disturbed.

In order to achieve this goal, we made use of several coefficients that, to the greatest extent feasible, reflected the level of stability as well as the anthropogenic modification. Thus, we divided the landscape into stabilizing and destabilizing components according to the Klementova and Heinihe methodology (Fig. 4).

As a result of the GIS analysis, we transformed the landscape data into digital data (Table 5).

The level of plowing in the territory is another crucial indicator of the quality of the surface waters in the territory. Even though 70...80 % of the land in the river basins of northern Ukraine has been plowed, less than 55 % of the land in the Uzh River basin and its tributary has been plowed because of radioactive

pollution caused by the accident at the Chornobyl nuclear power station. Yet, the plow rate is as high as 60 % in the basins' tributaries. The ecological condition can be described as "stressed" and the degree of plowed land as "average" based on the current status of the plowed territory.

Since the floodplain of the Uzh River has an erosive-cumulative character, severe erosion fragmentation is one of the reasons for the dramatic decline in water quality in the basin of the river. We estimated the coefficients of erosion fragmentation for a more in-depth examination of the landscape's degree of erosion degradation. According to the results of the

study, all of the massifs show signs of average disintegration and a stressed ecological state (Fig. 5).

At the same time, massif No31 was characterized by terrain dismemberment coefficients above 0.5, that is, by strong dismemberment and an extraordinary ecological condition. The worst levels were noted for the years of Uzh and Brodets: 0.58 and 0.65, respectively. In our previous works, we used this criterion to assess the stability of Polissia river landscapes [11, 13, 16]. It reflects data on the ratio of areas occupied by stabilizing and destabilizing components of landscapes ($KESL_1$) and the ratio of ecologically stable elements to the entire landscape ($KESL_2$).

Table 5. The level of stability and anthropogenic transformation of the landscapes of the Uzh River basin

Object ID	$KESL_1$	$KESL_2$	K_{atl}	K_{eff}	Object ID	$KESL_1$	$KESL_2$	K_{atl}	K_{eff}
1	1.345	0.610	3.612	0.410	30	0.685	0.330	4.986	0.596
2	0.653	0.301	6.000	0.590	31	1.457	0.430	3.160	0.554
3	1.966	0.500	4.680	0.470	32	0.673	0.410	4.920	0.606
4	0.585	0.390	3.575	0.389	33	0.838	0.410	4.920	0.586
5	0.636	0.390	4.680	0.530	34	0.745	0.289	6.512	0.553
6	0.585	0.170	3.568	0.563	35	1.056	0.400	4.800	0.440
7	0.575	0.170	6.254	0.612	36	1.252	0.360	4.320	0.565
8	0.585	0.360	3.356	0.555	37	1.032	0.360	4.320	0.522
9	0.452	0.290	3.578	0.430	38	0.862	0.260	5.250	0.524
10	1.466	0.559	4.540	0.412	39	1.112	0.512	4.142	0.503
11	1.745	0.654	2.457	0.410	40	0.480	0.321	4.152	0.598
12	1.236	0.785	4.526	0.460	41	1.682	0.400	3.859	0.492
13	1.275	0.523	2.987	0.430	42	0.838	0.330	3.960	0.508
14	1.213	0.652	3.550	0.460	43	1.324	0.598	3.156	0.495
15	0.274	0.220	7.325	0.510	44	0.761	0.360	4.320	0.514
16	1.356	0.642	5.462	0.545	45	0.506	0.380	4.560	0.492
17	0.311	0.230	5.120	0.485	46	0.656	0.390	4.680	0.650
18	0.507	0.230	6.524	0.510	47	0.687	0.460	5.520	0.478
19	0.236	0.230	5.426	0.460	48	1.323	0.420	5.040	0.515
20	0.452	0.213	6.521	0.440	49	0.681	0.420	5.040	0.501
21	0.253	0.320	4.892	0.564	50	0.875	0.430	5.160	0.560
22	0.848	0.360	4.320	0.556	51	1.111	0.360	4.320	0.554
23	0.876	0.360	3.325	0.452	52	1.146	0.330	3.960	0.563
24	1.894	0.550	4.256	0.451	53	0.942	0.580	3.450	0.452
25	1.654	0.550	4.102	0.523	54	0.867	0.580	6.160	0.615
26	0.770	0.380	4.560	0.435	55	0.525	0.210	6.520	0.566
27	0.631	0.380	4.560	0.523	56	0.756	0.301	5.152	0.615
28	0.640	0.360	4.320	0.568	57	0.862	0.260	3.120	0.501
29	1.146	0.560	3.720	0.612	58	0.838	0.290	3.480	0.580

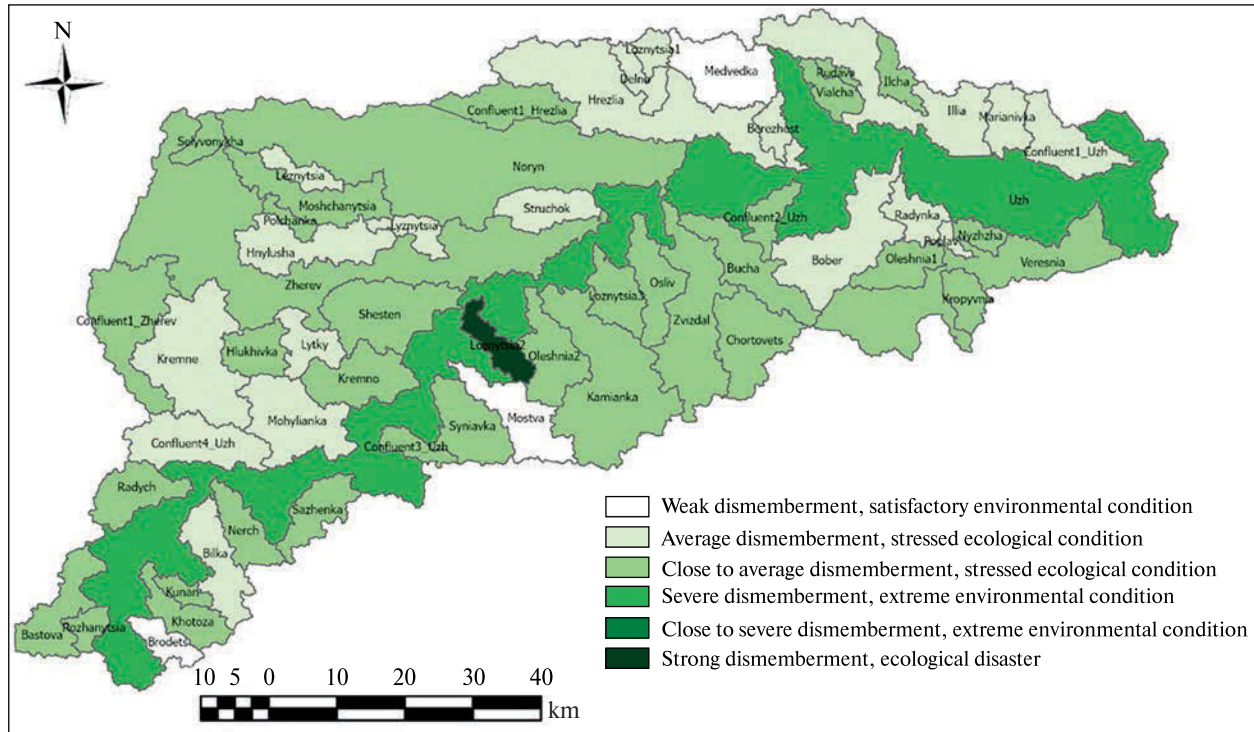


Figure 5. Erosion fragmentation degree of the flood plains of the Uzh River basin

As the landscape analysis showed, according to the $KESL_1$ indicator, the landscape has a pronounced unstable pattern. It was determined that 38 massifs are unstable in landscape structure. The worst conditions are characterized by 11 massifs (ID 19...21, 13...17, 9...11, 39, 43), whose landscapes are defined as highly unstable.

We compared data on the instability of landscapes with data on water quality in specific massifs and determined that there is an inverse correlation between these data ($r = -0.67$). At the same time, for the landscapes of these 11 landscapes that had $KESL_1$ values below 0.5, the integrated coefficients of surface water quality at the best values were close to 4 categories of III class (polluted) water quality, and at the worst, up to 5 categories of III class (moderately polluted). At the same time, there is a pronounced tendency that landscapes with $KESL_1$ more than 1 were 100 % characterized by surface water quality that varied in the range from 2 (II class) to 3(4) category (III class) of water quality.

According to the $KESL_2$ indicator, 21 arrays are defined as unstable ($KESL_2$ less than 0.34), and another

26 can be considered conditionally stable ($KESL_2$ in the range from 0.34 to 0.5). The general assessment of the influence of the degree of stabilization and destabilization of the landscape on water quality showed a significant inverse correlation between the specified components ($r = -0.65$) (Fig. 5). 90 % of points with I_e values in the range of transitional categories from 3.5 (from “quite clean” to “slightly polluted”) to 5.5 (from “moderately polluted” to “dirty”) are located in unstable and conditionally stable landscapes with values of $KESL_2$ greater than 0.5. Therefore, according to the data of the analysis, it can be shown that the deterioration of water quality below the category of water quality according to $I_e \geq 3.5$ is caused by the destabilization of the landscape structure.

Thus, 90 % of points characterized by water quality values according to I_e below 3.5 categories were formed in unstable and conditionally unstable landscapes. Given this, we can talk about the clarification and addition of the data obtained during the calculation of $KESL_1$, namely that the destabilization of landscapes determines the deterioration of the water condition starting from category 3.5.

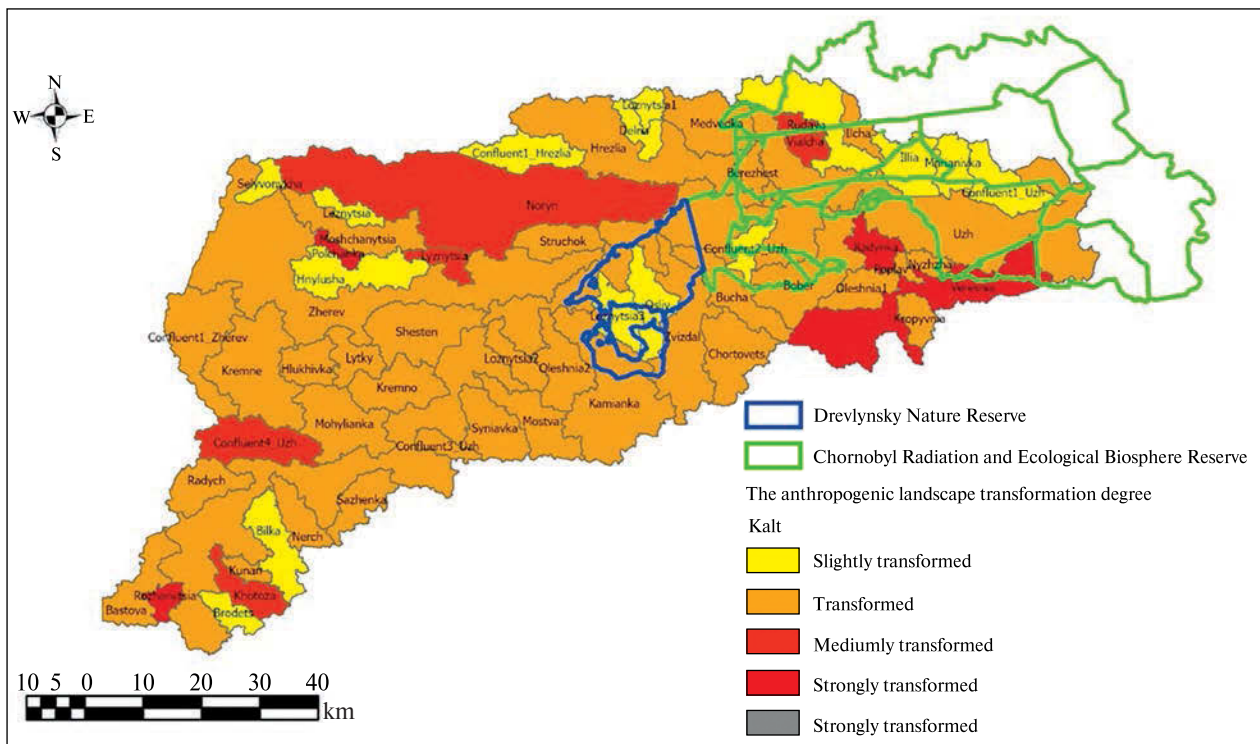


Figure 6. Anthropogenic transformation of the landscapes of the Uzh River basin

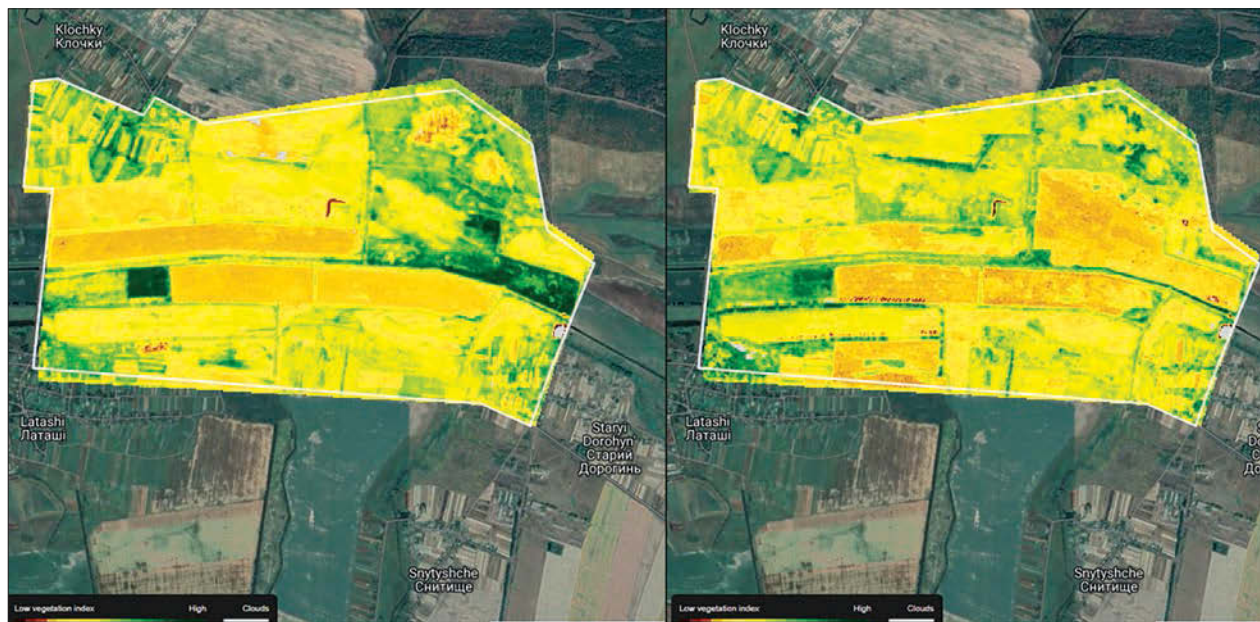


Figure 7. Vegetation index NDVI for the floodplain of the Noryn River between the villages of Latashi, Klochki, and Otruby as of May 5, 2022 (left) and Oct 7, 2022 (right) [34]

The analysis of the territory by the level of anthropogenic transformation showed that most of the massifs of the territory belong to the “transformed” category (Fig. 6).

Most of the massifs that are defined as “weakly transformed” are located within protected areas (the Chernobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve and the Drevlyansky Nature Reserve), even despite the radioactive trace left by the accident at the Chernobyl nuclear power plant. The strong transformation of landscapes (ID 34, 55, 20, 18, 15) is associated with significant plowing of the territory. The medium-transformed massif turned out to be one of the largest in the territory of ID 16. The left-bank tributaries of the Noryn River have considerable turbidity, reminiscent of mudflows, caused by the removal of a large amount of easily eroded ridge material.

Analysis of the floodplain of the river using the Onesoil program [34] is covered with vegetation only in the period from the beginning of June to the second decade of September, taking into account the slope of the surface, this can provoke the arrival of nitrogen, phosphorus, potassium, heavy metals and other compounds from the plowed areas to the surface waters of the river Norin (Fig. 7).

Correlation analysis of all the analyzed variables revealed that the establishment of the trophosaprobological and toxicological states of surface waters is influenced by the structure of the landscape and the degree of erosion disintegration (Table 6).

The indicators of the trophosaprobological status of the water, I_s , and the integrated water quality index, I_e , were connected with the indices of the ecological stabilization of landscapes, $KESL_1$ and

Table 6. Correlation analysis of surface water quality in relation to the degree of erosive terrain fragmentation and the anthropogenic landscapes transformation

Variable	Marked correlations are significant at $p < 0.05$, $N = 58$ (Casewise deletion of missing data)			
	$KESL_1$	$KESL_2$	K_{atl}	K_{eff}
I_s	-0.290410	-0.183640	0.119304	0.368500
I_{ts}	-0.442305	-0.331480	0.530163	0.393702
I_t	-0.293132	-0.249325	0.432874	0.521335
I_e	-0.462606	-0.375645	0.609134	0.600646

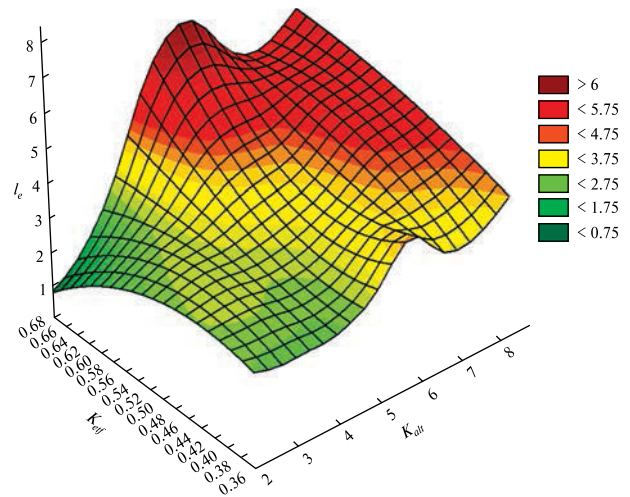


Figure 8. A three-dimensional model of the formation of surface water quality in relation to the degree of erosive terrain fragmentation and the anthropogenic landscapes transformation ($I_e = -1.9038 + 0.4424K_{atl} + 7.0984K_{eff}$, $R = 0.7521$, $p = 0.0000$)

$KESL_2$, which demonstrated nearly identical results. By comparing water quality to measures of erosional fragmentation of the terrain and measures of anthropogenic landscape modification, the highest significant association coefficients were found.

We constructed a three-dimensional model with K_{eff} and K_{atl} indicators after estimating an almost equally important contribution to the creation of surface water quality (Fig. 8). The model enables a pretty accurate evaluation and forecasting of the development of surface water quality in landscapes.

This is of utmost significance given the fact that a portion of these territories is currently located in a zone of radioactive contamination. As a result, any plans to alter the structural makeup of landscapes (such as through construction, agricultural production, or deforestation) need to be consistent with the potential risks of a decline in the quality of surface water. This is because the elimination of radioactive substances from these areas will result in the worsening of the ecological condition of another downstream land.

DISCUSSION

Landscape structure, over-urbanization, exploitation of natural resources, and unwise land use have led to the problem of water quality deterioration [11].

This impact is a complex response at different scales for many landscape structures, including landscape composition (i.e., different types of land use) and landscape pattern (i.e., spatial distribution and distribution of landscape plots) [49].

Shen Z. et al. (2015) noted that buffer zones along rivers and streams can improve water quality by filtering nutrients, sediment, and other pollutants from the surface [40]. Redundancy analysis was used to determine the impact of the landscape model at the entire catchment scale and several buffer zone scales (100 m to 1500 m) on water quality in a highly urbanized watershed. However, in our study, we divided the Uzh River basin into first- and second-order subbasins, and instead of buffer zones, we applied a basin approach. In the same study, the authors used the urban land density indicator, but we determined the influence of the ratio of stabilizing and destabilizing landscape components on water quality indices.

Moreno-Mateos D. et al. (2008) demonstrated that water quality in streams is dependent on catchment and wetland landscape parameters [33]. Significant correlations exist between the proportion of arable land and landscape homogeneity and catchment-scale salinity factors. In our research, we also studied the salinity of the entire block of water, but we did not see any significant connections between the impact of landscape structure on changes in salinity composition and the salinity block.

In contrast, the same study demonstrates a link between markers of the block's trophosaprobological state and the number of animal farms and plowed land. In our investigation, we also observed a substantial effect of landscape structure on the classification of trophosaprobological markers into water quality classes. The majority of the water in the Uzh River basin belonged to categories 4-6 at the time. This is entirely explained by the presence of humic substances and ferrum compounds and is determined by the nature of the soil cover of the basin, as well as the chemical composition of groundwater and its increased importance in feeding the river; the presence in the water of difficult-to-oxidize humic substances, which come from waterlogged and swampy areas, as well as with soil and wastewater and relatively high values of dichromate oxidizability of water both now and in retrospect; a rather extensive range of water

pH variation (from 1 to 4 categories) is explained by the joint influence of anthropogenic and natural factors. The effect of natural factors is a set of factors, of which the most important are the specific features of the geological structure of the catchment area and the nature of production and destruction processes in the water ecosystem; high concentrations of mineral forms of nitrogen and phosphorus in river water are caused by their entry into the water body with wastewater, as well as with the surface runoff of the catchment area. The impact of erosion processes on surface water quality is clearly outlined, which is completely consistent with the results of research by other authors [2, 21, 26, 29, 30, 38].

However, in our study, we used the collected data to develop a three-dimensional model of the distribution of water quality indices that takes into account both the erosive dismemberment of the relief and the structure of landscapes. This allows us to conduct a fairly reliable assessment and develop forecasts of the formation of surface water quality in landscapes when designing changes to their components. The removal of radioactive substances from these territories will lead to the deterioration of the ecological condition of the landscapes, so planning changes in the structure of landscapes (construction, agricultural production, deforestation) should be consistent with the potential risks of deterioration of the quality of surface water.

CONCLUSION

The analysis of the dynamics of the block index of the salt composition of water in the rivers of the Uzh River basin allows us to note that, in general, it can be characterized as "good" and "very good." According to the maximum values of the index, the water in the area can be defined as "good" and "satisfactory". The natural state of the river is characterized by the values of the sum of ions, which correspond to 2-3 categories, defined according to the ecological classification as "very good" and "good."

According to the average annual values of the block index of the trophosaprobological condition of the Uzh River and its tributaries, they should be classified into 4 categories of "slightly polluted" waters, with a shift in some years to the 3rd category. Extreme values of the trophosaprobological index are the basis

for assigning the river to the 4th category of “slightly polluted” waters, with a shift in some years to category 5 (“moderately polluted”). The natural state is characterized by the values of trophosaprobological indicators (except transparency, pH, and bichromate oxidizability) that correspond to category 3 (“quite clean”) with a shift towards category 4 (“slightly polluted”), which allows us to define them as “mesosaprobic” and “mesoeutrophic” waters.

Therefore, it should be noted that the pollution of most of the listed toxic substances was at an average level and, in most cases, did not exceed the permissible concentrations for category 4 (“slightly polluted”). Regarding extreme concentrations, quite often, they reached the level of the 6th category, “bad”, which was caused mainly by the influence of anthropogenic activity within individual points. As an exception, high concentrations of iron and manganese in the water of the Uzh River and its tributaries can be noted, the values of which are determined by geochemical processes and their increased content in groundwater.

The degree of erosional fragmentation of the territory and the degree of anthropogenic transformation

of landscapes play a key role in predicting the level of the integrated water quality index. In the course of the research, it was determined that the main factor in the destabilization of landscapes is the significant plowing of the basin territory, which determines the high level of anthropogenic transformation of several massifs. The most stable massifs remain within the protected areas, even despite the consequences of the radioactive fallout from the accident at the Chernobyl nuclear power plant. The three-dimensional model of the distribution of water quality indicators from indicators of anthropogenic transformation of the landscape, obtained during the research, makes it possible to make a reliable assessment and create forecasts of the formation of surface water quality in any given landscape.

The removal of radioactive substances from these territories will lead to the deterioration of the ecological condition of the landscapes, so planning changes in the structure of landscapes (construction, agricultural production, deforestation) should be consistent with the potential risks of deterioration of the quality of surface water.

REFERENCES

1. Albert J. S., Destouni G., Duke-Sylvester S. M., Magurran A. E., Oberdorff T., Reis R. E., Ripple W. J. (2021). Scientists' warning to humanity on the freshwater biodiversity crisis. *Ambio*, **50**(1), 85–94.
2. Anima Gyimah R. A., Karikari A. Y., Gyamfi C., Asantewaa-Tannor P., Anornu G. K. (2020). Spatial evaluation of land use variability on water quality of the Densu Basin, Ghana. *Water Supply*, **20**(8), 3000–3013.
3. Annex I to Resolution No. 4 of the Bern Convention (1996). URL: <https://rm.coe.int/16807469e7> (Last accessed: 23.02.2023).
4. Bampa F., O'Sullivan L., Madena K., Sandén T., Spiegel H., Henriksen C. B., Debeljak M. (2019). Harvesting European knowledge on soil functions and land management using multi-criteria decision analysis. *Soil Use and Management*, **35**(1), 6–20.
5. Basin management of water resources of the river Pripyat (2022). URL: http://buvrzt.gov.ua/vodni_resyrsy.html (Last accessed: 23.02.2023).
6. Bilaşco, Ş., Roşca S., Vescan I., Fodorean I., Dohotar V., Sestras P. (2021). A GIS-based spatial analysis model approach for identification of optimal hydrotechnical solutions for gully erosion stabilization. Case Study. *Appl. Sci.*, **11**(11), 4847.
7. Borrelli P., Meusburger K., Ballabio C., Panagos P., Alewell C. (2018). Object-oriented soil erosion modeling: A possible paradigm shift from potential to actual risk assessments in agricultural environments. *Land degradation & development*, **29**(4), 1270–1281.
8. De Mello K., Valente R. A., Randhir T. O., dos Santos A. C. A., Vettorazzi C. A. (2018). Effects of land use and land cover on water quality of low-order streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. *Catena*, **167**, 130–138.
9. Ding J., Jiang Y., Liu Q., Hou Z., Liao J., Fu L., Peng Q. (2016). Influences of the land use pattern on water quality in low-order streams of the Dongjiang River basin, China: A multi-scale analysis. *Sci. total environment*, **551**, 205–216.
10. Dombrovski V. C., Zhurauliou D. V., Ashton-Butt A. (2022). Long-term effects of rewilding on species composition: 22 years of raptor monitoring in the Chernobyl Exclusion Zone. *Restoration Ecology*, e13633.

11. Dou J., Xia R., Chen Y., Chen X., Cheng B., Zhang K., Yang C. (2022). Mixed spatial scale effects of landscape structure on water quality in the Yellow River. *J. Cleaner Production*, **368**, 133008.
12. Fedonyuk R., Fedonyuk T. (2019). Aerotechnogenic pollution of agricultural landscapes by inorganic dust on the example of Zhytomyr eastern industrial hub. *Scientific Horizons*, **1**(74), 52–62.
13. Fedoniuk R. H., Fedoniuk T. P., Zymaroieva A. A., Pazych V. M., Zubova O. V. (2020). Impact of air born technogenic pollution on agricultural soils depending on prevailing winds in Polissya region (NW Ukraine). *Ecological Questions*, **31**(1), 69–85.
14. Fedoniuk T., Bog M., Orlov O., Appenroth K. J. (2022). Lemna aquinoctialis migrates further into temperate continental Europe — A new alien aquatic plant for Ukraine. *Feddes Repertorium*, **133**(4), 305–312.
15. Fedoniuk T., Fedoniuk R., Klymenko T., Polishchuk O., Pitsil A. (2021). Bioindication of aerotechnogenic pollution of agricultural landscapes caused by the activities of industrial hubs. *Ekologia Bratislava*, **40**(2), 115–123.
16. Fedoniuk T. P., Fedoniuk R. H., Romanchuk L. D., Petruk A. A., Pazych V. M. (2019). The influence of landscape structure on the quality index of surface waters. *J. Water and Land Development*, **43**(1), 56–63.
17. Fedonyuk T. P., Fedoniuk R. H., Zymaroieva A. A., Pazych V. M., Aristarkhova E. O. (2020). Phytocenological approach in biomonitoring of the state of aquatic ecosystems in Ukrainian Polesie. *J. Water and Land Development*, **44**, 65–74.
18. Fedonyuk T. P., Galushchenko O. M., Melnychuk T. V., Zhukov O. V., Vishnevskiy D. O., Zymaroieva A. A., Hurelia V. V. (2020). Prospects and main aspects of the GIS-technologies application for monitoring of biodiversity (on the example of the Chernobyl Radiation-Ecological Biosphere Reserve). *Space Science and Technology*, **26**(6), 75–93.
19. Fedoniuk T. P., Skydan O. V. (2023). Incorporating geographic information technologies into a framework for biological diversity conservation and preventing biological threats to landscapes. *Space Science and Technology*, **29**(2), 10–21.
20. Fedoniuk T. P., Zymaroieva A. A., Pazych V. M., Petruk A. A. (2021). Influence of landscape organization on surface-water quality forming on an example of Ustyia river basin (Ukraine). *Ecologia Balkanica*, **13**(2), 1–21.
21. Fu B., Merritt W. S., Croke B. F., Weber T. R., Jakeman A. J. (2019). A review of catchment-scale water quality and erosion models and a synthesis of future prospects. *Environmental modeling & software*, **114**, 75–97.
22. Gemtzi A. (2020). Are vegetation dynamics impacted from a nuclear disaster? The case of Chernobyl using remotely sensed NDVI and land cover data. *Land*, **9**(11), 433.
23. Gianinetto M., Aiello M., Vezzoli R., Polinelli F. N., Rulli M. C., Chiarelli D. D., ... , Soncini A. (2020). Future scenarios of soil erosion in the Alps under climate change and land cover transformations simulated with automatic machine learning. *Climate*, **8**(2), 28.
24. *Green Book of Ukraine* (2009) (Under the general editorship of the corresponding member of the NAS of Ukraine Ya. P. Didukh). Kyiv: Alterpress, 448 p. [in Ukrainian].
25. Hu Y., Yin S., Xiao W., Hou B., Zhang X. (2022). Spatial scale effects of landscape patterns on water quality changes in drinking water source protection areas: a case study in the Guishui River Basin, China. *Arabian J. Geosciences*, **15**(8), 685.
26. Issaka S., Ashraf M. (2017). Impact of soil erosion and degradation on water quality: a review. *Geology, Ecology, and Landscapes*, **1**(1), 1–11.
27. Klementova E., Heinige V. (1995). Evaluation of ecological stability of agricultural landscape. *Melioration and Water Economy*, **5**, 24–35.
28. Kumar S., Kalambukattu J. G. (2022). Modeling and monitoring soil erosion by water using remote sensing satellite data and GIS. *Anthropogeomorphology: A Geospatial Technology Based Approach*, 273–304.
29. Kumarasiri A. D. T. N., Udayakumara E. P. N., Jayawardana J. M. C. K. (2022). Impacts of soil erosion and forest quality on water quality in Samanlawewa watershed, Sri Lanka. *Modeling Earth Systems and Environment*, **8**(1), 529–544.
30. Lei C., Wagner P. D., Fohrer N. (2021). Effects of land cover, topography, and soil on stream water quality at multiple spatial and seasonal scales in a German lowland catchment. *Ecological Indicators*, **120**, 106940.
31. Linnik P. N., Zhezherya V. A., Zubenko I. B. (2012). Content of metals and forms of their migration in the water of the rivers of the Pripyat River Basin. *Hydrobiological J.*, **48**(2), 85–101.
32. Mast M. A., Murphy S. F., Clow D. W., Penn C. A., Sexstone G. A. (2016). Water-quality response to a high elevation wild-fire in the Colorado Front Range. *Hydrological Processes*, **30**(12), 1811–1823.
33. Moreno-Mateos D., Mander Ü., Comín F. A., Pedrocchi C., Uuemaa E. (2008). Relationships between landscape pattern, wetland characteristics, and water quality in agricultural catchments. *J. Environmental Quality*, **37**(6), 2170–2180.
34. One soil. URL: <https://onesoil.ai/en> (Last accessed: 23.02.2023).
35. Radziuk H., Świtoniak M. (2022). The Effect of Erosional Transformation of Soil Cover on the Stability of Soil Aggregates within Young Hummocky Moraine Landscapes in Northern Poland. *Agronomy*, **12**(11), 2595.
36. Romanchuk L., Fedonyuk T., Pazych V., Fedonyuk R., Khant G., Petruk A. (2018). Assessment of the stability of aquatic ecosystems development on the basis of indicators of the macrophytes fluctuating asymmetry. *Eastern-European J. Enterprise Techn.*, **4**(10-94), 54–61.

37. Romanenko V., Zhukinskiy V. (1998). *Methodology of ecological assessment of surface water quality according to the relevant categories*. Kyiv: Symbol, 28 p. [In Ukrainian].
38. Seitz N. E., Westbrook C. J., Noble B. F. (2011). Bringing science into river systems cumulative effects assessment practice. *Environmental Impact Assessment Review*, **31**(3), 172–179.
39. Serduk S., Lunova O., Ahieieva O., Kamianska V. (2017). Small rivers of Ukraine: geo-ecological review of the issues. *J. Donetsk Mining Institute*, **1**, 101–106.
40. Shen Z., Hou X., Li W., Aini G., Chen L., Gong Y. (2015). Impact of landscape pattern at multiple spatial scales on water quality: A case study in a typical urbanized watershed in China. *Ecological Indicators*, **48**, 417–427.
41. Shishchenko P. G. (1988). *Applied Physical Geography*. Kyiv: High School, USSR, 192 p.
42. Shumygai I. V., Mudrak O. V., Konishchuk V. V., Mudrak H. V., Khrystetska M. V. (2021). Ecological monitoring of water bodies in Central Polissya. *Ukr. J. Ecology*, **11**(2), 434–440.
43. Skydan O. V., Danyk Y. H., Fedoniuk T. P., et al. (2022). *Space and geoinformation support for decision-making in key areas of national security and defense of Ukraine*. Ed. by O. V. Skydan. Zhytomyr: Poliskyi natsionalnyi universytet, 354 p. [In Ukrainian].
44. Skydan O. V., Fedoniuk T. P., Mozharovskii O. S., Zhukov O. V., Zymarioieva A. A., Pazych V. M., Melnychuk T. V. (2022). Monitoring tree mortality in Ukrainian *Pinus sylvestris* L. forests using remote sensing data from earth observing satellites. *Ann. Forest Res.*, **65**(2), 91–101.
45. Song Y., Song X., Shao G. (2020). Response of water quality to landscape patterns in an urbanized watershed in Hangzhou, China. *Sustainability*, **12**(14), 5500.
46. State Water Cadastre. Annual data on as surface water sushi. Part 1. Rivers and canals. Dnipro basin. State Committee of Ukraine for Hydrometeorology. Central Geophysical Observatory. 2001–2012. **2**(1) [In Ukrainian].
47. Strahler A. N. (1952). Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. *Geological Soc. Amer. Bull.*, **63**(11), 1117–1142.
48. Vishnevsky V. I., Kosovets O. O. (2003). *Hydrological characteristics of rivers of Ukraine*. Kyiv, 324 p. [in Ukrainian].
49. Xie Y., Yu X., Ng N. C., Li K., Fang L. (2018). Exploring the dynamic correlation of landscape composition and habitat fragmentation with surface water quality in the Shenzhen River and the deep bay cross-border watershed, China. *Ecological Indicators*, **90**, 231–246.
50. Xu Q., Wang P., Shu W., Ding M., Zhang H. (2021). Influence of landscape structures on river water quality at multiple spatial scales: A case study of the Yuan River watershed, China. *Ecological Indicators*, **121**, 107226.
51. Xu T., Weng B., Yan D., Wang K., Li X., Bi W., ..., Liu Y. (2019). Wetlands of international importance: Status, threats, and future protection. *Int. J. Environmental Res. and Public Health*, **16**(10), 1818.
52. Zahed M. A., Hadipour M., Mastali G., Esmailzadeh M., Mojiri A. (2022). Simultaneous Ecosystem Benefit and Climate Change Control: A Future Study on Sustainable Development in Iran. *Int. J. Environmental Res.*, **16**(3), 1–12.

Стаття надійшла до редакції 23.02.2023

Після доопрацювання 06.04.2023

Прийнято до друку 07.04.2023

Received 23.02.2023

Revised 06.04.2023

Accepted 07.04.2023

*T. П. Федонюк*¹, д-р сільськогосподарських наук, проф., кер. навчально-наукового центру екології та охорони навколишнього середовища, старш. наук. співроб. лаб. фіз. географії та радіоекології

<https://orcid.org/0000-0002-6504-0893>

E-mail: tanyavasiluk2015@gmail.com

*О. В. Скидан*¹, д-р економ. наук, проф., ректор

<https://orcid.org/0000-0003-4673-9620>

E-mail: skydanolegv@ukr.net

*Т. В. Мельничук*², заст. директора з наук. роботи та міжнар. співпраці

<https://orcid.org/0000-0003-0828-4362>

*А. А. Зимарова*¹, канд. біол. наук, доцент, зав. кафедри екології

<https://orcid.org/0000-0002-6504-0893>

*В. М. Пазич*¹, канд. сільськогосподарських наук, доцент,

заст. кер. навчально-наук. центру екології та охорони навколишнього середовища

<https://orcid.org/0000-0002-1597-2334>

¹ Поліський національний університет

бульвар Старий 7, Житомир, Україна, 10008

² Чорнобильський радіаційно-екологічний біосферний заповідник

вул. Толочина 28, смт. Іванків, Київська обл., Україна, 07201

вул. Преображенська 25, Київ, Україна, 03110

УПРАВЛІННЯ ЛАНДШАФТАМИ БАСЕЙНУ РІЧКИ УЖ НА ОСНОВІ ГІС: СТРАТЕГІЯ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ РІЧКОВОЇ ВОДИ

Наведено результати дослідження якості поверхневих вод басейну р. Уж. Цей регіон надзвичайно важливий, оскільки частина його забруднена радіонуклідами внаслідок аварії на Чорнобильській АЕС. Мета роботи — геоінформаційний аналіз стану та структури ландшафтів басейну р. Уж, визначення параметрів якості поверхневих вод цього регіону та виявлення потенційних кореляційних зв'язків між цими параметрами. Для цього ми здійснили просторовий розділ території басейну на окремі масиви, в кожному з яких визначили методом автоматичного дешифрування співвідношення структурних компонентів ландшафтів, порушення їх ерозійними процесами та зіставили з наземними даними якості поверхневих вод масивів. За сольовим складом всі досліджені масиви мають доброякісні умови. Річка Уж та її притоки за середніми значеннями трюфосапробологічного стану повинні бути віднесені до категорії 4 (слабко забруднені), але екстремальні значення подекуди змістилися до 5 (помірно забруднені). Більшість перерахованих токсичних речовин були наявні в середніх рівнях і здебільшого не перевищували допустимих концентрацій за категорією 4 — слабо забруднені. Екстремальні концентрації досягали категорії 6 (забруднені), що було спричинено в основному антропогенною діяльністю та накопиченням радіоактивних матеріалів. Встановлено, що ступінь ерозійного руйнування ландшафту та ступінь стабілізації ландшафту істотно впливають на значення інтегрального показника якості води. На основі отриманих даних побудовано тривимірну модель, завдяки якій можна здійснювати достовірну оцінку та прогнози змін якості поверхневих вод в залежності від структурних особливостей ландшафтів. Враховуючи, що деякі з цих територій наразі перебувають у зоні радіоактивного забруднення, планування змін структури ландшафтів має бути узгоджене з потенційними ризиками погіршення якості поверхневих вод, і запропонована у статті модель матиме важливе прикладне значення для вирішення цієї задачі.

Ключові слова: стабільність ландшафту, якість води, просторовий аналіз, радіоактивне забруднення, трюфосапробологічний стан, ерозія, поверхневі води.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.067>
УДК 551.511.31, 534.015.1

О. Н. КРИШТАЛЬ, пров. наук. співроб., д-р фіз.-мат. наук

<https://orcid.org/0000-0003-1683-677X>

E-mail: alexandr.kryshstal@gmail.com

А. Д. ВОЙЦЕХОВСЬКА, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

<https://orcid.org/0000-0002-4255-3792>

E-mail: voitsekhovska.anna@gmail.com

О. К. ЧЕРЕМНИХ, чл.-кор. НАН України, зав. відділу, д-р фіз.-мат. наук

<https://orcid.org/0000-0001-6789-3382>

E-mail: oleg.cheremnykh@gmail.com

С. О. ЧЕРЕМНИХ, старш. наук. співроб., канд. фіз.-мат. наук

<https://orcid.org/0000-0003-2685-5325>

E-mail: ikdcheremnykh@gmail.com

Інститут космічних досліджень Національної академії наук України та Державного космічного агентства України
просп. Академіка Глушкова 40, к. 4/1, Київ-187, Україна, 03680

ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСПЕРСІЙНОГО РІВНЯННЯ ДЛЯ ШИРОТНИХ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

Акустико-гравітаційні хвилі є прикладом процесів, які значною мірою визначають динаміку земної атмосфери. Пов'язано це з тим, що джерела цих хвиль розташовані по всій висоті атмосфери, — від самого «низу», де діють землетруси, вулканічні викиди, цунамі, торнадо тощо, і до самого «верху», де діють збурення сонячного вітру, магнітні бурі і висипання часток у високих широтах. Відбувається активний обмін енергією між всіма шарами атмосфери Землі і взаємодія хвильових збурень суттєво різних масштабів — від кількох тисяч кілометрів до сотень метрів, та поява і розвинення процесів конвекції і турбулізації в середовищі. Здавалося, що у таких умовах повинні домінувати тільки нелінійні процеси. Значною мірою так воно і є, але разом з тим спостереження вказують на те, що у процесах поширення акустико-гравітаційних хвиль (АГХ) у багатьох випадках визначальними виявляються ефекти, які можуть бути вичерпно описані в рамках лінійного наближення теорії збурень і добре розвиненої теорії коливань. При цьому при створенні моделей процесів виявилось доцільним використовувати достатньо обґрунтовані фізичні наближення, такі як ізотермічність атмосфери, її необмеженість в горизонтальному напрямку і стисливість у вертикальному. Враховуючи реальні масштаби АГХ, ми знехтували кривизною земної поверхні і в будь якій точці поверхні вважали її локально пласкою, та користувалися в розрахунках декартовою системою координат X, Y, Z . Для опису середовища є сенс використовувати бездисипативну гідродинаміку, а в рівноважному стані — рівняння гідростатичної рівноваги і барометричне рівняння. Наведені вище наближення та математичний апарат теорії коливань і теорії диференційних рівнянь дозволяють при дослідженні початкової системи рівнянь, що описують динаміку АГХ, в результаті отримати дисперсійне рівняння у вигляді полінома четвертого степеня відносно куткової частоти обертання ω як функції нормованого хвильового вектора збурення \vec{k} (АГХ). Отримання спектру АГХ як спектру власних коливань атмосфери у вигляді $\omega = \omega(\vec{k})$ і його дослідження можна вважати остаточно розв'язком початкової

Цитування: Кришталь О. Н., Войцеховська А. Д., Черемних О. К., Черемних С. О. Дослідження дисперсійного рівняння для широтних акустико-гравітаційних хвиль. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 4 (143). С. 67—77. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.067>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

проблеми, якщо знехтувати очевидним впливом на спектр АГХ кутової частоти обертання атмосфери Ω , яка неодмінно повинна бути наявною в дисперсійному рівнянні внаслідок впливу сили Коріоліса. Формальним приводом для відсутності у дисперсійному рівнянні (ДР) складових вектора $\vec{\Omega}$ є той факт, що $|\vec{\Omega}|$ мінімум на два порядки величини менша за характерну частоту ω_0 обертання атмосфери, що дорівнює частоті акустичної відсічки. Разом з тим вдосконалення сучасної апаратури атмосферних спостережень висуває підвищені вимоги до точності модельних розв'язків ДР. У цьому сенсі розв'язок ДР в роботі [Cheremnykh O. K. et al. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2020. 36, № 2. Р. 64–78] можна розглядати як розв'язок «нульового порядку» за малим параметром $\alpha = |\vec{\Omega}|/\omega_0$. До того ж за методом отримання цей розв'язок є наближенням. За означенням точнішим є розв'язок, що його отримано з врахуванням доданків з $\alpha \neq 0$ у модифікованому ДР, в роботі [Cheremnykh O. K. et al. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*, 2022. 38, № 3. Р. 121–131]. Але і він є наближенням.

В даній роботі детально досліджується дисперсійне рівняння для широтних АГХ. Необхідність такого розгляду є наслідком структури цього рівняння, а саме наявності в ньому лінійного доданку, пропорційного частоті. Попередній аналіз показав, що наявні математичні методи не дають однозначного розв'язку цього рівняння. Це наводить на думку про дослідження можливих розв'язків рівняння щодо їхнього збігу з отриманими раніше для деяких часткових випадків. Таке дослідження дозволяє нам відібрати правильне рішення. Показано, що метод Ейлера — Лагранжа дозволяє за певних додаткових умов отримати точний розв'язок модифікованого рівняння для АГХ у замкненому аналітичному вигляді.

Ключові слова: акустико-гравітаційні хвилі, атмосфера Землі, метод Ейлера — Лагранжа, дисперсійне рівняння.

ВСТУП

Акустико-гравітаційні хвилі (АГХ) є унікальним природним явищем в атмосферах Сонця, Землі та інших планет, яке значною мірою визначає динаміку атмосфер цих космічних об'єктів [12, 19, 21]. Джерелами АГХ в земній атмосфері є землетруси, вулканічні викиди, торнадо, грози, сонячні затемнення, рухи сонячного термінатора, висипання заряджених часток та дисипація струмів у полярних областях, магнітосферні бурі, суббурі, потужні наземні вибухи та запуски ракет [6, 17]. Результати численних теоретичних та експериментальних досліджень показали, що АГХ дають значний внесок у динаміку та енергетику атмосфери Землі, забезпечуючи ефективну взаємодію між різними висотними рівнями [4, 15]. Значну роль ці хвилі відіграють у формуванні атмосферної конвекції та турбулентності. Вони також суттєво впливають на формування погодних систем та інші атмосферні процеси [20]. У теперішній час для дослідження АГХ удосконалюються наземні та супутникові методи спостереження атмосфери Землі та Сонця, ускладнюються теоретичні моделі, покращуються програми чисельних розрахунків, ставляться завдання врахування нелінійних ефектів. Незважаючи на те що останнім часом були відкриті і досліджені дуже цікаві ефекти, пов'язані з нелінійністю АГХ [23, 25, 27, 28], ще й досі залишаються нерозв'язаними і актуальними проблеми АГХ, які можна описати в рамках ліній-

ного наближення теорії збурень і за допомогою добре відомої теорії коливальних [11, 16, 30, 31]. До того ж для їхнього розв'язування, як показують дані спостережень [18], можуть бути використані змістовні фізичні наближення, як от: локальна однорідність атмосфери у певному напрямку, нехтування впливом магнітного поля, відносно проста початкова система рівнянь гідродинаміки тощо. На відміну від хвиль, що поширюються в іоносфері та магнітосфері, існування яких суттєво залежить від стану навколосемної плазми [14], геометрії магнітного поля Землі [10] та зовнішніх космічних джерел збурення, АГХ реалізуються в слабоіонізованому середовищі, і при їхньому розгляді можна знехтувати впливом заряджених частинок та магнітного поля. Все це дозволяє використовувати у процесі розв'язування формалізм дисперсійного рівняння і отримати дисперсійні співвідношення для АГХ у вигляді $\omega = \omega(k)$, де ω — кутова частота лінійного збурення середовища (тобто АГХ), а \vec{k} — хвильовий вектор АГХ.

У недавніх роботах [9, 13] було розглянуто вплив обертання атмосфери Землі на спектр акустико-гравітаційних хвиль. У багатьох роботах з дослідження хвильових збурень у атмосфері Землі, що обертається, використовують так зване «традиційне» наближення [7]. У рамках цього наближення враховується лише вертикальний компонент параметра Коріоліса $2\Omega \sin \phi$, де Ω — кутова частота обертання атмосфери, а ϕ —

широта місця поширення хвилі. Такий розгляд зазвичай обґрунтовують тим [13, 22, 35], що для високоширотних областей атмосфери ($\phi \approx \pi/2$), можна не враховувати горизонтальний компонент параметра Коріоліса $2\Omega \cos\phi$. У роботі [9] було запропоновано новий математичний підхід, що дозволяє вивчити вплив як горизонтального, так і вертикального компонента частоти обертання Землі на спектр акустико-гравітаційних хвиль. Зокрема в роботі [9] було показано, що є два випадки реалізації АГХ з урахуванням обертання атмосфери. У першому випадку хвилі поширюються вздовж широти, тоді як у другому — вздовж довготи. У роботі [9] основна увага приділялася хвилям, що поширюються по довготі. У цій роботі ми проаналізуємо хвилі, що поширюються по широті і порівняємо наші результати з результатами роботи [9]. Зазначимо, що нас цікавитиме насамперед поведінка хвильових збурень на різних широтах поблизу частот порядку Ω , де, як ми очікуємо, відбуватиметься помітна деформація спектра хвиль, що розглядаються. Акустико-гравітаційні хвилі з частотами порядку частоти обертання Землі лежать у тому ж частотному діапазоні, як і добре відомі хвилі Россбі [26]. Останні відіграють важливу роль у динаміці атмосфери та океану Землі [16, 27]. Тому дослідження акустико-гравітаційних хвиль із частотами порядку частоти обертання Землі є актуальним геофізичним напрямком.

ДИСПЕРСІЙНЕ РІВНЯННЯ ДЛЯ ШИРОТНИХ АКУСТИКО-ГРАВІТАЦІЙНИХ ХВИЛЬ

Як і в роботах [9, 13], ми розглядатимемо вільні акустичні і гравітаційні хвилі в атмосфері з довжинами хвиль, набагато меншими від радіуса Землі. Тому кривизною атмосфери Землі можна знехтувати і, як у роботах [13, 23], розглянути акустико-гравітаційні хвилі на площині, що стикається зі сферичним газовим шаром в деякій точці A . На цій площині зручно ввести декартову систему координат (x, y, z) таким чином, щоб вісь z була спрямована назовні до площини, так що $\vec{g} = -g\vec{e}_z$, вісь x спрямована із заходу на схід, а вісь y — з півдня на північ. Якщо географічна широта точки A дорівнює ϕ , то $\Omega_x = 0$, $\Omega_y = \Omega \cos\phi$, $\Omega_z = \Omega \sin\phi$, так що

$\vec{\Omega} = \Omega_y \vec{e}_y + \Omega_z \vec{e}_z$. Тут g — прискорення вільного падіння.

Крім того, ми обмежимося розглядом збурень в ізотермічній атмосфері (термосфері), яка в незбуреному стані передбачається статично рівноважною ($\vec{v} = 0$). У такій атмосфері рівноважні щільність та тиск задовольняють умови гідростатичної рівноваги та барометричної стратифікації:

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g, \quad \frac{p(z)}{p(0)} = \frac{\rho(z)}{\rho(0)} = e^{-z/H}, \quad (1)$$

$$H = \frac{C_s^2}{\gamma g},$$

де H — приведена висота атмосфери, γ — показник адиабати, p і ρ — тиск та щільність газового середовища, g — прискорення вільного падіння, C_s — швидкість звуку.

Після лінеаризації рівнянь динаміки ідеального газу з урахуванням (1), що перебуває у полі тяжіння [5, 24, 29], щодо стану рівноваги, диференціювання отриманих рівнянь по часу і виключення збурених щільності і тиску, отримуємо систему рівнянь малих коливань, у якій із збурених величин залишаються лише швидкості:

$$\rho \frac{\partial^2 v_x}{\partial t^2} + 2\rho\Omega_y \frac{\partial v_z}{\partial t} - 2\rho\Omega_z \frac{\partial v_y}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}(\rho C_s^2 \operatorname{div} \vec{v}) - \rho g \frac{\partial v_z}{\partial x},$$

$$\rho \frac{\partial^2 v_y}{\partial t^2} + 2\rho\Omega_z \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y}(\rho C_s^2 \operatorname{div} \vec{v}) - \rho g \frac{\partial v_z}{\partial y}, \quad (2)$$

$$\rho \frac{\partial^2 v_z}{\partial t^2} - 2\rho\Omega_y \frac{\partial v_x}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z}(\rho C_s^2 \operatorname{div} \vec{v}) + \rho g \operatorname{div}_{\perp} \vec{v}.$$

Тут \vec{v} — збурена швидкість. Інші позначення такі:

$$\nabla_{\perp} = \vec{e}_x \frac{\partial}{\partial x} + \vec{e}_y \frac{\partial}{\partial y},$$

$$\nabla = \nabla_{\perp} + \vec{e}_z \frac{\partial}{\partial z},$$

$$\operatorname{div}_{\perp} \vec{v} = \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y},$$

$$\operatorname{div} \vec{v} = \operatorname{div}_{\perp} \vec{v} + \frac{\partial v_z}{\partial z}.$$

Нас цікавлять АГХ, що поширюються вздовж широти ($\partial/\partial y=0$). Для аналізу таких хвиль, згідно із [19], збурені швидкості візьмемо у вигляді

$$v_{x,y,z} \sim \exp\left(\frac{z}{2H} - ik_x x - ik_z z\right). \quad (3)$$

Рівняння малих коливань в такому випадку дають дисперсійне рівняння

$$\begin{aligned} & k_z^2 C_s^2 (\omega^2 - 4\Omega_z^2) = \\ & = \omega^4 - \omega^2 \left[4(\Omega_y^2 + \Omega_z^2) + C_s^2 \left(k_x^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \right] + \\ & + \omega k_x g \Omega_y (4 - 2\gamma) + k_x^2 g^2 (\gamma - 1) + \frac{\Omega_z^2 C_s^2}{H^2}. \quad (4) \end{aligned}$$

Видно, що частоти власних хвильових збурень ω неперервно змінюються при неперервній зміні хвильового вектора k_z . Тому граничні частоти визначаються умовами $k_z^2 = 0$ і $k_z^2 \rightarrow \infty$. Перша умова визначає граничні частоти ω_1 , ω_2 , які є розв'язком рівняння

$$\begin{aligned} & \omega^4 - \omega^2 \left[4(\Omega_y^2 + \Omega_z^2) + C_s^2 \left(k_x^2 + \frac{1}{4H^2} \right) \right] + \\ & + \omega k_x g \Omega_y (4 - 2\gamma) + k_x^2 g^2 (\gamma - 1) + \frac{\Omega_z^2 C_s^2}{H^2} = 0. \quad (5) \end{aligned}$$

Друга умова дає граничні частоти

$$\omega^2 \rightarrow 4\Omega_z^2 + 0, \quad \omega^2 \rightarrow k_z^2 C_s^2. \quad (6)$$

Таким чином, ми маємо дві області частот широтних АГХ, що лежать в інтервалах

$$\begin{aligned} & \omega_1^2 \leq \omega^2 < k_z^2 C_s^2, \\ & 4\Omega_z^2 \leq \omega^2 < \omega_2^2. \quad (7) \end{aligned}$$

Для знаходження ω_1^2 і ω_2^2 приведемо рівняння (5) до безрозмірного вигляду, враховуючи, що кутова частота обертання атмосфери Ω набагато менша (приблизно на два порядки), ніж характерна частота, якою є частота акустичної відсічки $\omega_a = C_s/2H = \gamma g/2C_s$.

Розділимо (5) на ω_a^4 і запишемо отримане рівняння у вигляді

$$\begin{aligned} & \hat{\omega}^4 - \hat{\omega}^2 [4(\hat{\Omega}_y^2 + \hat{\Omega}_z^2) + 1 + 4\hat{k}_x^2] + \\ & + 16\hat{\omega}\hat{k}_x\hat{\Omega}_y(1 - \gamma/2)/\gamma + 16\hat{k}_x^2(\gamma - 1)/\gamma^2 + 4\hat{\Omega}_z^2 = 0, \quad (8) \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} & \hat{k}_x = \kappa_x H, \quad \hat{k}_z = \kappa_z H, \quad \hat{\omega} = \omega/\omega_a, \\ & \hat{\Omega}_y = \Omega_y/\omega_a, \quad \hat{\Omega}_z = \Omega_z/\omega_a. \end{aligned}$$

Для введених безрозмірних частот $\hat{\Omega}_y$, $\hat{\Omega}_z$ справедливі нерівності $\hat{\Omega}_y$, $\hat{\Omega}_z \ll 1$.

Рівняння (8) є вихідним для подальшого аналізу. Ефективним методом знаходження рішень цього рівняння є метод Ейлера — Лагранжа. Однак до використання цього методу доцільно отримати деякі оцінки для частот, використовуючи малість величин $\hat{\Omega}_y$, $\hat{\Omega}_z$.

МЕТОД ЕЙЛЕРА — ЛАГРАНЖА

Для отримання розв'язку рівняння (4) в аналітичній формі в даній роботі був використаний метод Ейлера — Лагранжа [1]. Відповідно до цього методу із рівняння, яке в загальному вигляді можна записати у формі

$$\hat{\omega}^4 + p\hat{\omega}^2 + q\hat{\omega} + r = 0, \quad (9)$$

можна отримати так зване «резольвентне» рівняння, корені якого дозволяють отримати корені рівняння (5):

$$z^3 + 2pz^2 + (p^2 - 4r)z + q^2 = 0, \quad (10)$$

[1, 3]. Вирази для коефіцієнтів у рівнянні (9) можна взяти безпосередньо із рівнянь (4) і (8). Для рівняння (9) є також альтернативна форма резольвентного рівняння, алгоритм отримання якого повністю аналогічний алгоритму отримання рівняння (10) (див. [2]):

$$z^3 + \frac{p}{2}z^2 + \frac{(p^2 - 4r)}{16}z + \frac{q^2}{64} = 0. \quad (11)$$

Неважко перевірити, що рівняння (11) з точністю до числового множника збігається з рівнянням (10). Далі наведемо алгоритм побудови резольвентного рівняння (10), виходячи з рівняння

$$y^4 + cy^2 + dy + e = 0. \quad (12)$$

Введемо позначення

$$p = -\frac{3}{8}b^2 + c = c,$$

$$q = -\frac{b}{8}(b^2 - 4c)^2 + d,$$

$$r = -\frac{3}{256}b^4 + \frac{b}{18}(bc - 4d) + 2.$$

Якщо $c < 0$, то рівняння (12) можна записати у вигляді

$$y^4 - py^2 + qy + r = 0. \quad (13)$$

Рівняння (13) можна переписати у вигляді добутку двох квадратних тричленів

$$(y^2 + p_1y + q_1)(y^2 + p_2y + q_2) = 0.$$

Після їхнього перемноження прирівняємо коефіцієнти при однакових степенях y . У результаті отримуємо систему рівнянь:

$$\begin{aligned} p_1 + p_2 &= 0, \\ q_1 + q_2 + p_1p_2 &= p, \\ p_1q_2 + p_2q_1 &= q, \\ q_1q_2 &= r. \end{aligned} \quad (14)$$

Звідси отримуємо

$$p = p_1 = -p_2.$$

Із другого і четвертого рівнянь (14) отримуємо для q_1, q_2 квадратне рівняння

$$q_{1,2}^2 - (p + p_1^2)q_{1,2} + r = 0.$$

Використовуючи третє рівняння із системи (14), отримуємо

$$p_1^2[(p_1^2 + p)^2 - 4r] = q^2.$$

Введемо позначення $z = -p_1^2$ і отримаємо кубічне рівняння відносно z , яке і буде шуканим резольвентним рівнянням:

$$z^3 - 2pz^2 + (p^2 - 4r)z + q^2 = 0. \quad (15)$$

Безпосередньо із рівняння (15) можна отримати вирази для всіх чотирьох коренів рівняння (13) за допомогою метода Декарта — Ейлера [1], а саме:

$$\begin{aligned} y_1 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3}), \\ y_2 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}), \\ y_3 &= \frac{1}{2}(-\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}), \\ y_4 &= \frac{1}{2}(-\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3}). \end{aligned} \quad (16)$$

Співвідношення (16) можна легко отримати, використовуючи раніше введені позначення і теорему Вієта. Якщо вважати, що всі три корені (15) відомі, то можна одразу записати просту

систему рівнянь:

$$(y_1 + y_4)^2 = -z_1,$$

$$(y_2 + y_4)^2 = -z_2,$$

$$(y_2 + y_3)^2 = -z_3,$$

$$y_1 + y_2 + y_3 + y_4 = 0,$$

яка розв'язується підстановкою і застосуванням теореми Вієта для коефіцієнта q (див. [3]):

$$y_1y_2y_3 + y_1y_2y_4 + y_1y_3y_4 + y_2y_3y_4 = -q.$$

Але треба враховувати, що отримання точного розв'язку рівняння резольвенти (15) в компактному аналітичному вигляді потребує додаткових перетворень і необхідних спрощень.

Надалі в тексті рівняння (10) будемо позначати як РРІ, а рівняння (11) — РРІІ. Саме через корені РРІ або РРІІ виражаються корені початкового рівняння (9) за правилом

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3}), \\ \omega_2 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}), \\ \omega_3 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_2} - \sqrt{z_1} - \sqrt{z_3}), \\ \omega_4 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_3} - \sqrt{z_1} - \sqrt{z_2}). \end{aligned} \quad (17)$$

Із початкового рівняння (8) видно, що лінійний за частотою $\hat{\omega}$ член на декілька порядків менший за інші. Звідси очевидний можливий спосіб розв'язку цього рівняння. Він відповідає випадку $\hat{k}_x \rightarrow 0$ і відповідно $q \rightarrow 0$. З фізичної точки зору це можна назвати довгохвильовим наближенням АГХ-збурень. У цьому випадку розв'язок рівняння (8) можна отримати безпосередньо із РР. Це ж стосується і випадку $\hat{k}_x^2 \gg \hat{\Omega}^2$ (при тому, що $\hat{k}_x^2 \ll 1$, і $\hat{\Omega}^2 \ll 1$). Високий ступінь малості лінійного члена q в (9) дає можливість використовувати наближення $q \rightarrow 0$ у випадку $\hat{k}_x^2 \gg \hat{\Omega}^2$ та дозволяє тим не менше отримати фізично розумні розв'язки дисперсійного рівняння, які будуть підтверджені результатами робіт [9, 13]. РРІ або РРІІ за допомогою заміни змінних

$$x = z + \frac{2}{3}p \quad \text{або} \quad x = z + \frac{2}{6}p \quad (18)$$

з врахуванням

$$\frac{C_s^2}{4H^2} \gg \Omega_x^2, \Omega_y^2, \quad (19)$$

$$1 < \gamma < 2, \quad k_z > 0, \quad \frac{C_s^2}{\gamma g} = H$$

зводиться до «неповного» кубічного рівняння

$$x^3 + Rx + Q = 0, \quad (20)$$

де використані позначення

$$R = -\frac{p^2}{3} - 4r, \quad (21)$$

$$Q = -q^2 - \frac{2}{3}p\left(\frac{p^2}{9} - 4r\right).$$

Три корені кубічного рівняння (20) мають вигляд

$$x_m = 2\sqrt{-\frac{R}{3}} \cos\left(\frac{\phi + 2\pi m}{3}\right), \quad m = 1, 2, 3. \quad (22)$$

При цьому мінімальний кут $\phi_{(\min)}$ задовольняє рівняння

$$\cos \phi_{(\min)} = -\frac{Q}{2} \sqrt{-\left(\frac{3}{R}\right)^3}. \quad (23)$$

Корені рівняння РР можна отримати за допомогою заміни змінних, оберненої до заміни (18), а корені початкового дисперсійного рівняння (5) обчислюються за правилом (17). Далі ми розглянемо два граничних випадки: короткохвильове та довгохвильове збурення. Для цих випадків відомі апробовані рішення, з якими ми порівняємо наші результати.

У двох вищезгаданих граничних випадках $Z_0 \equiv k_x H \ll 1$ і $Z_0 \gg 1$ використаний метод Ейлера — Лагранжа дозволяє отримати розв'язки дисперсійного рівняння в найбільш компактній аналітичній формі. Оскільки компоненти вектора $\vec{\Omega}$ в середньому на два порядки менші за частоту акустичної відсічки

$$\omega_a = \frac{1}{2}\omega_0, \quad \text{де } \omega_0 = \sqrt{\frac{g\gamma}{H}},$$

то в розрахунках вважалось, що

$$\Omega_y, \Omega_z = \alpha\omega_a, \quad (24)$$

де $\alpha = 10^{-2}$, як в випадку $Z_0 = 10^{-2} \ll 1$, так і в випадку $Z_0 = 100 \gg 1$.

КОРОТКОХВИЛЬОВЕ НАБЛИЖЕННЯ ($k_x H \gg 1$)

Розглянемо розв'язок рівняння (10) і (11) в короткохвильовому наближенні. При

$$Z_0 = k_x H = 10^2 \text{ і } 10^{-3} \leq \alpha \leq 10^{-2}, \quad 1 \leq \gamma \leq 2$$

коефіцієнти рівняння РРІ і РРІІ мають однаковий вигляд, а саме

$$p = -\omega_0^2 Z_0^2 \left(1 + 2\frac{\alpha^2}{Z_0^2}\right),$$

$$q^2 = 4\omega_0^6 Z_0^2 \left(\frac{2}{\gamma} - 1\right)^2 \alpha^2, \quad (25)$$

$$r = \omega_0^4 \left[\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} Z_0^2 + \frac{\alpha^2}{4}\right].$$

У способі розв'язку, що ми його розглядаємо, $q \rightarrow 0$. І РРІ виглядає таким чином:

$$z^3 + 2pz^2 + (p^2 - 4r)z + q_{\rightarrow 0}^2 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow z^3 + 2pz^2 + (p^2 - 4r)z = 0. \quad (26)$$

Очевидно, що перший корінь $z_1 = 0$, а два інших корені визначаються із квадратного рівняння і дорівнюють

$$z_{2,3} = -p \pm \sqrt{p^2 - p^2 + 4r} = -p \pm 2\sqrt{r}. \quad (27)$$

Корінь z_2 має вигляд з точністю до вищого порядку малості, тобто до $O(10^{-8})$ і вище:

$$z_2 = -p + 2\sqrt{r} = \omega_0^2 Z_0^2 \left(1 + 2\frac{\alpha^2}{Z_0^2}\right) +$$

$$+ 2\omega_0^2 Z_0^2 \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{1}{Z_0^2} + \frac{\alpha^2}{4Z_0^4}} \approx \omega_0^2 Z_0^2 \left[1 + 2\sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{1}{Z_0}}\right],$$

звідси випливає

$$\sqrt{z_2} = \omega_0 Z_0 \sqrt{1 + 2\sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{1}{Z_0}}} \approx$$

$$\approx \omega_0 Z_0 \left[1 + \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma^2} \frac{1}{Z_0}}\right] =$$

$$= \omega_0 Z_0 + \omega_0 \sqrt{\frac{\gamma - 1}{\gamma^2}} =$$

$$= k_x C_s + \sqrt{\frac{g(\gamma - 1)}{\gamma H}} = k_x C_s + \omega_{БВ}.$$

Тут

$$\omega_{BB} = \sqrt{\frac{g(\gamma-1)}{\gamma H}}$$

— частота Брента — Вайсяля.

Аналогічно для кореня z_3 отримуємо

$$\sqrt{z_3} = k_x C_s - \omega_{BB}$$

Тоді

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} + \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 + k_x C_s + \omega_{BB} + k_x C_s - \omega_{BB}) = k_x C_s, \\ \omega_2 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 - k_x C_s - \omega_{BB} - k_x C_s + \omega_{BB}) = -k_x C_s, \quad (28) \\ \omega_3 &= \frac{1}{2}(-\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 + k_x C_s + \omega_{BB} - k_x C_s + \omega_{BB}) = \omega_{BB}, \\ \omega_4 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 + k_x C_s - \omega_{BB} - k_x C_s - \omega_{BB}) = -\omega_{BB}. \end{aligned}$$

ДОВГОХВИЛЬОВЕ НАБЛИЖЕННЯ ($k_x H \ll 1$)

В даному розділі ми розглянемо довгохвильові широтні акустико-гравітаційні хвилі. Поклавши $10^{-3} \leq Z_0 \leq 5 \cdot 10^{-3}$ і $10^{-3} \leq \alpha \leq 10^{-2}$, а $\gamma = 5/3$, отримаємо, що коефіцієнти рівнянь РРІ і РРІІ мають однаковий вигляд, а саме

$$\begin{aligned} p &= -\omega_0^2 \left(\frac{1}{4} + 8\alpha^2 \right), \\ q^2 &= 4\omega_0^6 Z_0^2 \left(\frac{2}{\gamma} - 1 \right)^2 \alpha^2, \quad (29) \\ r &= \omega_0^4 \left[\frac{\gamma-1}{\gamma^2} Z_0^2 + \alpha^2 \right]. \end{aligned}$$

У тих же самих раніше використаних наближеннях для коренів РРІ маємо

$$z_1 = 0 \text{ і } z_{2,3} = -p \pm 2\sqrt{r},$$

де p і r описуються формулами (29).

Нехай

$$\begin{aligned} z_2 &= -p + 2\sqrt{r} = \\ &= \frac{\omega_0^2}{4}(1 + 32\alpha^2) + 2\sqrt{\omega_0^4 \left(\frac{\gamma-1}{\gamma^2} Z_0^2 + \alpha^2 \right)}. \end{aligned}$$

Враховуючи те, що $(Z_0)_{\max} = 5 \cdot 10^{-3}$, а

$$\frac{\gamma-1}{\gamma^2} = 0.24$$

для $\gamma = 5/3$ і при тому, що $(\alpha^2)_{\max} = 10^{-4}$, можна вважати, що

$$\alpha^2 \gg \frac{\gamma-1}{\gamma^2} Z_0^2.$$

У такому випадку

$$\begin{aligned} z_2 &\cong \omega_a^2(1 + 32\alpha^2) + 8\alpha\omega_a^2 = \\ &= \omega_a^2(1 + 8\alpha + 32\alpha^2) \approx \omega_a^2(1 + 8\alpha), \end{aligned}$$

якщо виконується умова $8\alpha \gg 32\alpha^2$, або $4\alpha \ll 1$. При $\alpha = 10^{-2}$ ця умова виконується з хорошою точністю. Отже,

$$\sqrt{z_2} = \omega_a \sqrt{1 + 8\alpha} \approx \omega_a(1 + 4\alpha).$$

Аналогічно

$$\sqrt{z_3} \cong \omega_a(1 - 4\alpha).$$

Тоді для коренів початкового дисперсійного рівняння з (10) отримуємо:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_3} + \sqrt{z_2} + \sqrt{z_1}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 + \omega_a + 4\omega_a\alpha + \omega_a - 4\omega_a\alpha) = +\omega_a, \\ \omega_2 &= \frac{1}{2}(\sqrt{z_1} - \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 - \omega_a - 4\omega_a\alpha - \omega_a + 4\omega_a\alpha) = -\omega_a, \\ \omega_3 &= \frac{1}{2}(-\sqrt{z_1} + \sqrt{z_2} - \sqrt{z_3}) = \\ &= \frac{1}{2}(0 + \omega_a + 4\omega_a\alpha - \omega_a + 4\omega_a\alpha) = \\ &= 4\omega_a\alpha = 4\omega_a \frac{\Omega_z}{\omega_0} = +2\Omega_z, \\ \omega_4 &= \frac{1}{2}(0 + \omega_a - 4\omega_a\alpha - \omega_a - 4\omega_a\alpha) = \\ &= -4\omega_a \frac{\Omega_z}{\omega_0} = -2\Omega_z. \end{aligned}$$

Таким чином, РР (10) дає точні результати для $k_x H \ll 1$ та $k_x H \gg 1$, а тому може бути використано для подальшого аналізу розглянутих хвиль.

Аналіз результатів розповсюдження АГХ уздовж широти і уздовж довготи показав, що в обох випадках виходить майже однаковий результат.

ВИСНОВКИ

В даній роботі ми зосередили свою увагу на вивченні впливу горизонтального і вертикального компонентів частоти обертання Землі на спектр акустико-гравітаційних хвиль, що поширюються по широті.

Встановлено, що коректний розв'язок дає резольвентне рівняння (10), яке в граничних випадках $k_x H \ll 1$ і $k_x H \gg 1$ збігається з раніше отриманими результатами робіт [9, 13].

Знайдено, що власні частоти розглянутих хвиль визначаються рівняннями (10), (18), (22) і (23).

Показано, що мінімальні частоти широтних акустико-гравітаційних хвиль у атмосфері, що обертається, обмежені знизу частотою $2\Omega \sin \phi$, де Ω — кутова частота обертання атмосфери, а ϕ — широта місця, що відповідає вертикальному компоненту параметра Коріоліса. Максимальні частоти розглянутих хвиль несуттєво модифікуються обертанням атмосфери. Встановлено, що горизонтальний компонент параметра Коріоліса $2\Omega \cos \phi$ призводить до малої модифікації граничних частот широтних акустико-гравітаційних хвиль. Цей результат повністю відповідають результатам роботи [9].

Раніше в роботі [13] було показано, що під нижньою межею гравітаційних хвиль та між областями акустичних та гравітаційних хвиль розташовані неперервні спектри еванесцентних хвиль. З проведеного розгляду випливає, що область еванесцентних хвиль, що лежить нижче під гравітаційною областю, відсутня на екваторі, із зростанням широти збільшується і досягає максимального значення на полюсі.

Ми проаналізували поширення акустико-гравітаційних хвиль уздовж широти і показали, що рівняння малих коливань у цьому випадку відрізняється від рівняння малих коливань для довготних акустико-гравітаційних хвиль. Було встановлено, що, незважаючи на деякі розбіжності, обидва рівняння для значень частоти обертання Землі, близьких до реальних, призводять до однакових кінцевих результатів. Цей результат свідчить про те, що поширення акустико-гравітаційних хвиль в атмосфері з врахуванням обертання Землі в горизонтальній площині можна вважати квазіізотропним, що узгоджується з наведеним вище висновком про необхідність урахування тільки вертикального компонента параметра Коріоліса.

Роботу виконано при фінансовій підтримці Національного фонду досліджень України, проєкт 2020.02/0015 «Теоретичні і експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера» і гранта № 97742 of the Volkswagen Foundation («VW-Stifting»).

ЛІТЕРАТУРА

1. Ван-дер-Варден Б. Л. *Алгебра*. М.: Мир, 1930. 48 с.
2. Корн Г., Корн Т. *Справочник по математике для научных работников и инженеров: определения, теоремы, формулы*. М.: Наука, 1968. 720 с.
3. Мишина А. П., Проскураков И. В. *Высшая алгебра*. М.: ГИФМЛ, Сер.: Справочная математическая библиотека, 1962. 300 с.
4. Alexander M. J., Pfister L. Gravity wave momentum flux in the stratosphere over convection. *Geophys. Res. Lett.* 1995. **22**. P. 2029.
5. Batchelor G. K. *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2000. 615 p.
6. Beer T. *Atmospheric Waves*. New York: John Wiley, 1974. 300 p.
7. Brekhovskikh L. M., Goncharov V. V. *Introductions are the mechanics of continuous media*. Moscow: Nauka, 1982. 335 p.
8. Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I., Fedorenko A. K., Cheremnykh S. O. Two-frequency propagation mode of acoustic-gravity waves in the Earth's atmosphere. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2020. **36**, № 2. P. 64—78.

9. Cheremnykh O. K., Cheremnykh S. O., Vlasov D. I. Influence of the Earth's atmosphere rotation on the spectrum of acoustic-gravity waves. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies*. 2022. **38**, № 3. P. 121—131.
10. Cheremnykh O. K. Transversally small-scale perturbations in arbitrary plasma configurations with magnetic surfaces. *Plasma Phys. and Controlled Fusion*. 2010. **52**, № 9. P. 095006.
11. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Selivanov Y. A. Evanescent acoustic-gravity modes in the isothermal atmosphere: systematization and applications to the Earth and solar atmospheres. *Ann. Geophys.* 2019. **37**. P. 401—415.
12. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Selivanov Y. A., Cheremnykh S. O. Continuous spectrum of evanescent acoustic-gravity waves in an isothermal atmosphere. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2021. **503**, № 4. P. 5545—5553. DOI:10.1093/mnras/st.ab845.
13. Cheremnykh O., Kaladze T., Selivanov Y., Cheremnykh S. Evanescent acoustic-gravity waves in a rotating stratified atmosphere. *Adv. Space Res.* 2022. **69**, № 3. P. 1272—1280.
14. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. Influence of ionospheric conductivity on the ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth. *Adv. Space Res.* 2006. **37**, № 3. P. 599—603.
15. Ebel A. Contributions of gravity waves to the momentum, heat and turbulent energy budget of the upper mesosphere and lower thermosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 1984. **46**. P. 727—737.
16. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 2018. **178**. P. 17—23.
17. Francis S. H. Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. and Terrestrial Phys.* 1975. **37**. P. 1011—1054.
18. Gossard E. E., Hooke W. H. *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 1975. 456 p.
19. Hines C. O. Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.* 1960. **38**. P. 1441—1481.
20. Hooke W. H. Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 1968. **30**, № 5. P. 795—823.
21. Jones W. L. Non-divergent oscillations in the Solar Atmosphere. *Solar Phys.* 1969. **7**. P. 204—209.
22. Kaladze T. D., Pokhotelov O. A., Shan H. A., Shan M. I., Stenflo L. Acoustic-gravity waves in the Earth ionosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.* 2008. **70**. P. 1607—1616.
23. Longuet-Higgins M. S. Planetary waves on a rotating sphere. P. 1. *Proc. Roy. Soc. A*. 1964. **279**. P. 446—473.
24. McWilliams J. C. *Fundamentals of Geophysical Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2011. 272 p.
25. Pokhotelov O. A., Kaladze T. D., Shukla P. K., Stenflo L. Three-dimensional solitary vortex structures in the upper atmosphere. *Phys. Scripta*. 2001. **64**. P. 245—252.
26. Rossby C.-G. Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.* 1940. **66**. P. 68—87.
27. Simkhada D. B., Snively J. B., Taylor M. J., Franke S. J. Analysis and modeling of ducted and evanescent gravity waves observed in the Hawaiian airglow. *Ann. Geophys.* 2009. **27**. P. 3213—3224.
28. Stenflo L., Shukla P. K. Nonlinear acoustic gravity wave. *J. Plasma Phys.* 2009. **75**. P. 841—847. doi.org/10.1017/S0022377809007892.
29. Tolstoy I. *Wave propagation*. N. Y.: Mc. Grow — Hill, 1973. 468 p.
30. Vadas S. L., Fritts D. C. Thermosphere responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.* 2005. **110** D. 15103. doi: 10.1029/2004JD005574.
31. Waltercheid R. L., Hecht J. H. A reexamination of evanescent acoustic-gravity waves: Special properties and aeronomical significance. *J. Geophys. Res.* 2003. **108**(D11). P. 4340. doi:10.1029/2002JD002421.

REFERENCES

1. Van-der-Varden B. L. (1930). *Algebra*. Moscow: Mir, 48 p. [in Russian].
2. Korn G., Korn T. (1968). *Spravochnik po matematike dlya nauchnyh rabotnikov i injenerov: opredeleniya, teoremy, formuly*. Moscow: Nauka, 720 p. [in Russian].
3. Mishina A. P., Proskuryakov I. V. (1962). *Vyshshaya algebra*. Seria: Spravochnaya matematicheskaya biblioteka. M.: GIFML, 300 p. [in Russian].
4. Alexander M. J., Pfister L. (1995). Gravity wave momentum flux in the stratosphere over convection. *Geophys. Res. Lett.*, **22**, 2029.
5. Batchelor G. K. (2000). *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 615 p.
6. Beer T. (1974). *Atmospheric Waves*. New York: John Wiley, 300 p.
7. Brekhovskikh L. M., Goncharov V. V. (1982). *Introductions are the mechanics of continuous media*. Moscow: Nauka, 335 p.
8. Cheremnykh O. K., Kryuchkov E. I., Fedorenko A. K., Cheremnykh S. O. (2020). Two-Frequency Propagation Mode of Acoustic-Gravity Waves in the Earth's Atmosphere. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **36**(2), 64—78.

9. Cheremnykh O. K., Cheremnykh S. O., Vlasov D. I. (2022). Influence of the Earth's atmosphere rotation on the spectrum of acoustic-gravity waves. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, **38**(3), 121–131.
10. Cheremnykh O. K. (2010). Transversally small-scale perturbations in arbitrary plasma configurations with magnetic surfaces. *Plasma Phys. and Controlled Fusion*, **52**(9), 095006.
11. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Selivanov Y. A. (2019). Evanescent acoustic-gravity modes in the isothermal atmosphere: systematization and applications to the Earth and solar atmospheres. *Ann. Geophys.*, **37**, 401–415.
12. Cheremnykh O. K., Fedorenko A. K., Selivanov Y. A., Cheremnykh S. O. (2021). Continuous spectrum of evanescent acoustic-gravity waves in an isothermal atmosphere. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, **503**(4), 5545–5553. doi:10.1093/mnras/st.ab845.
13. Cheremnykh O., Kaladze T., Selivanov Y., Cheremnykh Serhiy. (2022). Evanescent acoustic-gravity waves in a rotating stratified atmosphere. *Adv. Space Res.*, **69** (3), 1272–1280.
14. Cheremnykh O. K., Parnowski A. S. (2006). Influence of ionospheric conductivity on the ballooning modes in the inner magnetosphere of the Earth. *Adv. Space Res.*, **37**(3), 599–603.
15. Ebel A. (1984). Contributions of gravity waves to the momentum, heat and turbulent energy budget of the upper mesosphere and lower thermosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.*, **46**, 727–737.
16. Fedorenko A. K., Kryuchkov E. I., Cheremnykh O. K., Klymenko Yu. O., Yampolski Yu. M. (2018). Peculiarities of acoustic-gravity waves in inhomogeneous flows of the polar thermosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.*, **178**, 17–23.
17. Francis S. H. (1975). Global propagation of atmospheric gravity waves: A review. *J. Atmos. and Terrestrial Phys.*, **37**, 1011–1054.
18. Gossard, E. E., Hooke, W. H. (1975). *Waves in the Atmosphere: Atmospheric Infrasound and Gravity Waves: Their Generation and Propagation*. Elsevier Scientific Publishing Company, 456 p.
19. Hines C. O. (1960). Internal gravity waves at ionospheric heights. *Can. J. Phys.*, **38**, 1441–1481.
20. Hooke W. H. (1968). Ionospheric irregularities produced by internal atmospheric gravity waves. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.*, **30**(5), 795–823.
21. Jones W. L. (1969). Non-divergent oscillations in the Solar Atmosphere. *Solar Phys.*, **7**, 204–209.
22. Kaladze T. D., Pokhotelov O. A., Shan H. A., Shan M. I., Stenflo L. (2008). Acoustic-gravity waves in the Earth ionosphere. *J. Atmos. and Solar-Terrestrial Phys.*, **70**, 1607–1616.
23. Longuet-Higgins M. S. (1964). Planetary waves on a rotating sphere. P. 1. *Proc. Roy. Soc. A.*, **279**, 446–473.
24. McWilliams J. C. (2011). *Fundamentals of Geophysical Fluid Dynamics*. Cambridge: Cambridge University Press, 272 p.
25. Pokhotelov O. A., Kaladze T. D., Shukla P. K., Stenflo L. (2001). Three-dimensional solitary vortex structures in the upper atmosphere. *Phys. Scripta*, **64**, 245–252.
26. Rossby C.-G. (1940). Planetary flow patterns in the atmosphere. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, **66**, 68–87.
27. Simkhada D. B., Snively J. B., Tayler M. J., Franke S. J. (2009). Analysis and modeling of ducted and evanescent gravity waves observed in the Hawaiian airglow. *Ann. Geophys.*, **27**, 3213–3224.
28. Stenflo L., Shukla P. K. (2009). Nonlinear acoustic gravity wave. *J. Plasma Phys.*, **75**, 841–847. doi.org/10.1017/S0022377809007892.
29. Tolstoy I. (1973). *Wave propagation*. New York: Mc. Grow - Hill, 468 p.
30. Vadas S. L., Fritts D. C. (2005). Thermosphere responses to gravity waves: Influences of increasing viscosity and thermal diffusivity. *J. Geophys. Res.*, **110**(D), 15103. doi: 10.1029/2004JD 005574.
31. Waltercheid R. L., Hecht J. H. (2003). A reexamination of evanescent acoustic-gravity waves: Special properties and aeronomical significance. *J. Geophys. Res.*, **108** (D11), 4340. doi:10.1029/2002JD002421.

Стаття надійшла до редакції 07.02.2023

Після доопрацювання 20.04.2023

Прийнято до друку 21.04.2023

Received 07.02.2023

Revised 20.04.2023

Accepted 21.04.2023

O. N. Kryshchal, Leading Researcher, Dr.Sci. in Phys&Math

<https://orcid.org/0000-0003-1683-677X>

E-mail: alexandr.kryshchal@gmail.com

A. D. Voitsekhovska, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

<https://orcid.org/0000-0002-4255-3792>

E-mail: voitsekhovska.anna@gmail.com

O. K. Cheremnykh, Correspondent Member of NAS of Ukraine, Head of Department, Dr.Sci. in Phys&Math

<https://orcid.org/0000-0001-6789-3382>

E-mail: oleg.cheremnykh@gmail.com

S. O. Cheremnykh, Senior Researcher, Ph.D. in Phys&Math

<https://orcid.org/0000-0003-2685-5325>

E-mail: ikdcheremnykh@gmail.com

Space Research Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine

40, Acad. Glushkov Ave., building. 4/1, Kyiv-187, 03680 Ukraine

ABOUT ONE PROPERTY OF THE DISPERSION EQUATION FOR LATITUDINAL ACOUSTIC-GRAVITATIONAL WAVES

Acoustic-gravity waves are an example of processes that largely determine the dynamics of the Earth's atmosphere. This is due to the fact that the sources of these waves are located throughout the height of the atmosphere, from the very "bottom", where earthquakes, volcanic emissions, tsunamis, tornadoes, etc., occur, and to the very "top", where perturbations of the solar wind, magnetic storms, and precipitation of particles in high latitudes are active. All these phenomena lead to the active energy exchange between all layers of the Earth's atmosphere and the interaction of wave disturbances of significantly different scales — from several thousand kilometers to several hundred meters, and this — to the appearance and development of processes of convection and turbulence in the environment. It seems that only nonlinear processes should dominate under such conditions. To a large extent, it is true, but at the same time, observations indicate that in many cases in the process of propagation of acoustic-gravity waves (AGW), the effects can be comprehensively described within the framework of the linear approximation of perturbation theory and well-developed theory of oscillations. At the same time, when creating models of the process, it turned out to be appropriate to use sufficiently justified physical approximations, such as isothermality of the atmosphere, its unlimiteness in the horizontal direction and compressibility in the vertical direction.

Taking into account the real scales of the AGW, it is possible to neglect the curvature of the Earth's surface and consider it locally flat at any point of the surface and use the Cartesian coordinate system X, Y, Z in the calculations. To describe the environment, it makes sense to use non-dissipative hydrodynamics and in an equilibrium state — the hydrostatic equilibrium equation and barometric equation. The above-mentioned approximations and the mathematical apparatus of the theory of oscillations and the theory of differential equations allow when studying the initial system of equations describing the dynamics of AGW, to obtain a dispersion equation in the form of a polynomial of the fourth degree relative to the angular frequency of rotation as a function of the normalized wave vector of disturbance \vec{k} (AGW). AGW spectrum is a spectrum of the atmosphere's own oscillations in the form $\omega = \omega(\vec{k})$, and its obtaining can be considered as the final solution to the initial problem if we ignore the obvious influence on the AGW spectrum of the angular frequency of rotation of the atmosphere Ω , which must necessarily be present in the dispersion equation due to the influence of the Coriolis force. The formal reason for the absence of the components of the vector Ω in the dispersion equation (DE) is the fact that the $|\vec{\Omega}|$ is a minimum of two orders of magnitude smaller than the characteristic rotation frequency of the atmosphere ω_0 , which is equal to the acoustic cutoff frequency. At the same time, the improvement of modern atmospheric observation equipment places increases the requirements for the accuracy of DE model solutions. In this sense, the resolution of DE in the work [Cheremnykh O. K. et al. Kinematics and Phys. Celestial Bodies. 2020. 36, № 2. P. 64—78] can be considered as a "zero-order" solution with a small parameter $\alpha = |\vec{\Omega}|/\omega_0$. In addition, according to the method of obtaining, this solution is approximate. By definition, the solution obtained in the work [Cheremnykh O. K. et al. Kinematics and Phys. Celestial Bodies, 2022. 38, № 3. P. 121—131] by taking into account terms $\alpha \neq 0$ in the modified DE is more accurate. But it is also approximate, although more accurate.

In this work, we study in detail the dispersion equation for latitudinal AGW. The need for such consideration, as will be shown, is a consequence of the structure of this equation, namely the presence of a linear frequency term in it. Preliminary analysis showed that existing mathematical methods do not provide an unambiguous solution to this equation. This suggests the need to study possible solutions of the equation in terms of their coincidence with previously obtained ones for some partial cases. Such research allows us to choose the right decision. In the proposed study, we have shown that the Euler-Lagrange method allows, under certain additional conditions, to obtain an exact solution of the modified equation for AGW in closed analytical form.

Keywords: acoustic-gravity waves, Earth's atmosphere, Euler-Lagrange method, dispersion equation.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.078>
УДК 550.3

Л. Ф. ЧОРНОГОР, зав. кафедри космічної радіофізики, Заслужений проф.,
Заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії УРСР в галузі науки і техніки (1989 р.),
двічі лауреат Премії Ради Міністрів СРСР, д-р фіз.-мат. наук, проф.
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392
E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
площа Свободи 4, Харків, Україна, 61022

ГЛОБАЛЬНІ ВАРІАЦІЇ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ, ВИКЛИКАНІ ВИБУХОМ ВУЛКАНА ТОНГА 15 СІЧНЯ 2022 р.

Вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. призвів до значних збурень у системі Земля (літосфера, Світовий океан) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера. Мета цієї роботи — викладення результатів дослідження глобальних варіацій геомагнітного поля, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. Для аналізу варіацій X-, Y- і Z-компонентів геомагнітного поля використано ресестрації на 12 станціях світової мережі INTERMAGNET. Під час обробки часових рядів спочатку віднімався тренд, обчислений на інтервалі 60 хв з кроком 1 хв, а потім застосовувався системний спектральний аналіз. Аналіз стану космічної погоди дозволив обрати як контрольні дні 13 та 17 січня 2022 р. Аналіз часових варіацій рівня усіх компонентів геомагнітного поля показав таке. У день вибуху вулкана приблизно після 04:21 мали місце суттєві варіації рівня усіх компонентів, проте найбільші варіації спостерігалися у рівні Y-компонента. Найменший час запізнювання становив 6 хв. При цьому квазіперіодичні варіації геомагнітного поля з періодом 4...4.5 хв і амплітудою близько 2 нТл були викликані акустичним резонансом у полі стоячої акустичної хвилі, згенерованої вибухом вулкана. Крім того, виявлено шість груп можливих збурень, стимульованих вибухом вулкана. Важливо, що у кожній групі час запізнювання збурень зростає при збільшенні відстані між вулканом і станцією. Встановлено, що збурення переносилися зі швидкостями, близькими до 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313 і 200 м/с. Такі швидкості характерні для повільних МГД-хвиль, вибухової хвилі, атмосферної гравітаційної хвилі, хвилі Лемба та іоносферної хвилі від цунамі.

Ключові слова: вулкан Тонга, вибух, магнітний ефект, час запізнювання, удавана швидкість, МГД-хвиля, вибухова хвиля, атмосферна гравітаційна хвиля, цунамі.

ВСТУП

15 січня 2022 р. в інтервалі часу 04:00—05:00 UT (тут і надалі час всесвітній) спостерігалось п'ять вибухів підводного вулкана Тонга (20°54' пд. ш., 175°38' зх. д.) [13, 14, 33, 34]. Другий вибух о 04:15 UT був найпотужнішим. Продукти викиду досягли висоти 50...58 км. Такі викиди стали ре-

кордними. Максимальна висота викидів найпотужнішого вулкана Кракатау, що вибухнув 26—27 серпня 1883 р., становила 40...55 км.

Теплова енергія викидів вулкана Тонга була близькою до $3.9 \cdot 10^{18}$ Дж, середня теплова потужність — $9.1 \cdot 10^{12}$ Вт [5]. Маса викидів сягала 2.9 Гг, а їхній об'єм $1.9 \cdot 10^9$ м³. Індекс вулканічної вибуховості (VEI) не перевищував 5.8. За даними

Цитування: Черногор Л. Ф. Глобальні варіації геомагнітного поля, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. 29, № 4 (143). С. 78—105. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.078>

© Видавць ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

різних досліджень енергія вибуху становила від 4...18 до 478 ± 191 Мт ТНТ [13, 14, 30].

Вибух вулкана Тонга супроводжувався суттєвими збуреннями усіх підсистем у системі Земля (літосфера, Світовий океан) — атмосфера — іоносфера — магнітосфера [5]. Проведено спостереження за землетрусом з магнітудою 5.8 [36], поширенням сейсмічних хвиль [33, 34, 36], цунами [16, 27, 29, 37, 40, 41], хвилі Лемба [29, 30, 32—35, 45], гравітаційної, інфразвуквої та звукової хвилі [10, 15—17, 25, 33, 34, 44], а також процесами в атмосфері та іоносфері [8, 9, 11, 12, 14, 17, 24, 32, 42, 45].

Теоретичний аналіз комплексу фізичних процесів проведено в роботах [5, 9—22].

Вибух також супроводжувався варіаціями геомагнітного поля [7, 13, 26, 28, 31, 38, 39, 43].

У роботі [39] описано квазіперіодичні збурення рівня Y -компонента з амплітудою порядку 3 нТл і періодом 4 хв на відстані 835 км від вулкана. Час запізнювання був меншим від 10 хв.

У роботах [28, 43] аналізувались геомагнітні варіації на частоті 3.8 мГц (період $T \approx 4.4$ хв). Ці варіації автори пов'язали з атмосферним акустичним резонансом. Важливо, що коливання з частотою 3.8 мГц одночасно спостерігалися як поблизу вулкана (станція API), так і у магнітоспряженій області (станція HON). Амплітуда практично синхронних коливань на цих станціях дорівнювала відповідно 2 та 0.2 нТл. Час запізнювання магнітного ефекту не перевищував 6 хв. Проте подібні коливання не реєструвалися на відстанях $r > 2.7$ Мм.

Роботу [38] було присвячено дослідженню магнітних варіацій з періодом 3...8 хв та амплітудою порядку 1 нТл, що мали час запізнювання близько 30 хв (швидкість поширення 470 м/с). Ці варіації автори пов'язують з іоносферною хвилею, згенерованою вулканом, а варіації з періодами 13...93 та 5...100 хв — з впливом цунамі та атмосферно-іоносферних хвиль.

У роботі [26] описано результати багатоінструментальних досліджень магнітного ефекту вулкана Тонга. Для аналізу автори використали дані супутників ICON і Swarm та наземних магнітометрів. Було вивчено вплив вибуху вулкана на іоносферну динамо-область, нейтральні вітри та іоносферні струми.

У роботі [31] досліджувався вплив вибуху вулкана на інтенсивність екваторіального електроструменя і виявлено ефект повороту напрямку цього електроструменя, викликаного сильним зональним вітром, спрямованим на схід.

У роботі [13] описано хвильові процеси та збурення атмосферного електричного і магнітного полів. Для дослідження магнітного ефекту використано дані спостережень 14 станцій світової мережі станцій INTERMAGNET, віддалених від вулкана на відстань від 2.790 до 16.225 Мм. Встановлено, що збурення геомагнітного поля носили глобальний характер. Виявлено дві групи збурень. У першій групі майже синхронно спостерігалися збурення практично відразу після вибуху. У другій групі магнітні збурення виникали після приходу атмосферних хвиль.

Актуальним завданням є подальший аналіз збурень магнітного поля Землі, що пов'язані з вибухом вулкана Тонга.

Мета цієї роботи — викладення результатів дослідження глобальних варіацій геомагнітного поля, викликаних вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р.

ВІДОМОСТІ ПРО ВУЛКАН ТОНГА

Вулкан Тонга розташовується в океані на глибині близько 200 м. Інтенсивне виверження вулкана 15 січня 2022 р. реєструвалося приблизно з 04:00 до 16:00 UT. Продуктивність вулкана сягала 67 кт/с, або 44000 м³/с. Активність вулкана спостерігалася впродовж 12 ± 1 год.

Енергія вибухової хвилі дорівнювала 16...18 Мт ТНТ [5].

Вулкан Тонга належить до п'ятірки найбільш потужних вулканів.

СТАН КОСМІЧНОЇ ПОГОДИ

За даними сайтів [http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp] та [https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html] стан космічної погоди з 12 до 18 січня 2022 р. був таким. Число сонячних плям не перевищувало 100. Індекс $F_{10.7} = 100...120$ с.о.п. (1 с.о.п. = 10^{-22} Вт·м⁻²·Гц⁻¹). Суттєве (у рази) збурення параметрів сонячного вітру мало місце у ніч з 14 на 15 січня 2022 р. Значення рівня компонента B_z міжпланетного магнітного поля зменшилися

від ± 4 до -14 нТл. Індекс A_p , навпаки, при цьому збільшився від 5 до 67 нТл, індекс K_p — від 1 до 5.7, а D_{st} -індекс зменшився від 10 до -90 нТл. Таким чином, в ніч з 14 на 15 січня 2022 р. мала місце помірна магнітна буря класу G2. З 15 до 18 січня 2022 р. спостерігалася фаза відновлення магнітної бурі. Приблизно з 12:00 15 січня 2022 р. мала місце суббура, яка могла маскувати магнітний ефект вибуху вулкана.

Найбільш спокійною була доба 13 січня 2022 р. Саме її обрано на роль контрольної доби. Додатково як контрольна використовується також доба 17 січня 2022 р.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ

За вихідні дані обрано результати вимірювань часових варіацій на світовій мережі станцій INTERMAGNET [<https://www.intermagnet.org/>]. Перелік використаних станцій наведено у табл. 1. Дислокацію станцій відносно вулкана Тонга показано на рис. 1. Важливо, що ці станції були розташовані як на схід, так і на захід від вулкана, а також південніше, і північніше від нього. Ми аналізували часові варіації X -, Y - і Z -компонентів магнітного поля Землі для 12, 13, 15, 16, 17 та 18 січня 2022 р. Як відомо, часова роздільна здатність дорівнювала 1 хв. Похибка вимірювань не перевищувала 1 нТл. Додамо, що часові варіації всіх компонентів на станціях PPT і IPM, які лежали на нічно-

му боці Землі, були досить малими, а тому далі не описуються. Під час пошуку можливої реакції геомагнітного поля на вибух вулкана Тонга використовувався такий алгоритм.

1. Оскільки варіації геомагнітного поля можуть викликатися багатьма потужними джерелами енерговиділення, на першому етапі виділялися будь-які характерні зміни варіацій рівня X -, Y - і Z -компонентів, які спостерігалися після вибуху і які могли бути пов'язані з вибухом. Це є необхідною, але не достатньою умовою.

2. На другому етапі відсіюються варіації, які були подібні до варіацій у контрольні дні і викликалися, наприклад, добовими процесами, рухом сонячного термінатора тощо.

3. Далі визначалися можливі часи запізнювання збурень та видимі швидкості. Час запізнювання повинен був збільшуватися при збільшенні відстані від вулкана.

4. Якщо видимі швидкості для різних станцій були достатньо близькими, вони створювали статистичну групу та статистичний ряд. Близькість видимих швидкостей у даній групі вважалася достатньою умовою того, що збурення викликане вибухом вулкана.

5. Додатковою достатньою умовою було фізичне тлумачення видимих швидкостей. Ці швидкості повинні були відповідати відомим швидкостям хвиль певної фізичної природи.

Таблиця 1. Основні дані про геомагнітні станції

Назва станції	Координати		Країна	Відстань до місця вибуху, км
	Широта	Довгота		
Apia (API)	13.8155° S	171.7812° W	Західне Самоа	840
Eyrewell (EYR)	43.4740° S	172.3930° E	Нова Зеландія	2790
Canberra (CNB)	35.3200° S	149.3600° E	Австралія	3806
Alice Springs (ASP)	23.7620° S	133.8830° E	Австралія	5210
Kakadu (KDU)	12.6900° S	132.4700° E	Австралія	5602
Gingin (GNG)	31.3560° S	115.7150° E	Австралія	6887
Learmonth (LRM)	22.2200° S	114.1000° E	Австралія	7233
Kakioka (KAK)	36.2320° N	140.1860° E	Японія	7852
Shumagin (SHU)	55.3500° N	160.4600° W	Сполучені Штати Америки	8557
Dalat (DLT)	11.9400° N	108.4800° E	В'єтнам	9068
Cocos (Keeling) Islands (CKI)	12.1875° S	96.8336° E	Австралія	9308
Gan International Airport (GAN)	0.6946° S	73.1537° E	Мальдіви	12210

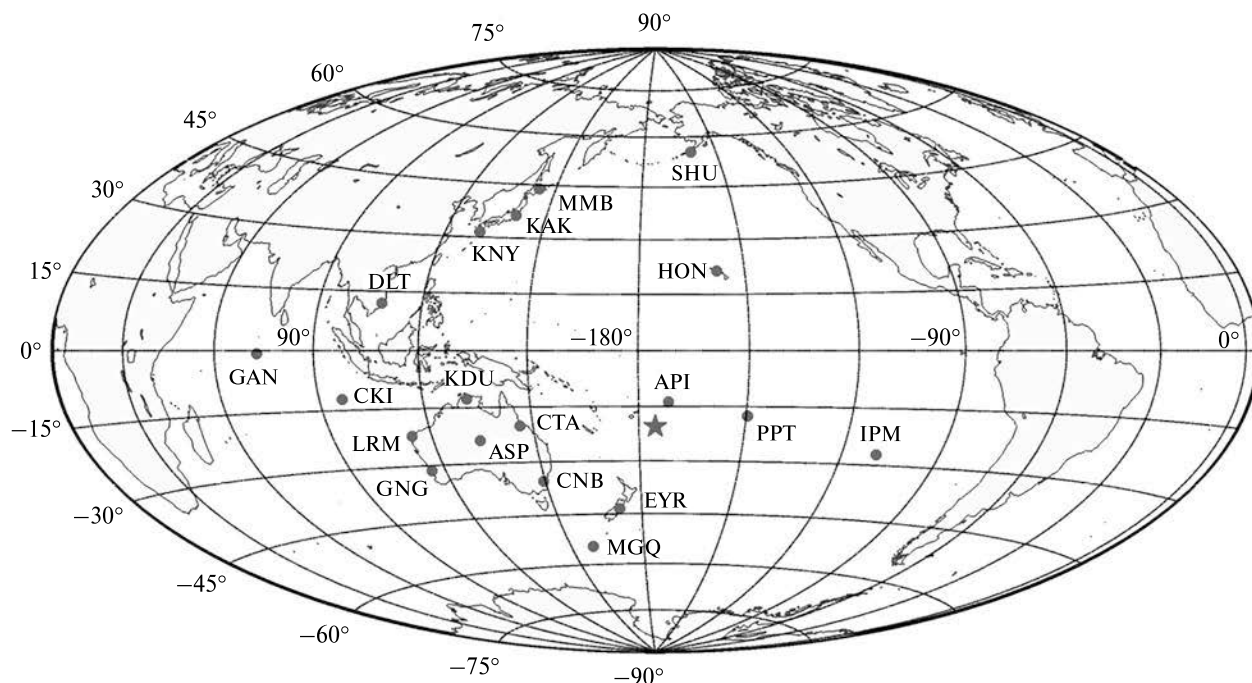


Рис. 1. Розташування геомагнітних станцій відносно вулкана Тонга, позначеного зіркою

6. Отримані результати, за можливістю, порівнювалися з результатами для інших вулканів, які вибухали раніше.

На початку розгляду підкреслимо, що варіації рівня компонентів у контрольні дні були більш плавними. У день вибуху вулкана Тонга вони стали немонотонними. Мали місце як аперіодичні, так і квазіперіодичні збурення рівня компонентів геомагнітного поля. Із часових залежностей рівня компонентів спочатку віднімали ковзний тренд, обчислений на інтервалі 60 хв з кроком 1 хв, а різниця піддавалася спектральному аналізу із застосуванням віконного та адаптивно-го перетворення Фур'є та вейвлет-аналізу [2].

АНАЛІЗ ЧАСОВИХ ВАРІАЦІЙ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Станція Арія (API). Часові варіації усіх компонентів геомагнітного поля у контрольні дні були в значній мірі подібними (рис. 2). X - та Y -компоненти злегка флюктували біля рівня -10 нТл та -5 нТл відповідно. Рівень Z -компонента змінювався у межах від 6 до -3 нТл та від 3 до -5 нТл відповідно.

У день вибуху вулкана з часом запізнювання $\Delta t_1 \approx 8.5$ хв рівень X -компонента виріс від -15 до -3 нТл, а потім зменшився від -3 до -23 нТл. Все це тривало не менше 120 хв. Крім того, впродовж 90 хв рівень коливався з періодом $T \approx 5$ хв та амплітудою $\Delta X_a \approx 1 \dots 1.5$ нТл. Рівень Y -компонента спочатку збільшувався від 0 до 32 нТл, а потім зменшувався від 32 до 10 нТл.

На цей аперіодичний процес наклалися квазіперіодичні коливання з $T \approx 4 \dots 4.5$ хв. Важливо, що перше коливання мало час запізнювання $\Delta t_0 \approx 6$ хв, тривалість $\Delta T_0 \approx 32 \dots 36$ хв і амплітуду до 2 нТл. З $\Delta t_1 \approx 8.5$ хв рівень Z -компонента спочатку зменшився від -1 до -12 нТл, а потім виріс від -12 до 2 нТл. Також мали місце коливання з $T \approx 5$ хв.

Станція Eyrewell (EYR). 13 січня 2022 р. рівень X -компонента, флюктуючи, зменшувався від -15 до $-(30 \pm 1)$ нТл. З 08:00 UT рівень X -компонента флюктував біля значення -26 нТл (рис. 3). Рівень Y -компонента спочатку зменшувався від $10 \dots 12$ приблизно до 2 нТл, що мало місце о 07:00–07:30 UT. Потім він збільшився до 7 нТл, після чого спостерігалось його зменшення до $2 \dots 3$ нТл. Рі-

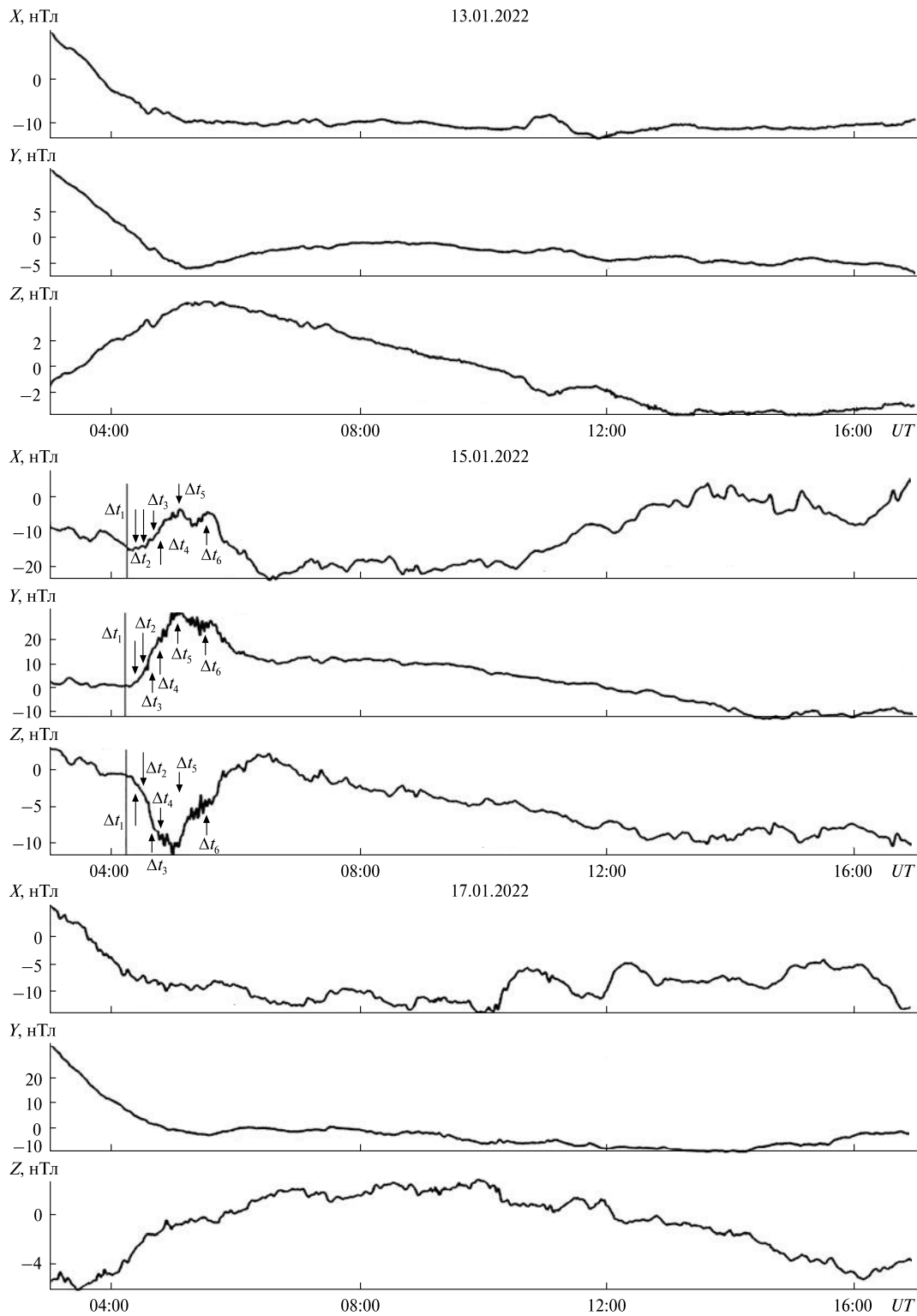


Рис. 2. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції API. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

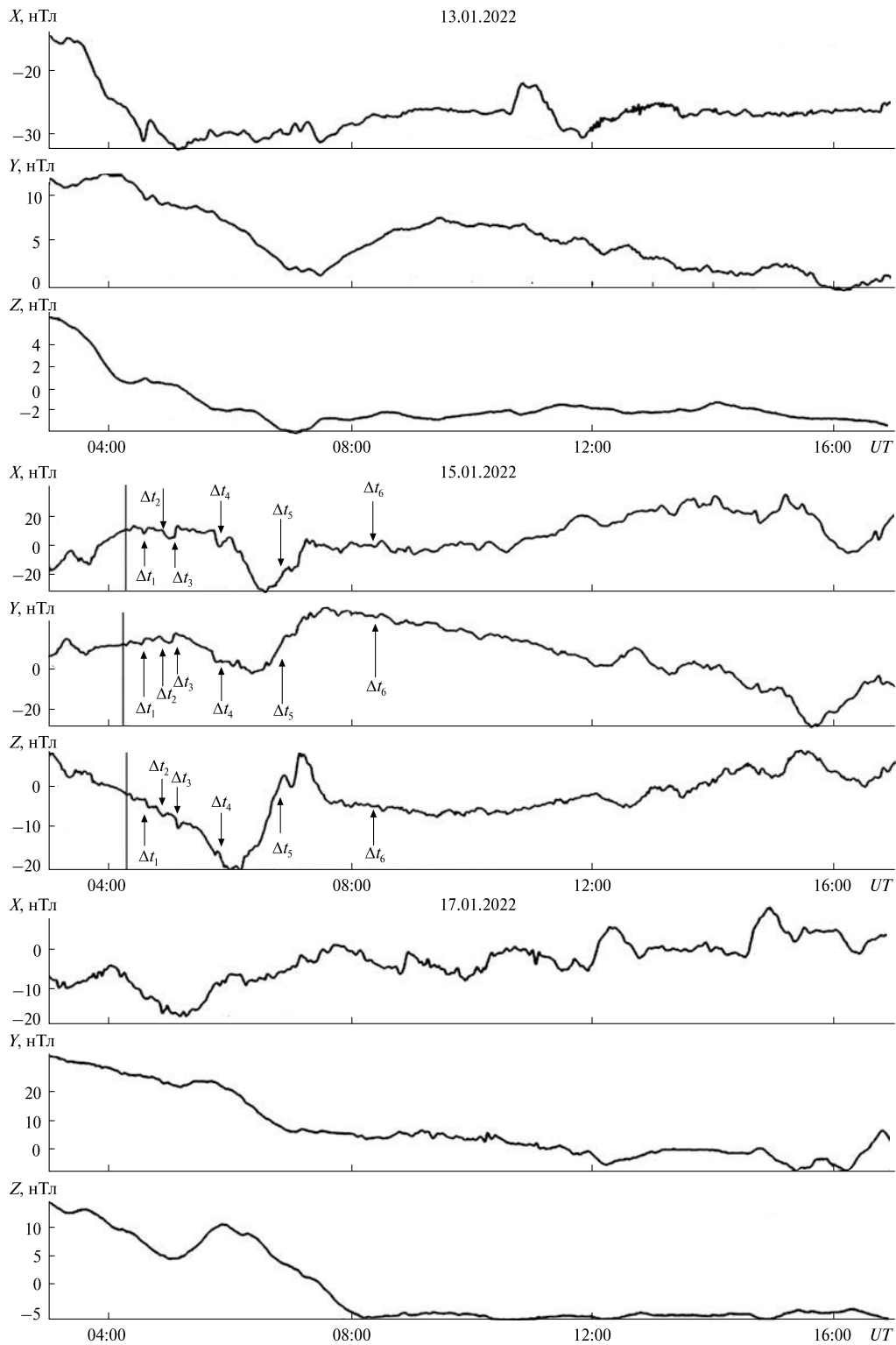


Рис. 3. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції EYR. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

вень Z -компонента зменшився від 6 до -2 нТл. Далі він флюктував поблизу цього рівня.

17 січня рівень X -компонента флюктував біля 5 нТл, амплітуда флюктуацій сягала 6...7 нТл. Рівень Y -компонента, флюктуючи, зменшувався приблизно від 30 до -10 нТл. Водночас рівень Z -компонента, флюктуючи, зменшувався від 15 до -5 нТл.

У день вибуху вулкана спостерігалось до шести груп збурень. Найбільш яскравим було бухтоподібне збурення, яке мало час запізнювання $\tau_X \approx 86$ хв, $\tau_Y \approx 51$ хв і $\tau_Z \approx 51$ хв. Провали у X -, Y - і Z -компонентах сягали відповідно -40 , -25 і -25 нТл. Після провалів у рівнях Y - і Z -компонентів спостерігалось збільшення до 30 та 8 нТл відповідно. Амплітуда інших збурень зазвичай не перевищувала одиниць нанотесла.

Станція Canberra (CNB). 13 січня 2022 р. рівень флюктуацій усіх компонентів не перевищував 1...4 нТл (рис. 4). Для Y -компонента мало місце зменшення рівня від 23 до 0 нТл. З 03:00 до 06:00 для Z -компонента спостерігався провал від 2 до -9 нТл. Далі рівень флюктував біля -2 нТл.

17 січня 2022 р. рівень X -компонента, флюктуючи у межах ± 5 ...7 нТл, поступово збільшувався від -10 до 5 нТл. Натомість рівень Y -компонента зменшувався від 37 приблизно до 0 нТл. Рівень Z -компонента спочатку зростав від -25 до -7 нТл, а потім флюктував у межах ± 3 ...4 нТл.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку збільшувався від -10 до 10 нТл, потім зменшувався від 10 до -10 нТл, а потім знову зростав від -10 до 30 нТл. Рівень флюктуацій становив ± 3 ...5 нТл. Тренд Y спочатку зменшився від 22 до -33 нТл, потім він збільшувався від -33 до 33 нТл, а потім знову зменшувався від 33 до -25 нТл. Тренд Z спочатку зменшувався від -10 до -16 нТл, потім він зростав від -16 до 10 нТл, а потім знову зменшувався від 10 до -8 нТл. За ним настало збільшення Z від -8 до 10 нТл. На повільний тренд усіх компонентів наклалися варіації рівня з амплітудою в одиниці нанотесла.

Станція Alice Springs (ASP). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X спочатку зменшувався від 10 до -8 ... -10 нТл, а потім залишився біля рівня -6 нТл (рис. 5). Тренд Y зменшувався від 20 до 2...3 нТл. Тренд Z спочатку різко змен-

шився від 13 до -4 нТл, а потім варіював від -4 до -3 нТл. Рівень флюктуацій усіх компонентів зазвичай не перевищував 1...2 нТл.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X змінювався незначно, рівень флюктуацій не перевищував ± 3 ...5 нТл. Тренд Y зменшувався від 40 до -5 нТл. Амплітуда флюктуацій сягала ± 8 ...10 нТл. Тренд Z спочатку різко зменшився від 18 до -4 нТл, надалі $Z \approx -4$ нТл. Рівень флюктуацій не перевищував ± 1 нТл.

У день вибуху вулкана мали місце бухтоподібні збурення усіх компонентів геомагнітного поля, на які наклалися флюктуації з амплітудою до 4...5 нТл. У тренді X спостерігався провал від -3 до -20 нТл. Провал у тренді Y був значно більшим: від 20 до -30 нТл, його тривалість наближалась до 4 год. За провалом спостерігався потужний сплеск від -30 до 30 нТл тривалістю більш ніж 7 год. Тренд Z спочатку збільшувався від -20 до -13 нТл, потім зменшувався від -13 до -22 нТл, а надалі він збільшувався від -22 до 10 нТл. За сплеском Z мало місце зменшення тренду до -10 нТл.

Станція Kakadu (KDU). 13 січня 2022 р. тренд X спочатку різко зменшився від 20 до -10 нТл, а потім флюктував біля рівня -10 нТл (рис. 6). Тренд Y поступово зменшувався від 7...8 приблизно до 2 нТл. Тренд Z спочатку (до 06:30) зростав до 14 нТл, потім різко зменшився до 0 нТл, після чого практично не змінювався.

17 січня 2022 р. поведінка усіх трьох трендів якісно була схожою на їхню поведінку 13 січня 2022 р., проте амплітуда флюктуацій зросла до 2...4 нТл.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку зменшився від -10 до -20 нТл, потім він до 14:00 збільшувався від -20 до 3 нТл. В інтервалі часу 14:00—17:00 спостерігався провал у залежності $X(t)$ до -18 нТл. Тренд Y спочатку збільшувався від 5 до 13 нТл, потім зменшувався від 13 до -15 нТл, надалі зростав від -15 до 28...30 нТл, а потім поступово зменшувався від 28...30 до -10 нТл. Тренд Z спочатку збільшувався від 5 до 9 нТл, потім він зменшувався від 9 до -7 нТл, надалі знову зростав від -7 до 14 нТл. Після цього спостерігалось поступове зменшення Z від 14 до -4 нТл.

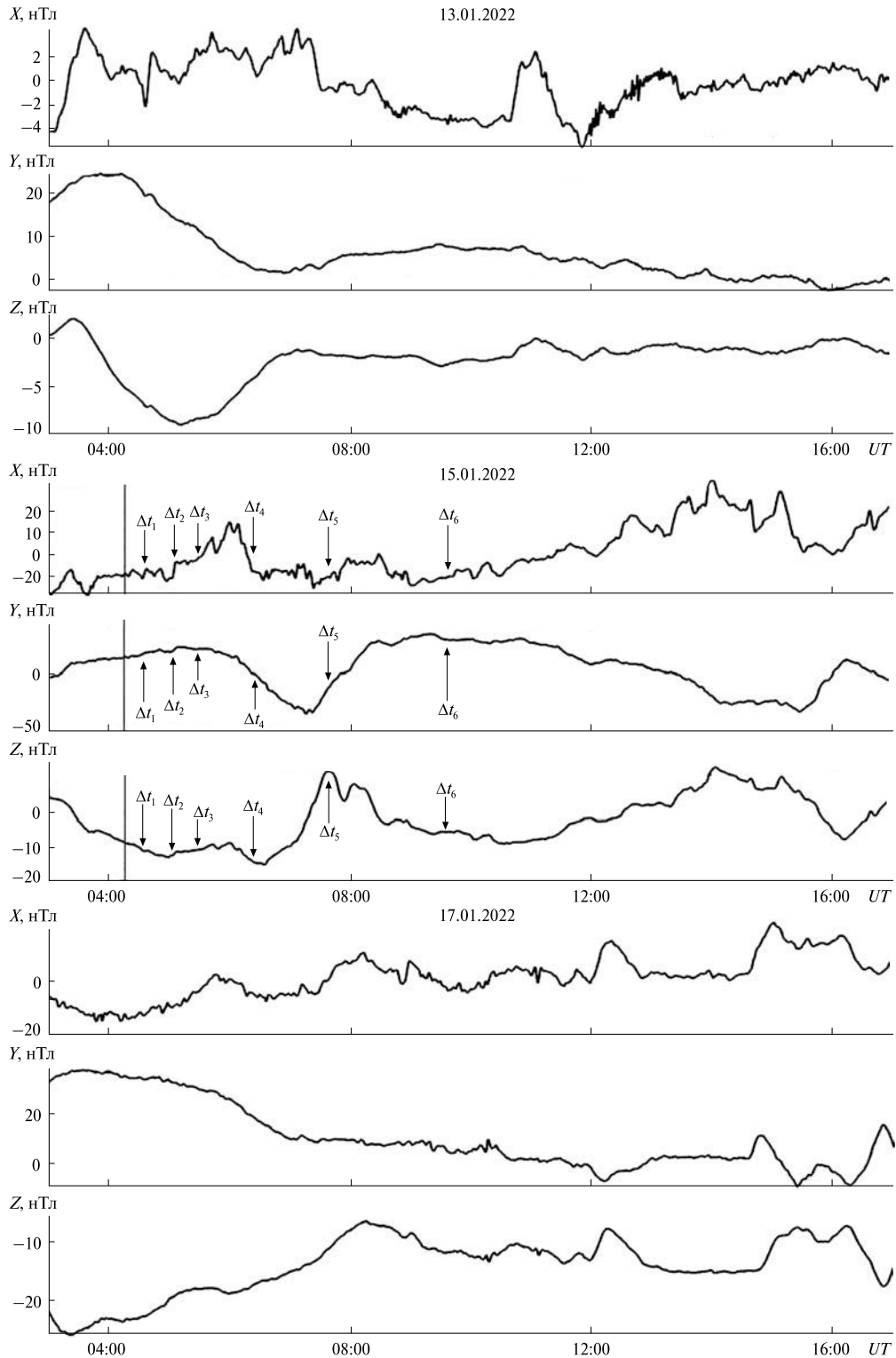


Рис. 4. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції CNB. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

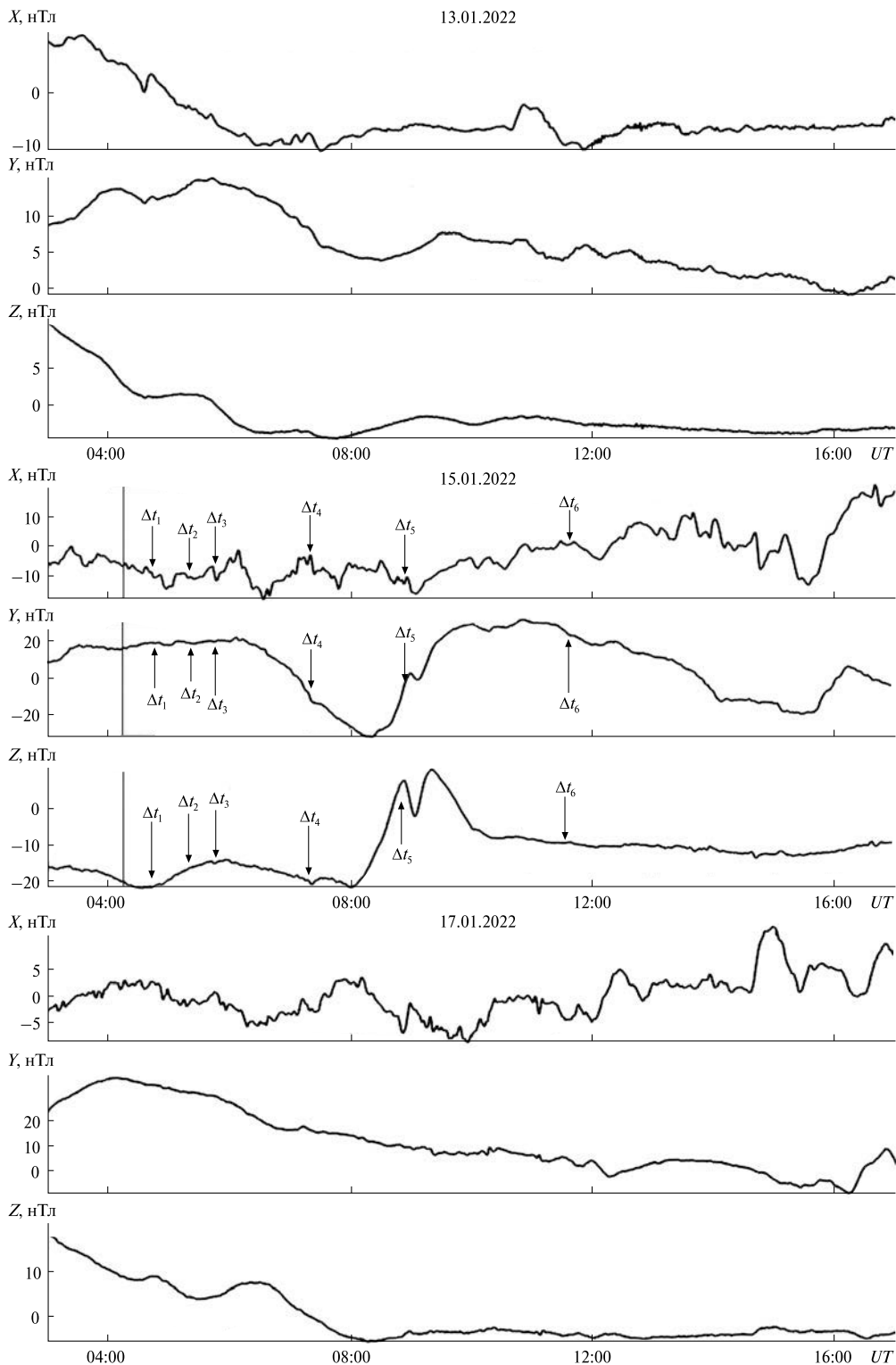


Рис. 5. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції ASP. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

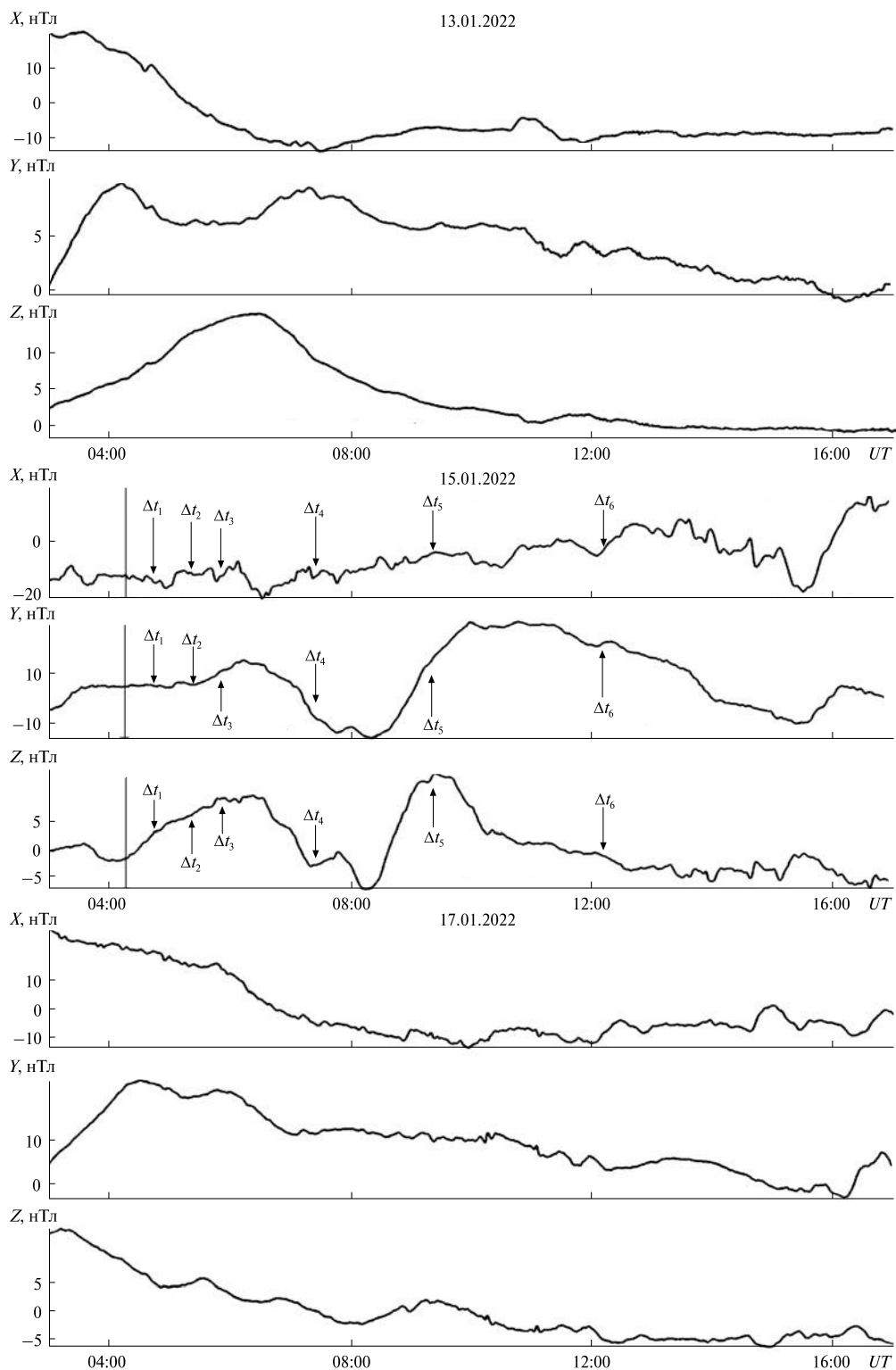


Рис. 6. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції KDU. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

На більш-менш плавні зміни усіх компонентів наклалися варіації з амплітудою в одиниці нанотесла.

Станція Gingin (GNG). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X спочатку різко зменшився від 18 до -5 нТл, надалі він флюктував в околі -5 нТл (рис. 7). Тренд Y , флюктуючи у межах $\pm 3...4$ нТл, поступово зменшувався від 20 до 0 нТл. У інтервалі часу $03:00-09:00$ тренд Z досить різко зменшувався від 27 до -5 нТл, надалі він залишався майже незмінним.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X поступово збільшувався від -2 до 10 нТл. Амплітуда флюктуацій рівня X -компонента дорівнювала $\pm 4...10$ нТл. Тренд Y спочатку збільшувався до 30 нТл, надалі поступово зменшувався від 30 до -10 нТл. Амплітуда флюктуацій подекуди сягала $\pm 5...10$ нТл. Тренд Z до $05:30$ збільшувався до 38 нТл, потім до $12:00$ зменшувався до -12 нТл, а надалі майже не змінювався. Амплітуда флюктуацій після $12:00$ становила $\pm 4...5$ нТл.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів якісно відрізнялися. Після деякого зростання до 10 нТл спостерігалось тривале (до $2.5...5$ год) зменшення рівня усіх компонентів на $10...50$ нТл. Надалі мало місце тривале (до $3...4$ год) збільшення рівня на $15...40$ нТл. На повільні варіації усіх компонентів наклалися варіації з амплітудою $5...9$ нТл.

Станція Learmonth (LRM). 13 січня 2022 р. тренд X стрімко зменшувався в інтервалі часу з $03:30$ до $08:30$ з 29 до -12 нТл, надалі він змінювався несуттєво (рис. 8). При цьому тренд Y зменшувався від 10 до 2 нТл, а тренд Z — від 10 до -3 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X сильно флюктував (у межах ± 10 нТл). Тренд до $06:00$ збільшувався, а після цього до $17:00$ зменшувався від 38 до -7 нТл. Амплітуда флюктуацій сягала $\pm 5...6$ нТл. Тренд Z зменшувався від 45 до -10 нТл в інтервалі часу $04:00-10:00$, а потім практично не змінювався.

15 січня 2022 р., у день вибуху вулкана, варіації були суттєво іншими. Після нетривалого збільшення на 10 нТл усіх трендів вони зменшувалися на $20...40$ нТл. Після цього спостерігалось тривале (до $5...7$ год) зростання трендів на $20...50$ нТл. Амплітуда флюктуацій не перевищувала $3...4$ нТл.

Станція Kakioka (KAK). У контрольний день 13 січня 2022 р. тренд X у інтервалі часу $03:00-08:00$ збільшувався від -20 до 5 нТл, а потім поступово зменшувався від 5 до 0 нТл (рис. 9). Тренд Y зменшувався до $05:00$ до -22 нТл, потім збільшувався до 0 нТл до $08:00$, після чого залишався практично незмінним. Тренд Z у інтервалі часу $02:00-06:00$ збільшувався від -20 до 10 нТл, з $07:00$ до $09:00$ він зменшувався від 10 до 0 нТл, а далі майже не змінювався. Величина флюктуацій для всіх компонентів не перевищувала ± 1 нТл.

У контрольний день 17 січня 2022 р. тренд X збільшувався від -10 до 5 нТл, з $08:00$ до $15:00$ спостерігався провал у залежності $X(t)$. З $15:00$ до $17:00$ $X \approx 6$ нТл. Тренд Y спочатку зменшувався до -20 нТл, а потім збільшувався до 0 нТл. Тренд Z зменшувався до $06:40$ до 2 нТл. В інтервалі часу $06:40-12:00$ спостерігався провал від 2 до -2 нТл. Далі $Z \approx 2$ нТл. Амплітуда флюктуацій всіх компонентів сягала $2...3$ нТл.

У день вибуху вулкана рівень флюктуацій усіх компонентів помітно зріс. Після нетривалого зростання від 0 до 2 нТл тренд X спадав з $06:00$ до $10:00$ від 2 до -10 нТл. Далі він впродовж 3 год збільшувався від -10 до 3 нТл. Надалі тренд зменшувався до -18 нТл. Тренд Y також спочатку збільшувався від -12 до 4 нТл, потім впродовж 1.5 год спостерігалось його зменшення. Далі тренд Y збільшувався до $15:00$ до значення 14 нТл. Приблизно з $11:00$ до $15:00$ реєструвалося чітке квазіперіодичне збурення з $T \approx 55...60$ хв і амплітудою 4 нТл. Інші збурення мали амплітуду $1...1.5$ нТл. Тренд Z з $01:00$ до $03:00$ збільшувався від -13 до 2 нТл, потім до $07:00$ залишався майже незмінним. З $07:00$ до $13:00$ він зменшувався від 2 до -5 нТл, а потім тренд зростав. Амплітуда флюктуацій становила 1 нТл.

Станція Shumagin (SHU). 13 січня 2022 р. приблизно з $03:30$ до $17:00$ тренд X зменшувався від 6 до $2...3$ нТл (рис. 10). Тренд Y , навпаки, збільшувався від -3 до 3 нТл. Тренд Z зменшувався з $04:00$ до $10:00$ від 5.3 до -1.8 нТл, а потім поступово збільшувався від -1.8 до 2 нТл. Амплітуда флюктуацій усіх компонентів не перевищувала 1 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X лежав у межах $0...5$ нТл. Окремі сплески та провали сягали $10...20$ нТл, їхня тривалість не перевищувала 1 год.

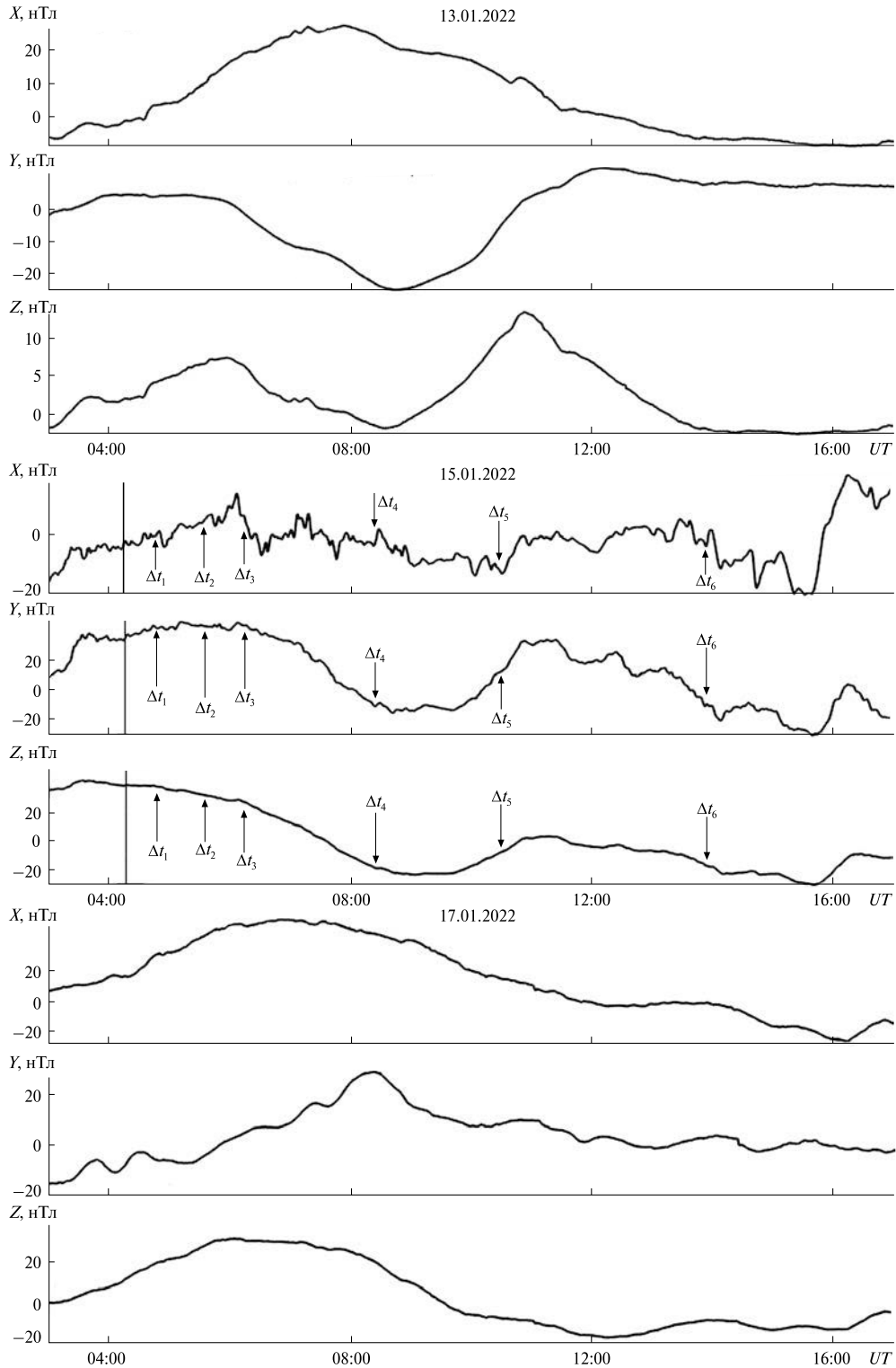


Рис. 7. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції GNG. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

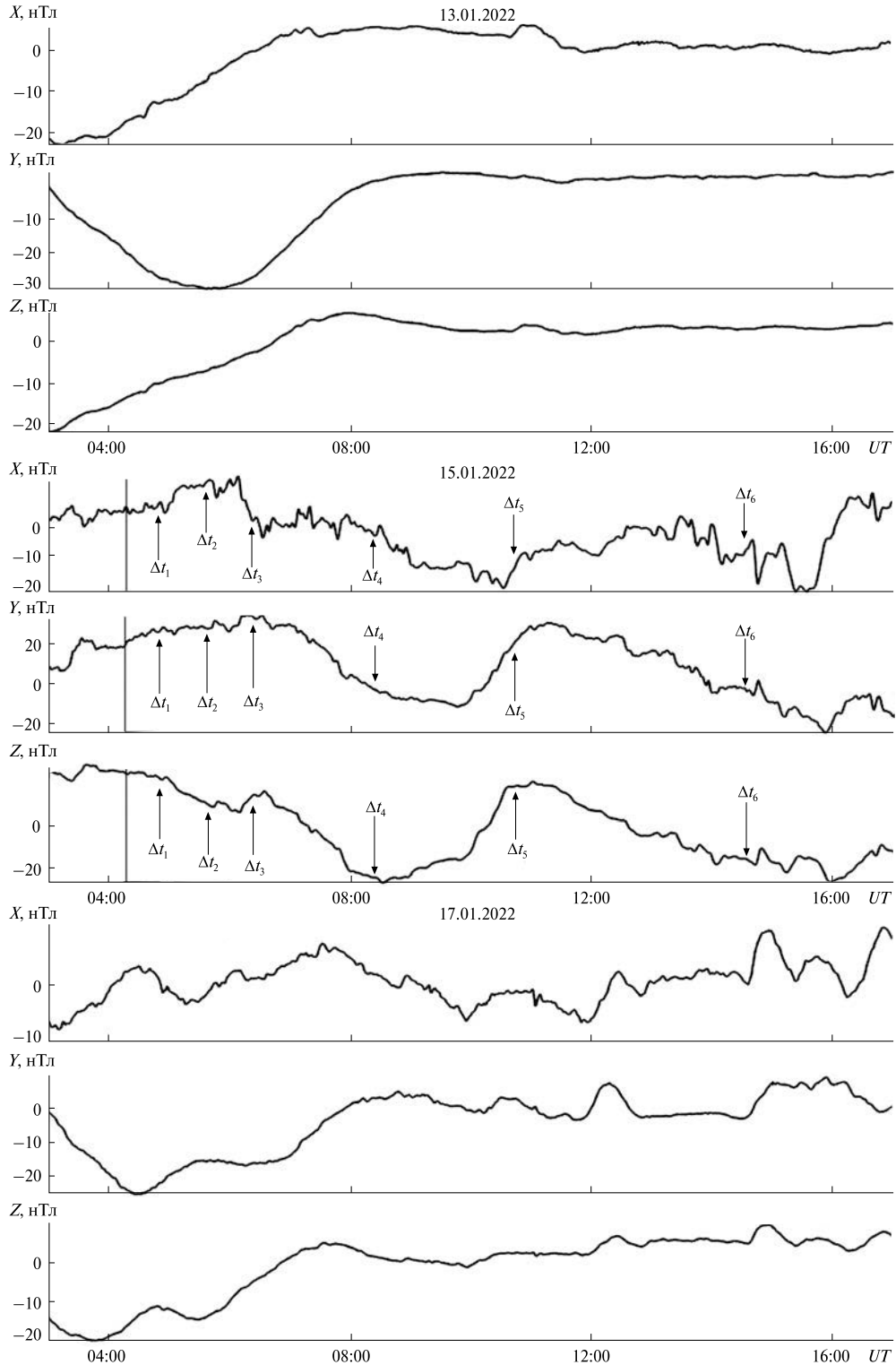


Рис. 8. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції LRM. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

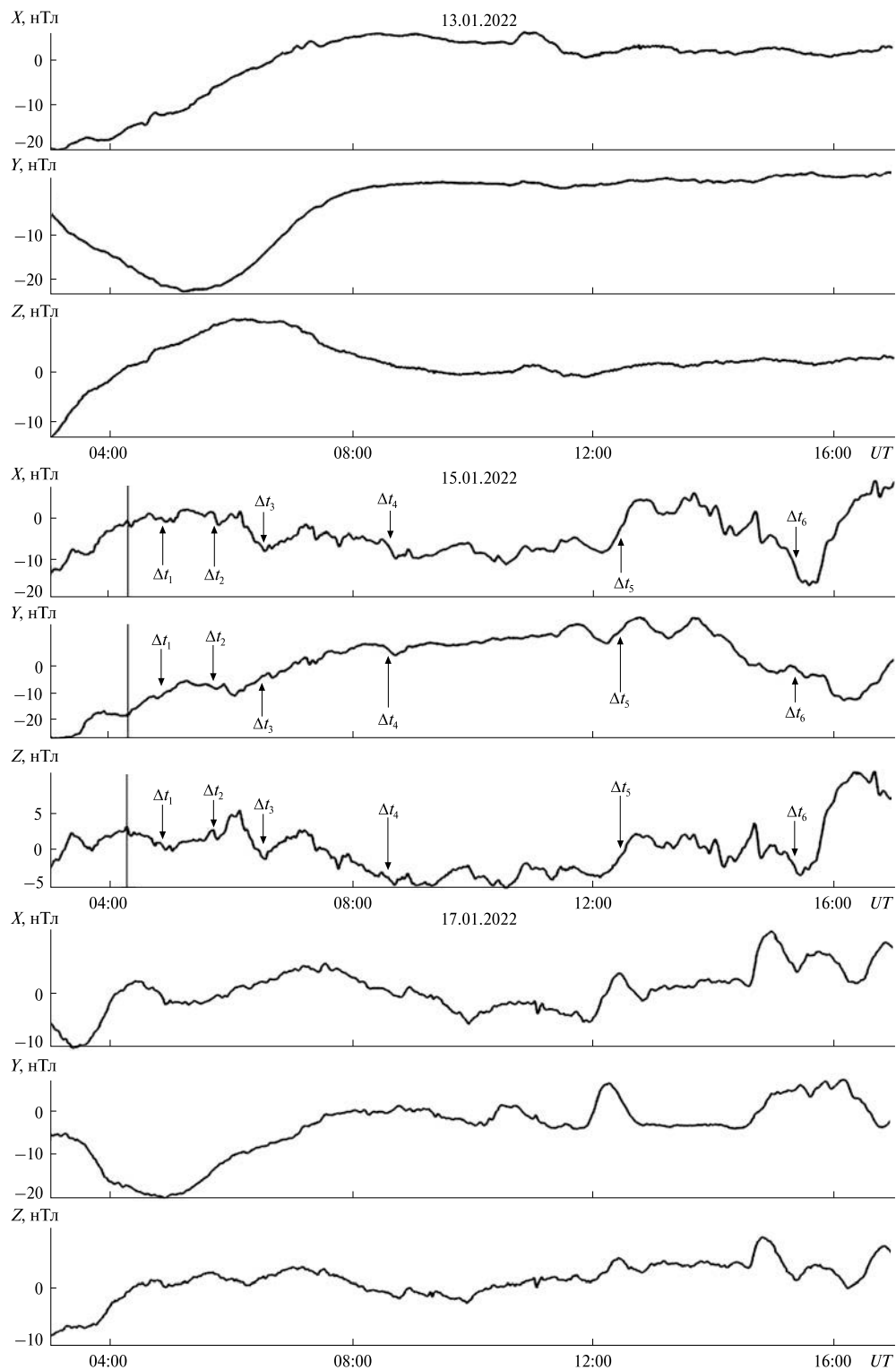


Рис. 9. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції КАК. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

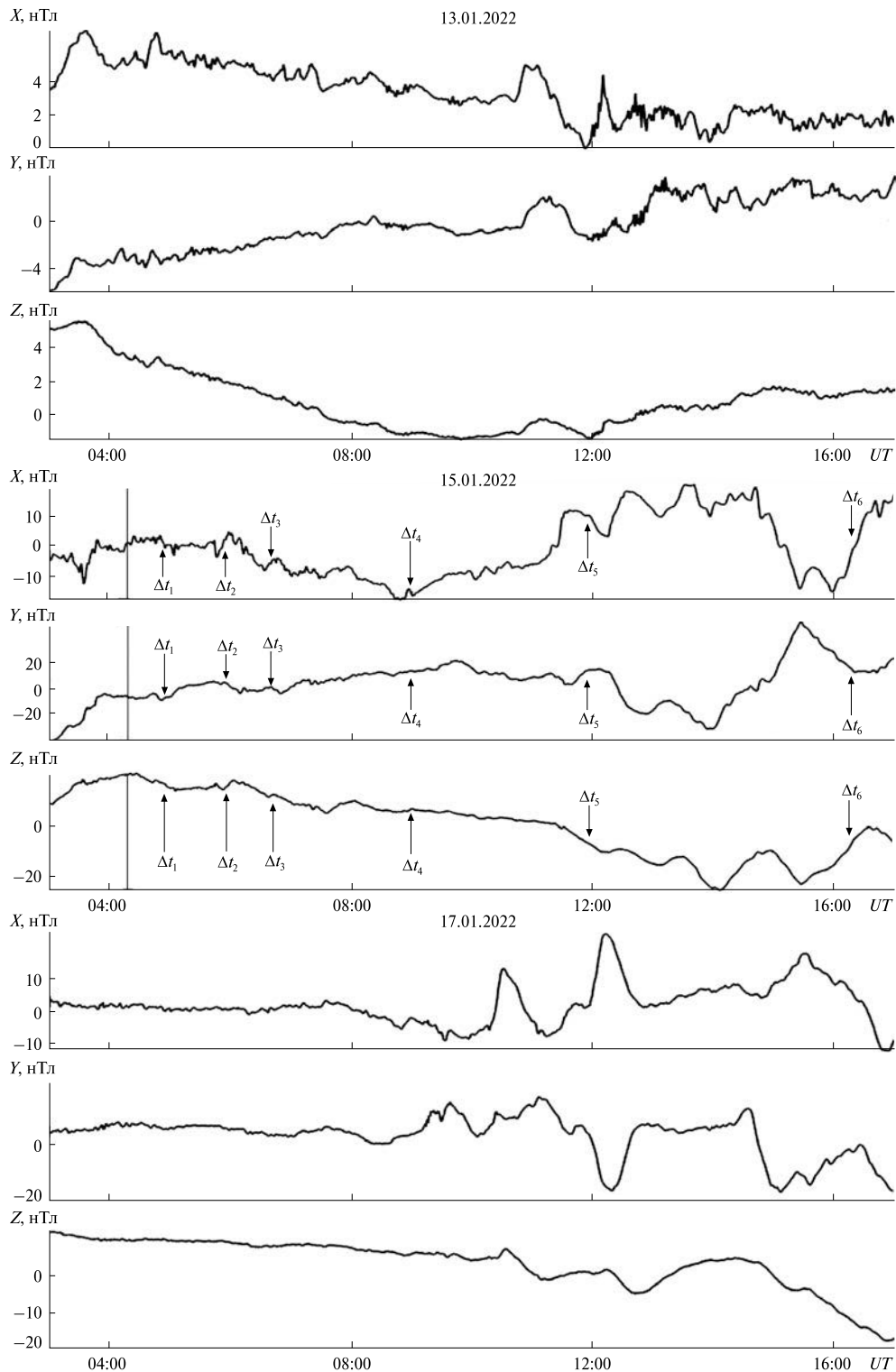


Рис. 10. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції SHU. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

Значні флуктуації (до 10...20 нТл) спостерігалися в часових варіаціях Y - і Z -компонентів.

У день вибуху вулкана тренд X спочатку з 06:00 до 09:00 зменшувався від 0 до -18 нТл, потім він збільшувався від -18 до 15 нТл. З 15:00 до 17:00 спостерігався провал у залежності $X(t)$ від 15 до -15 нТл. В інтервалі часу 11:00—13:30 мало місце чітке коливання рівня з амплітудою 4 нТл та періодом $T \approx 50$ хв. Тренд Y з 04:00 до 09:40 збільшувався від -5 до 20 нТл, потім спостерігалася його падіння до -30 нТл. Воно продовжувалося до 15:00. Далі мав місце сплеск рівня до 50 нТл, який тривав приблизно 1.5 год. Тренд Z з 04:00 до 11:00 зменшувався від 20 до 0 нТл. З 11:00 до 16:00 реєструвався провал в $X(t)$ від 0 до -20 нТл. З 12:00 до 17:00 мало місце чітке коливання з амплітудою 6...7 нТл і періодом приблизно 80 хв.

Станція Dalat (DLT). 13 січня 2022 р. спостерігалися незначні (одиниці нанотесла) флуктуації рівня всіх компонентів (рис. 11).

17 січня 2022 р. з 04:00 до 13:00 тренд X зменшувався від 63 до 13 нТл, надалі спостерігалися його флуктуації у межах 4...6 нТл. Тренд Y з 02:00 до 03:00 збільшувався від -2 до 12 нТл. Потім мало місце його стрімке падіння від 12 до -7 нТл. Далі рівень Y -компонента флюктував у межах $\pm 2...3$ нТл. Тренд Z в інтервалі часу 00:00—04:00 зменшувався від 0 до -32 нТл. Далі мало місце його стрімке зростання до 2 нТл, на зміну якому прийшло поступове зменшення до 5 нТл.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів були значними. З 06:00 до 11:00 мало місце бухтоподібне зменшення тренду X від 20 до -27 нТл. Наступний провал у залежності $X(t)$ спостерігався з 13:00 до 17:00. Значні і тривалі збурення Y реєструвалися з 04:00 до 17:00. Тренд Z з 04:20 до 05:30 збільшувався від -9 до 4 нТл, потім мав місце провал від 4 до 2 нТл. Йому на зміну прийшло зростання Z від 2 до 17 нТл. Далі спостерігалася спочатку стрімке падіння тренду до 0 нТл, а потім повільне зменшення від 0 до -5 нТл. Близько 15:30 знову спостерігалися помітні (~5 нТл) варіації тренду.

Станція Cocos (Keeling) Islands (CKI). У контрольний день 13 січня 2022 р. приблизно до 05:00 мало місце зростання тренду до 23 нТл,

після чого спостерігалася стрімке падіння від 23 до -2 нТл, а потім і більш повільне падіння від -2 до -9 нТл (рис. 12). Тренд Y з 01:00 до 04:45 спочатку збільшувався від -18 до 2 нТл, а потім до 06:00 зменшувався до -9 нТл. З 06:00 до 10:00 мало місце стрімке зростання Y від -9 до 16 нТл, яке змінилося поступовим зменшенням тренду до 3 нТл о 17:00. Тренд Z з 03:30 до 06:30 зменшувався від 5.5 до -3 нТл. Значні сплески Z від -2.5 до 1.9 нТл та від -2 до 1.2 нТл мали місце з 09:00 до 12:00 та з 12:00 до 17:00.

У контрольний день 17 січня 2022 р. з 03:00 до 05:00 тренд X дорівнював приблизно 30 нТл. З 06:00 до 10:00 спостерігалася стрімке зменшення тренду від 38 до -8 нТл. Незначні (від 10 до 15 нТл) сплески відмічалися з 12:00 до 16:00 та з 16:00 до 19:00. Тренд Y різко збільшувався з 03:00 до 06:15 від -38 до 18 нТл, а потім, флюктуючи, поступово зменшувався від 18 до 0 нТл о 17:00. Тренд Z стрімко збільшувався у інтервалі часу 00:00—05:50 від -16 до 18 нТл, далі він впродовж трьох годин різко зменшувався. Після 09:00 мали місце флуктуації Z у межах $\pm 2...3$ нТл.

У день вибуху вулкана варіації усіх компонентів значно підсилились. Тренд X до 05:30 спочатку збільшувався, а з 06:00 різко зменшувався від 17 до -12 нТл. Після 10:00 до 12:00 відмічалася його зростання від -12 до 0 нТл. З 13:00 до 17:00 мав місце провал у тренді від 0 до -30 нТл. Тренд Y з 04:00 до 07:40 збільшувався від 4 до 18 нТл. З 07:40 до 12:30 спостерігалася бухтоподібне зменшення Y від 18...20 до 0 нТл. Після 12:30 реєструвалося зменшення тренду Y до -7 о 17:00. Тренд Z в інтервалі часу 03:30—09:30 різко спадав від 8 до -18 нТл. З 09:30 до 15:00 мав місце сплеск у залежності $Z(t)$ від -18 до 4 нТл. Ще один сплеск Z до 6 нТл спостерігався від 15:00 до 17:00.

Станція Gan International Airport (GAN). 13 січня 2022 р. тренд X спочатку збільшувався від 03:00 до 07:00 від -2 до 27 нТл, а потім зменшувався в інтервалі часу 08:00—17:00 від 27 до -9 нТл (рис. 13). Тренд Y з 02:00 до 04:00 збільшувався від -7 до 4 нТл, потім з 06:00 до 08:45 різко зменшувався від 4 до -26 нТл. В інтервалі часу з 09:00 до 11:45 тренд збільшувався від -26 до 12 нТл. Надалі він поступово зменшувався від 12

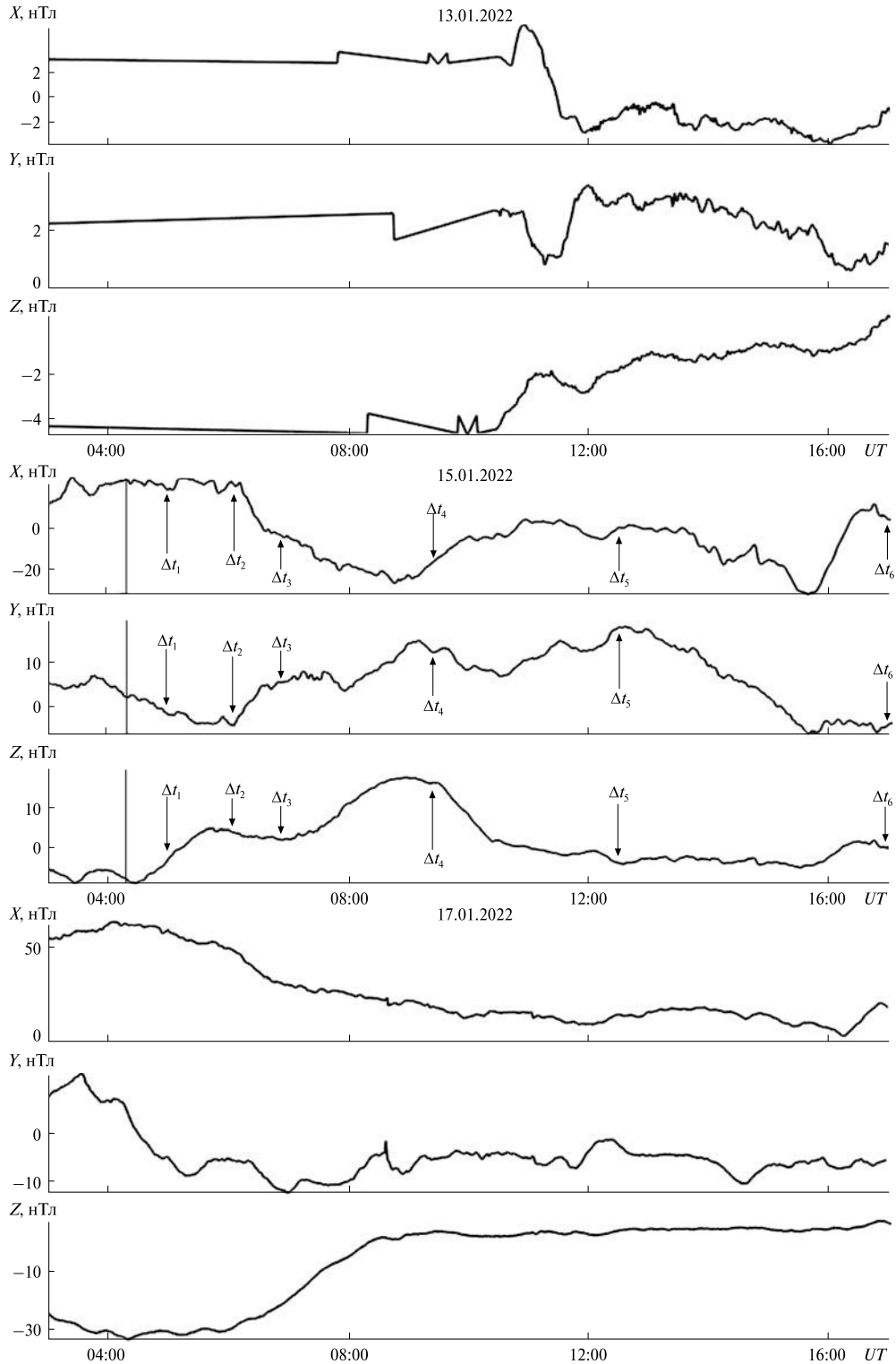


Рис. 11. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції DLT. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

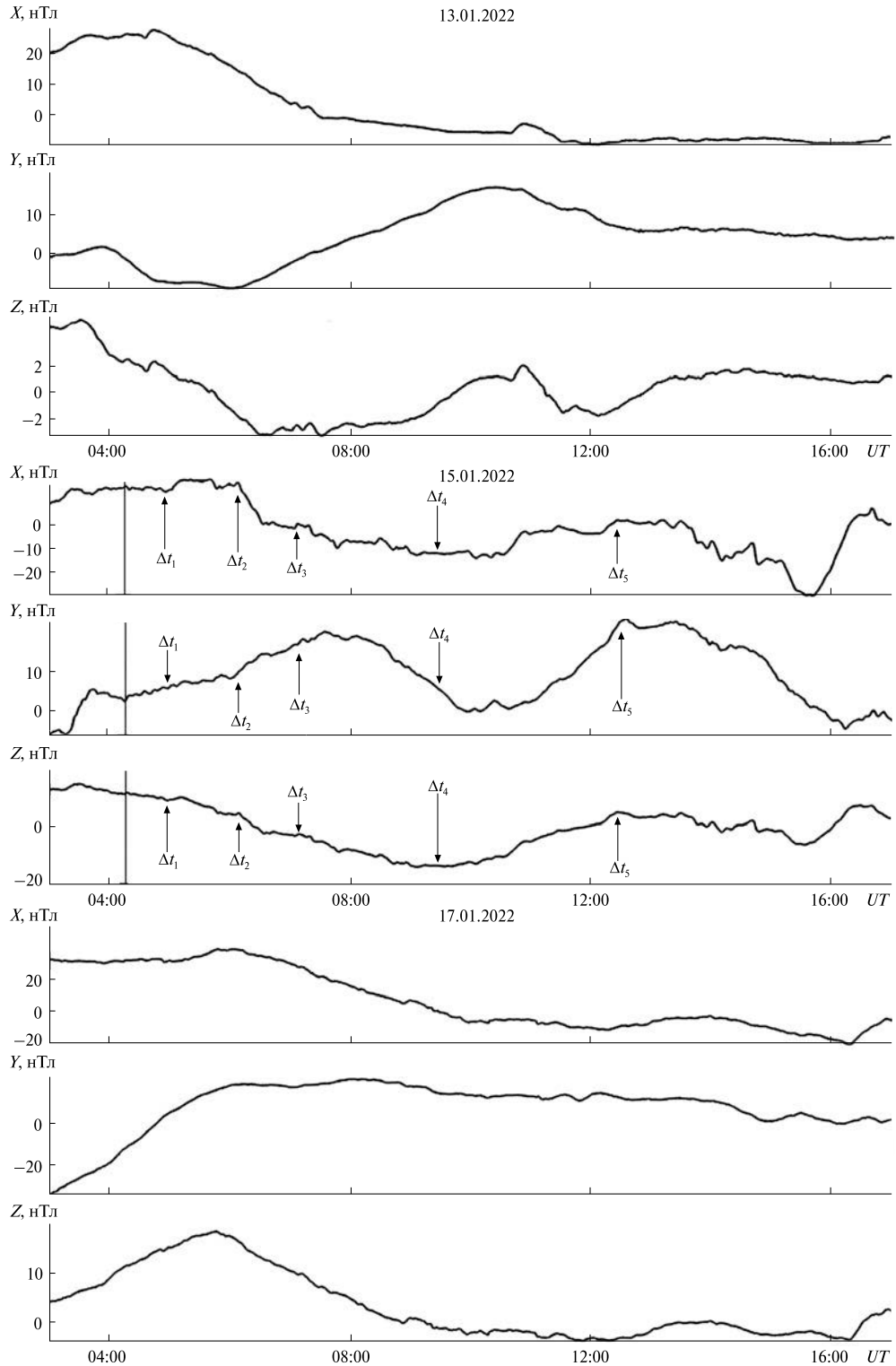


Рис. 12. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції СКІ. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

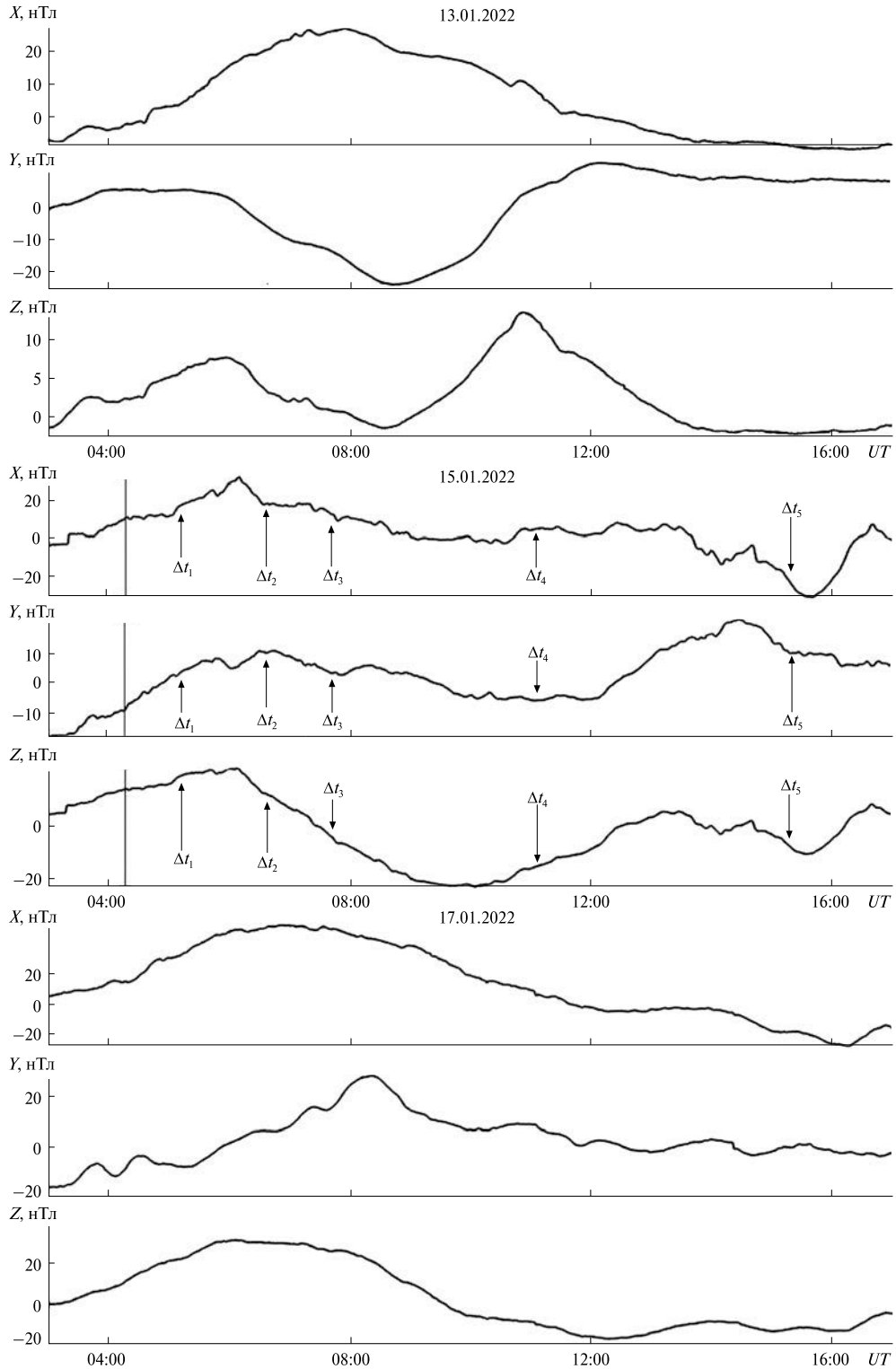


Рис. 13. Часові варіації компонентів геомагнітного поля на станції GAN. Стрілки вказують на моменти часу можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана. Вертикальною лінією показано момент вибуху вулкана

до 5 нТл о 18:00. У тренді \bar{Z} спостерігалось два значних сплески: з 03:00 до 08:25 від 2 до 7 нТл та з 08:30 до 14:00 від 3 до 13 нТл.

17 січня 2022 р. тренд X з 02:00 до 07:00 збільшувався від -15 до 50 нТл, потім до 12:00 він зменшувався до -10 нТл. Далі мали місце флуктуації X у межах ± 5 нТл. У тренді Y , крім потужного (від -7 до 28 нТл) сплеску в інтервалі часу 05:00—12:00, спостерігалися більш короточасні ($\sim 1...2$ год) сплески величиною до $4...5$ нТл. У тренді Z з 03:00 до 10:00 мав місце потужний сплеск від $-5...-10$ до 30 нТл. Після 10:00 реєструвалися відносно невеликі (до $5...6$ нТл) сплески.

У день вибуху вулкана варіації всіх компонентів помітно підсилюлися. Тренд X від 00:00 до 06:00 збільшувався від -40 до 10 нТл. З 06:00 до 10:30 значення X спадали від 10 до 0 нТл. Крім флуктуацій у межах ± 5 нТл, в інтервалі часу з 13:00 до 16:30 спостерігався провал від 1 до -30 нТл. Тренд Y з 02:30 до 06:00 збільшувався від -23 до 10 нТл. З 06:00 до 14:00 мав місце глибокий провал з $10...20$ до -6 нТл. Після 14:00 й до 17:00 реєструвалося зменшення Y від 20 до 0 нТл. Тренд Z спочатку до 06:00 збільшувався до 20 нТл. Йому на зміну прийшов глибокий провал (від 20 до -22 нТл), що тривав близько 7 год. Далі спостерігалися помірні (до $10...15$ нТл) варіації тренду Z .

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПАРАМЕТРІВ ВАРІАЦІЙ РІВНЯ ГЕОМАГНІТНОГО ПОЛЯ

Часи запізнювання можливої реакції магнітного поля на вибух вулкана та видимі швидкості для шести груп характерних варіацій компонентів геомагнітного поля наведено у табл. 2. Найбільш чітко варіації спостерігалися для Y -компонента. За даними табл. 2 побудовано кореляційні поля «час запізнювання — відстань до вулкана» (рис. 14). Деякий розкид точок свідчить, зокрема, про те, що поширення збурень відбувалося не строго в радіальних напрямках. Далі кореляційні поля апроксимовано наступними лінійними залежностями:

$$\Delta t_1 = 4.157r + 5.1, \quad \sigma = 0.32 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9995, \quad (1)$$

$$\Delta t_2 = 11.14r + 4.6, \quad \sigma = 0.55 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9998, \quad (2)$$

$$\Delta t_3 = 16.62r + 5.0, \quad \sigma = 1.7 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9990, \quad (3)$$

$$\Delta t_4 = 33.13r + 4.6, \quad \sigma = 3.0 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9991, \quad (4)$$

$$\Delta t_5 = 53.11r + 6.1, \quad \sigma = 9.98 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9969, \quad (5)$$

$$\Delta t_6 = 83.02r + 9.0, \quad \sigma = 3.3 \text{ хв}, \quad R^2 = 0.9998. \quad (6)$$

Тут відстань дається у мегаметрах, а час — у хвилинах. За $r \rightarrow 0$ маємо $\Delta t_0 \approx 4.6...9.0$ хв. Такий час необхідний для поширення хвилі до іоносфери, точніше до динамо-області.

Із залежностей (1)—(6) і співвідношення

$$v = \left(\frac{d\Delta t}{dr} \right)^{-1}$$

Таблиця 2. Значення часу запізнювання та вдовоної швидкості збурень геомагнітного поля

Станція	Δt_1 , хв	v'_1 , м/с	Δt_2 , хв	v'_2 , м/с	Δt_3 , хв	v'_3 , м/с	Δt_4 , хв	v'_4 , м/с	Δt_5 , хв	v'_5 , м/с	Δt_6 , хв	v'_6 , м/с
API	8.5	4000	14	1560	19	1000	33	500	50	311	75	200
EYR	17	3875	38	1410	50	1033	97	505	155	310	245	194
CNB	21	4000	47	1500	73	933	130	507	208	312	322	200
ASP	27	3950	63	1500	92	1000	185	482	282	313	440	200
KDU	28	4060	67	1500	98	1004	190	505	305	311	475	199
GNG	34	4000	82	1500	119	1007	250	469	372	312	580	200
LRM	35	4018	85	1500	125	1000	245	500	390	313	615	198
KAK	38	3967	90	1540	135	1007	260	513	490	315	665	198
SHU	40	4070	100	1501	147	1004	285	509	460	313	720	199
DLT	43	3976	106	1501	156	1001	305	504	488	313	760	200
CKI	44	3978	110	1477	170	913	310	509	500	313	780	200
GAN	56	3990	140	1507	208	1002	410	502	660	311	1020	200

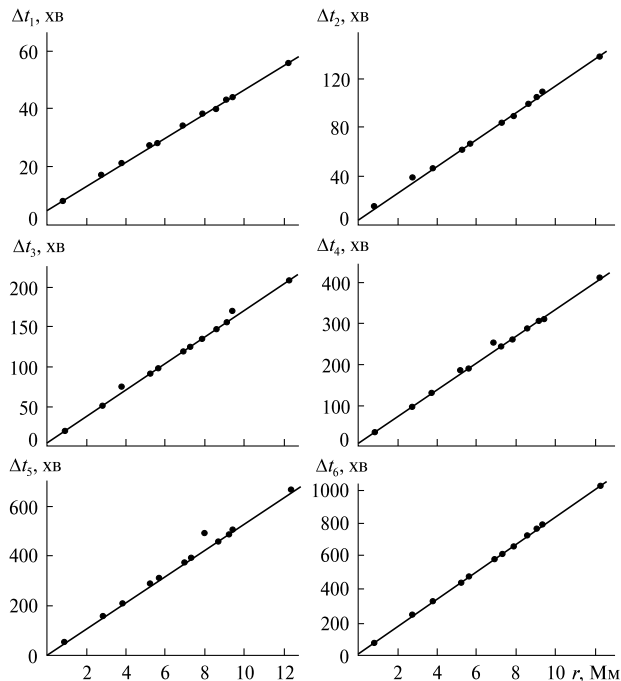


Рис. 14. Кореляційні поля «час запізнювання — відстань до вулкана»

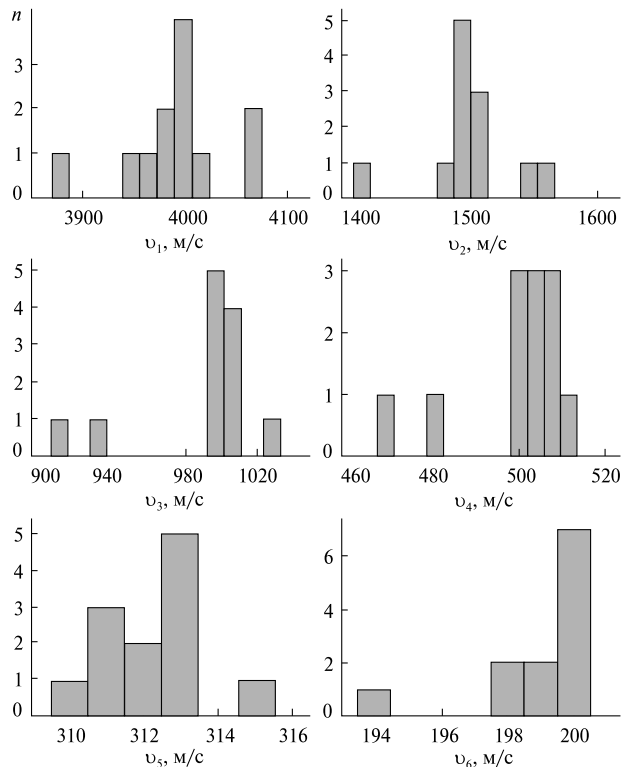


Рис. 15. Розподіл горизонтальних позірних швидкостей збурень, що супроводжували вибух вулкана Тонга

отримано такі середні швидкості: $v_1 \approx 4$ км/с, $v_2 \approx 1.5$ км/с, $v_3 \approx 1$ км/с, $v_4 \approx 503$ м/с, $v_5 \approx 314$ м/с та $v_6 \approx 201$ м/с. Ці значення швидкостей близькі до значень, що впливають із гістограм (рис. 15).

Видиму горизонтальну швидкість поширення збурень можна оцінити із співвідношення

$$v = \frac{r}{\Delta t - \Delta t_0},$$

де Δt_0 — час поширення вибухової хвилі до іоносферної динамо-області.

ОБГОВОРЕННЯ

Станція АРІ знаходиться найближче до вулкана Тонга. Перше збурення рівня Y -компонента мало місце в інтервалі часу 04:21—04:57, тобто час запізнювання дорівнював $\Delta t_0 \approx 6$ хв. Такий час необхідний для поширення стоячої акустичної хвилі до динамо-області іоносфери, де відбулася генерація цього магнітного ефекту. Важливо, що період збурення $T_0 \approx 4...4.5$ хв, тривалість

$\Delta T_0 \approx 32...36$ хв. Все це вказує на те, що магнітний ефект був згенерований за рахунок акустичного резонансу у порожнині Земля — динамо-область атмосфери, що виникав у полі стоячої акустичної хвилі від вибуху вулкана.

Оскільки станція АРІ знаходиться на відстані від вулкана $r \approx 840$ км, то радіус r_L магнітної силової трубки становить не менше 1000 км. Це означає, що магнітний ефект від акустичного резонансу міг спостерігатися і у магнітоспряженій області на відстанях порядку 1000 км від центра магнітної силової трубки. Дійсно, у магнітоспряженій області було виявлено коливання з тим же періодом T_0 та амплітудою 0.2 нТл тривалістю ΔT_0 [28, 43]. Важливо, що час запізнювання становив $\Delta t_0 \approx 6$ хв. Це означає, що збурення від станції АРІ до станції НОН передавалося магнітною силовою трубкою завдовжки 10 Мм зі швидкістю Альвена $v_A \approx 1$ Мм/с за час порядку 10 с, що набагато менше за Δt_0 . Додамо, що станція НОН знаходиться на відстані від центра

магнітної силової трубки порядку 900 км, що менше від r_L .

На збурення, зумовлене акустичним резонансом, наклалися й інші збурення з іншими часами запізнювання (див. табл. 2). Всього таких збурень могло бути шість. Як видно з табл. 2, для інших станцій також мало місце шість груп збурень геомагнітного поля. Важливо, що зі збільшенням відстані від вулкана час запізнювання зростає. Це, безперечно, свідчить на користь того, що збурення геомагнітного поля викликане саме вибухом вулкана. Проте потрібно мати на увазі, що час запізнювання реакції магнітного поля на вибух вулкана у період суббурі визначається не дуже надійно.

Значення швидкостей були близькі до 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313 і 200 м/с. Усі ці швидкості мають певний фізичний сенс. Перша та друга із них відповідають швидкості повільних МГД-хвиль [1]. Приблизно таку ж швидкість спостерігали під час пусків потужних ракет [3, 23]. Швидкість $v_3 \approx 1$ км/с характерна для вибухових хвиль. Саме таку швидкість виявили автори робіт [6, 24, 33, 34] під час вибуху вулкана Тонга. Швидкість v_4 — це швидкість атмосферних гравітаційних хвиль на висотах іоносфери [17, 42]. Швидкість $v_5 \approx 313$ м/с має хвиля Лемба, яка генерується при дуже значних енерговиділеннях (≥ 10 Мт ТНТ) та поширюється вздовж поверхні Землі практично без загасання та частково проникаючи на іоносферні висоти [5, 29, 32, 45]. Найменша швидкість $v_6 \approx 200$ м/с, мабуть, пов'язана з середньою швидкістю цунамі, яке після вибуху вулкана спостерігалось багатьма дослідниками та генерувало збурення в іоносфері [16, 37, 40, 41].

Таким чином, описані збурення геомагнітного поля, що мали місце 15 січня 2022 р. та були відсутні у контрольні дні, швидше за все, були викликані вибухом вулкана. За перенесення збурень відповідали хвилі різної фізичної природи: швидкі та повільні МГД-хвилі, вибухова хвиля,

атмосферна гравітаційна хвиля, хвиля Лемба та іоносферна хвиля від цунамі.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ

Аналіз результатів вимірювань на 12 магнітних станціях мережі INTERMAGNET показав таке.

1. У день вибуху вулкана Тонга варіації рівня усіх компонентів геомагнітного поля були більш немонотонними, ніж у контрольні дні. Більшим був і рівень флуктуацій. Все це свідчило про те, що вибух вулкана призвів до реєстрованого магнітного ефекту.

2. Збурення геомагнітного поля мало різні часи запізнювання. Виділено шість основних груп збурень. Важливо, що для кожної групи час запізнювання збільшувався при збільшенні відстані від вулкана до місця реєстрації.

3. Оцінено удавану швидкість поширення збурення для кожної групи. Виявлено такі швидкості: 4, 1.5, 1 км/с та 500, 313, 200 м/с. Перші дві швидкості властиві повільним МГД-хвилям, третя — вибуховій хвилі, четверта — атмосферній гравітаційній хвилі, п'ята — хвилі Лемба, а шоста — цунамі.

4. На найближчій станції АРІ також спостерігався магнітний ефект, згенерований за рахунок акустичного резонансу у полі стоячої акустичної хвилі. Період становив близько 4...4.5 хв, амплітуда — 2 нТл, а тривалість — 32...36 хв.

Автор вдячний М. Голуб за допомогу в обробці даних спостережень, а Є. Жданку за допомогу в оформленні рукопису.

Робота виконувалась за часткової підтримки держбюджетних НДР, заданих МОН України (номери держресурсації 0121U109881, 0121U109882 та 0122U001476). Дослідження проведено в рамках проекту Національного фонду досліджень України (номер 2020.02/0015 «Теоретичні та експериментальні дослідження глобальних збурень природного і техногенного походження в системі Земля — атмосфера — іоносфера»).

ЛІТЕРАТУРА

1. Сорокин В. М., Федорович Г. В. *Физика медленных МГД-волн в ионосферной плазме*. Москва: Энергоатомиздат, 1982. 135 с.
2. Черногор Л. Ф. Современные методы спектрального анализа квазипериодических и волновых процессов в ионосфере: особенности и результаты экспериментов. *Геомагнетизм и аэрономия*. 2008. **48**, № 5. С. 681—702.
3. Черногор Л. Ф. *Радиофизические и геомагнитные эффекты стартов ракет: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2009. 386 с.
4. Черногор Л. Ф. *Физика и экология катастроф: Монография*. Харьков: ХНУ имени В. Н. Каразина, 2012. 556 с.
5. Черногор Л. Ф. Фізичні ефекти у системі Земля — атмосфера — іоносфера — магнітосфера, викликані потужним вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 2. С. 54—77.
6. Черногор Л. Ф. Варіації повного електронного вмісту в іоносфері, викликані вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 3. С. 67—87.
7. Черногор Л. Ф., Голуб М. Ю. Великомасштабні збурення геомагнітного поля, що супроводжували потужний вибух вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37. С. 33—48.
8. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б. Область зниженої концентрації електронів у іоносфері, утвореної вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Кінематика і фізика небес. тіл*. 2023. **39**, № 4. С. 34—54.
9. Черногор Л. Ф., Милованов Ю. Б., Дорохов В. Л. Іоносферні ефекти ударної хвилі, згенерованої вибухом вулкана Тонга 15 січня 2022 р. *Вісн. Харків. нац. ун-ту ім. В. Н. Каразіна. Сер. «Радіофізика та електроніка»*. 2023. № 37.
10. Черногор Л. Ф., Шевелев М. Б. Статистичні характеристики вибухових хвиль у атмосфері, згенерованих супервулканом Тонга 15 січня 2022 р. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 6.
11. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. Significant Ionospheric Hole and Equatorial Plasma Bubbles After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *Space Weather*. 2022. **20**, № 7. id:e2022SW003101. DOI:10.1029/2022SW003101
12. Aa E., Zhang S.-R., Wang W., Erickson P. J., Qian L., Eastes R., Harding B. J., Immel T. J., Karan D. K., Daniell R. E., Coster A. J., Goncharenko L. P., Vierinen J., Cai X., Spicher A. Pronounced Suppression and X-Pattern Merging of Equatorial Ionization Anomalies After the 2022 Tonga Volcano Eruption. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. **127**, № 6. id:e2022JA030527. DOI:10.1029/2022JA030527
13. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *J. Volcanolog. Seismol.* 2022. **16**, № 4, P. 251—263. DOI:10.1134/S0742046322040029
14. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 10. id:e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827
15. Burt S. Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*. 2022. **77**, № 3. P. 76—81. DOI:10.1002/wea.4182
16. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 6. id:e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
17. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. Individual Wave Propagations in Ionosphere and Troposphere Triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai Underwater Volcano Eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*. 2022. **14**, № 9. id:2179. DOI:10.3390/rs14092179
18. Chernogor L. F. Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18—21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 12—13.
19. Chernogor L. F. Electrical Effects of the Tonga Volcano Unique Explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18—21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 79—80.
20. Chernogor L. F. Magnetospheric Effects That Accompanied the Explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18—21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 81—82.
21. Chernogor L. F. Magnetic Effects of the Unique Explosion of the Tonga Volcano. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18—21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts*. 2022. P. 89—90.

22. Chernogor L. F. The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. *Int. Sci. Conf. "Electronics and Applied Physics", APHYS 2022. 18–22 October, 2022. Kyiv, Ukraine.* 2022. P. 130–131.
23. Chernogor L. F., Blaunstein N. *Radiophysical and Geomagnetic Effects of Rocket Burn and Launch in the Near-the-Earth Environment.* Boca Raton, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. 542 с.
24. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. Ionospheric Effects accompanying the January 15, 2022 Tonga Volcano Explosion. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts.* 2022. P. 83–84.
25. Chernogor L. F., Shevelev M. B. Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. Book of Abstracts.* 2022. P. 85–86.
26. Harding B. J., Wu Y.-J.J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. Impacts of the January 2022 Tonga Volcanic Eruption on the Ionospheric Dynamo: ICON-MIGHTI and Swarm Observations of Extreme Neutral Winds and Currents. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 9, id:e2022GL098577. DOI:10.1029/2022GL098577
27. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. Preliminary Observations and Impact in Japan of the Tsunami Caused by the Tonga Volcanic Eruption on January 15, 2022. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. **179**. P. 1549–1560. DOI:10.1007/s00024-022-03058-0
28. Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y. et al. A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Earth Planets Space.* 2022. **74**. id:103. DOI:10.1186/s40623-022-01653-y
29. Kubota T., Saito T., Nishida K. Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science.* 2022. **377**, № 6601. P. 91–94. DOI:10.1126/science.abo4364
30. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Šepić J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Belikov I. B., Gubanova D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. Acoustic-Gravity Lamb Waves from the Eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai Volcano, Its Energy Release and Impact on Aerosol Concentrations and Tsunami. *Pure and Appl. Geophys.* 2022. **179**. P. 1533–1548. DOI:10.1007/s00024-022-03046-4
31. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 11, id:e2022GL099002. DOI:10.1029/2022GL099002
32. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. Rapid Conjugate Appearance of the Giant Ionospheric Lamb Wave Signatures in the Northern Hemisphere After Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098222. DOI:10.1029/2022GL098222
33. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science.* 2022. **377**, № 6601. P. 95–100. DOI:10.1126/science.abo7063
34. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I. Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. Supplementary materials for atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science.* 2022. **377**, № 6601. DOI:10.1126/science.abo7063
35. Otsuka S. Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324

36. Poli P., Shapiro N. M. Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 8. id:e2022GL098123
37. Ramirez-Herrera M. T., Coca O., Vargas-Espinosa V. Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga. *Pure and Applied Geophys.* 2022. **179**. P. 1117–1137. DOI:10.1007/s00024-022-03017-929
38. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 10. id:e2022GL098454.
39. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.* 2022. DOI:10.1002/essoar.10510482.1
40. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space.* 2022. **74**. id:61. DOI:10.1186/s40623-022-01614-5
41. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.* 2022. **9**. id:24. DOI:10.1186/s40562-022-00232-z
42. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.* 2022. **49**, № 7. id:e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
43. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.* 2022. **127**, № 7. id:e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
44. Yuen D. A., Scruggs M. A., Spera F. J., Zheng Y., Hu H., McNutt S. R., Thompson G., Mandli K., Keller B. R., Wei S. S., Peng Z., Zhou Z., Mulargia F., Tanioka Y. Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *Earthquake Res. Advances.* 2022. **2**, № 3. id:100134. DOI:10.1016/j.eqrea.2022.100134
45. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Frontiers in Astron. and Space Sci.* 2022. **9**. id:871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275

REFERENCES

1. Sorokin V. M., Fedorovich G. V. (1982). *The physics of slow MHD waves in the ionospheric plasma*. Moscow: Energoatomizdat.
2. Chernogor L. F. (2008). Advanced methods of spectral analysis of quasiperiodic wave-like processes in the ionosphere: Specific features and experimental results. *Geomagn. Aeron.*, **48**, № 5, 652–673. DOI:10.1134/S0016793208050101
3. Chernogor L. F. (2009). *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket engine burn: Monograph*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ.
4. Chernogor L. F. (2012). *Physics and ecology of the catastrophes*. Kharkiv: V. N. Karazin Kharkiv National University Publ. [in Russian].
5. Chernogor L. F. (2023) Physical effects of the January 15, 2022, powerful Tonga volcano explosion in the Earth — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. *Space Science and Technology.* 29(2). 54–77.
6. Chernogor L. F. (2023) Ionospheric total electron content variations caused by the Tonga volcano explosion of January 15, 2022. *Space Science and Technology.* 29(3). 67–87.
7. Chernogor L. F., Holub M. Yu. (2023). Large-scale geomagnetic field disturbances accompanied by the powerful explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* № 37, 33–48.
8. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B. (2023) Reduction in the electron density produced by the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Kinematics and Phys. Celestial Bodies.* 39(4). 34–54.
9. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2023). Ionospheric effects of the shock wave generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *Visnyk of V. N. Karazin Kharkiv National University. Ser. Radio Physics and Electronics.* № 37.
10. Chernogor L. F., Shevelev M. B. A statistical study of the explosive waves launched by the Tonga super-volcano on January 15, 2022. *Space Science and Technology.* 29(6).
11. Aa E., Zhang S.-R., Erickson P. J., Vierinen J., Coster A. J., Goncharenko L. P., Spicher A., Rideout W. (2022). Significant ionospheric hole and equatorial plasma bubbles after the 2022 Tonga volcano eruption. *Space Weather*, **20**(7), e2022SW003101. DOI:10.1029/2022SW003101

12. Aa E., Zhang S.-R., Wang W., Erickson P. J., Qian L., Eastes R., Harding B. J., Immel T. J., Karan D. K., Daniell R. E., Coster A. J., Goncharenko L. P., Vierinen J., Cai X., Spicher A. (2022). Pronounced suppression and X-pattern merging of equatorial ionization anomalies after the 2022 Tonga volcano eruption. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**(6), e2022JA030527. DOI:10.1029/2022JA030527
13. Adushkin V. V., Rybnov Y. S., Spivak A. A. (2022). Wave-related, electrical, and magnetic effects due to the January 15, 2022 catastrophic eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *J. Volcanolog. Seismol.*, **16**(4), 251–263. DOI:10.1134/S0742046322040029
14. Astafyeva E., Maletckii B., Mikesell T. D., Munaibari E., Ravanelli M., Coisson P., Manta F., Rolland L. (2022). The 15 January 2022 Hunga Tonga eruption history as inferred from ionospheric observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098827. DOI:10.1029/2022GL098827
15. Burt S. (2022). Multiple airwaves crossing Britain and Ireland following the eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai on 15 January 2022. *Weather. Special Issue: The January 2022 eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai*, **77**(3), 76–81. DOI:10.1002/wea.4182
16. Carvajal M., Sepúlveda I., Gubler A., Garreaud R. (2022). Worldwide signature of the 2022 Tonga volcanic tsunami. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(6), e2022GL098153. DOI:10.1029/2022GL098153
17. Chen C.-H., Zhang X., Sun Y.-Y., Wang F., Liu T.-C., Lin C.-Y., Gao Y., Lyu J., Jin X., Zhao X., Cheng X., Zhang P., Chen Q., Zhang D., Mao Z., Liu J.-Y. (2022). Individual wave propagations in ionosphere and troposphere triggered by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai underwater volcano eruption on 15 January 2022. *Remote Sensing*, **14**(9), 2179. DOI:10.3390/rs14092179
18. Chernogor L. F. (2022). Effects of the Tonga volcano explosion on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 12–13.
19. Chernogor L. F. (2022). Electrical effects of the Tonga volcano unique explosion on January 15, 2022. *International Conference "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 79–80.
20. Chernogor L. F. (2022). Magnetospheric effects that accompanied the explosion of the Tonga Volcano on January 15, 2022. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 81–82.
21. Chernogor L. F. (2022). Magnetic effects of the unique explosion of the Tonga volcano. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 89–90.
22. Chernogor L. F. (2022). The Tonga super-volcano explosion as a subject of applied physics. *Int. Sci. Conf. "Electronics and Applied Physics", APHYS 2022*. 18–22 October, 2022. Kyiv, 130–131.
23. Chernogor L. F., Blaunstein N. (2013). *Radiophysical and geomagnetic effects of rocket burn and launch in the near-the-Earth environment*. Boca Raton, London, New York: CRC Press. Taylor & Francis Group.
24. Chernogor L. F., Mylovanov Y. B., Dorohov V. L. (2022). Ionospheric effects accompanying the January 15, 2022 Tonga volcano explosion. *Int. Conf. "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 83–84.
25. Chernogor L. F., Shevelev M. B. (2022). Statistical characteristics of atmospheric waves, generated by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. *International Conference "Astronomy and Space Physics in the Kyiv University" in part of the World Science Day for Peace and Development*. October 18–21, 2022. Kyiv, Ukraine. *Book of Abstracts*, 85–86.
26. Harding B. J., Wu Y.-J. J., Alken P., Yamazaki Y., Triplett C. C., Immel T. J., Gasque L. C., Mende S. B., Xiong C. (2022). Impacts of the January 2022 Tonga volcanic eruption on the ionospheric dynamo: ICON-MIGHTI and swarm observations of extreme neutral winds and currents. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(9), e2022GL098577. DOI:10.1029/2022GL098577
27. Imamura F., Suppasri A., Arikawa T., Koshimura S., Satake K., Tanioka Y. (2022). Preliminary observations and impact in Japan of the tsunami caused by the Tonga volcanic eruption on January 15, 2022. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1549–1560. DOI:10.1007/s00024-022-03058-0
28. Iyemori T., Nishioka M., Otsuka Y., et al. (2022). A confirmation of vertical acoustic resonance and field-aligned current generation just after the 2022 Hunga Tonga Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Earth Planets Space*, **74**, id:103. DOI:10.1186/s40623-022-01653-y
29. Kubota T., Saito T., Nishida K. (2022). Global fast-traveling tsunamis driven by atmospheric Lamb waves on the 2022 Tonga eruption. *Science*, **377**(6601), 91–94. DOI:10.1126/science.abo4364
30. Kulichkov S. N., Chunchuzov I. P., Popov O. E., Gorchakov G. I., Mishenin A. A., Perepelkin V. G., Bush G. A., Skorokhod A. I., Vinogradov Yu. A., Semutnikova E. G., Šepić J., Medvedev I. P., Gushchin R. A., Kopeikin V. M., Be-

- likov I. B., Gubanov D. P., Karpov A. V., Tikhonov A. V. (2022). Acoustic-gravity lamb waves from the eruption of the Hunga-Tonga-Hunga-Hapai volcano, its energy release and impact on aerosol concentrations and tsunami. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1533–1548. DOI:10.1007/s00024-022-03046-4
31. Le G., Liu G., Yizengaw E., Englert C. R. (2022). Intense equatorial electrojet and counter electrojet caused by the 15 January 2022 Tonga volcanic eruption: Space- and ground-based observations. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(11), e2022GL099002. DOI:10.1029/2022GL099002
32. Lin J.-T., Rajesh P. K., Lin C. C. H., Chou M.-Y., Liu J.-Y., Yue J., Hsiao T.-Y., Tsai H.-F., Chao H.-M., Kung M.-M. (2022). Rapid conjugate appearance of the giant ionospheric Lamb wave signatures in the northern hemisphere after Hunga-Tonga Volcano Eruptions. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098222. DOI:10.1029/2022GL098222
33. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniiega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I.-Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601), 95–100. DOI:10.1126/science.abo7063
34. Matoza R. S., Fee D., Assink J. D., Iezzi A. M., Green D. N., Kim K., Toney L., Lecocq T., Krishnamoorthy S., Lalande J. M., Nishida K., Gee K. L., Haney M. M., Ortiz H. D., Brissaud Q., Martire L., Rolland L., Vergados P., Nippress A., Park J., Shani-Kadmiel S., Witsil A., Arrowsmith S., Caudron C., Watada S., Perttu A. B., Taisne B., Mialle P., Le Pichon A., Vergoz J., Hupe P., Blom P. S., Waxler R., De Angelis S., Snively J. B., Ringler A. T., Anthony R. E., Jolly A. D., Kilgour G., Averbuch G., Ripepe M., Ichihara M., Arciniiega-Ceballos A., Astafyeva E., Ceranna L., Cevuard S., Che I. Y., De Negri R., Ebeling C. W., Evers L. G., Franco-Marin L. E., Gabrielson T. B., Hafner K., Harrison R. G., Komjathy A., Lacanna G., Lyons J., Macpherson K. A., Marchetti E., McKee K. F., Mellors R. J., Mendo-Pérez G., Mikesell T. D., Munaibari E., Oyola-Merced M., Park I., Pilger C., Ramos C., Ruiz M. C., Sabatini R., Schwaiger H. F., Tailpied D., Talmadge C., Vidot J., Webster J., Wilson D. C. (2022). Supplementary Materials for Atmospheric waves and global seismoacoustic observations of the January 2022 Hunga eruption, Tonga. *Science*, **377**(6601). DOI:10.1126/science.abo7063
35. Otsuka S. (2022). Visualizing Lamb waves from a volcanic eruption using meteorological satellite Himawari-8. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098324. DOI:10.1029/2022GL098324
36. Poli P., Shapiro N. M. (2022). Rapid characterization of large volcanic eruptions: Measuring the impulse of the Hunga Tonga Ha'apai explosion from teleseismic waves. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(8), e2022GL098123.
37. Ramírez-Herrera M. T., Coca O., Vargas-Espinosa V. (2022). Tsunami effects on the coast of Mexico by the Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano eruption, Tonga. *Pure and Appl. Geophys.*, **179**, 1117–1137. DOI:10.1007/s00024-022-03017-9
38. Schnepf N. R., Minami T., Toh H., Nair M. C. (2022). Magnetic signatures of the 15 January 2022 Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(10), e2022GL098454.
39. Soares G., Yamazaki Y., Matzka J. (2022). Localized geomagnetic disturbance due to ionospheric response to the Hunga Tonga eruption on January 15, 2022. *Geophys. Res. Lett.*, DOI:10.1002/essoar.10510482.1
40. Tanioka Y., Yamanaka Y., Nakagaki T. (2022). Characteristics of the deep sea tsunami excited offshore Japan due to the air wave from the 2022 Tonga eruption. *Earth, Planets and Space*, **74**, 61. DOI:10.1186/s40623-022-01614-5
41. Terry J. P., Goff J., Winspear N., Bongolan V. P., Fisher S. (2022). Tonga volcanic eruption and tsunami, January 2022: globally the most significant opportunity to observe an explosive and tsunamigenic submarine eruption since AD 1883 Krakatau. *Geosci. Lett.*, **9**, 24. DOI:10.1186/s40562-022-00232-z
42. Themens D. R., Watson C., Žagar N., Vasylykevych S., Elvidge S., McCaffrey A., Prikryl P., Reid B., Wood A., Jayachandran P. T. (2022). Global propagation of ionospheric disturbances associated with the 2022 Tonga volcanic eruption. *Geophys. Res. Lett.*, **49**(7), e2022GL098158. DOI:10.1029/2022GL098158
43. Yamazaki Y., Soares G., Matzka J. (2022). Geomagnetic detection of the atmospheric acoustic resonance at 3.8 mHz during the Hunga Tonga eruption event on 15 January 2022. *J. Geophys. Res.: Space Phys.*, **127**(7), e2022JA030540. DOI: 10.1029/2022JA030540
44. Yuen D. A., Scruggs M. A., Spera F. J., Zheng Y., Hu H., McNutt S. R., Thompson G., Mandli K., Keller B. R., Wei S. S., Peng Z., Zhou Z., Mulargia F., Tanioka Y. (2022). Under the surface: Pressure-induced planetary-scale waves, volcanic lightning, and gaseous clouds caused by the submarine eruption of Hunga Tonga-Hunga Ha'apai volcano. *Earthquake Res. Advs*, **2**(3), 100134. DOI:10.1016/j.eqrea.2022.100134

45. Zhang S.-R., Vierinen J., Aa E., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Rideout W., Coster A. J., Spicher A. (2022). 2022 Tonga volcanic eruption induced global propagation of ionospheric disturbances via Lamb waves. *Frontiers in Astron. and Space Sci.*, **9**, 871275. DOI:10.3389/fspas.2022.871275

Стаття надійшла до редакції 05.01.2023

Після доопрацювання 28.02.2023

Прийнято до друку 01.03.2023

Received 05.01.2023

Revised 28.02.2023

Accepted 01.03.2023

L. F. Chernogor, Head of the Department of Space Radiophysics, Distinguished Professor of the V. N. Karazin Kharkiv National University, Honored Worker of Science and Technology of Ukraine, laureate of Ukrainian Soviet Socialist Republic State Prize in Science and Technology (1989), twice a laureate of the Prize of the Council of Ministers of the USSR, Dr. Sci. in Phys. & Math., Professor
ORCID ID: 0000-0001-5777-2392

E-mail: Leonid.F.Chernogor@gmail.com

V. N. Karazin Kharkiv National University

4 Svoboda Sq., Kharkiv, 61022 Ukraine

GLOBAL VARIATIONS IN THE GEOMAGNETIC FIELD CAUSED BY THE EXPLOSION OF THE TONGA VOLCANO ON JANUARY 15, 2022

The explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022, led to significant disturbances in the Earth (lithosphere, World Ocean) — atmosphere — ionosphere — magnetosphere system. The purpose of this paper is to present the results of a study of global variations in the geomagnetic field caused by the explosion of the Tonga volcano on January 15, 2022. To analyze the variations of the X -, Y -, and Z -components of the geomagnetic field, registrations at 12 stations of the worldwide INTERMAGNET network were used. When processing the time series, the trend calculated over 60 min with a step of 1 min was first subtracted, and then a system spectral analysis was applied. An analysis of the state of space weather made it possible to choose January 13 and 17, 2022, as reference days. An analysis of time variations in the level of all components of the geomagnetic field showed the following. On the day of the volcano explosion, approximately after 04:21, there were significant variations in the level of all components, but the largest variations were observed in the level of the Y -component. The shortest time delay was 6 min. At the same time, quasi-periodic variations of the geomagnetic field with a period of 4...4.5 min and an amplitude of ~ 2 nT were caused by acoustic resonance in the field of a standing acoustic wave generated by the explosion of the volcano. In addition, six groups of possible disturbances stimulated by the volcano explosion were found. It is important that in each group, the time delay of disturbances increased with increasing distance between the volcano and the station. It was found that the disturbances were transported at speeds close to 4, 1.5, 1 km/s and 500, 313, and 200 m/s. Such velocities are characteristic of slow MHD waves, a blast wave, an atmospheric gravity wave, a Lamb wave, and an ionospheric tsunami wave.

Keywords: Tonga volcano, explosion, magnetic effect, time delay, apparent velocity, MHD wave, blast wave, atmospheric gravity wave, tsunami.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.106>

УДК 580.7:581.44 (477)

Я. Д. ХОРКАВЦІВ¹, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

ORSID 0000-0002-9971-6863

E-mail: ecomorphogenesis@gmail.com

О. В. ЛОБАЧЕВСЬКА¹, зав. відділу екоморфогенезу рослин, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

ORSID 0000-0001-7141-4153

E-mail: ecobryologia@gmail.com

Н. Я. КИЯК¹, старш. наук. співроб., канд. біол. наук

ORSID 0000-0001-8965-9060

E-mail: kyyak_n@i.ua

Є. Л. КОРДЮМ², зав. відділу клітинної біології та анатомії, д-р біол. наук, проф.

ORSID 0000-0002-4634-9617

E-mail: cellbiol@ukr.net

¹Інститут екології Карпат Національної академії наук України

вул. Козельницька 4, Львів, Україна, 79026

²Інститут ботаніки ім. М. Г. Холодного Національної академії наук України

вул. Терещенківська 2, Київ, Україна, 01601

ВПЛИВ МЕТИЛЮВАННЯ ДНК НА ГРАВІЧУТЛИВІСТЬ МОХІВ

Сила тяжіння є важливим фактором росту та розвитку рослин у природному середовищі. Вплив реальної або імітованої мікрогравітації індукує стресову реакцію рослин, яка відбувається унаслідок диференціації клітин та зміни експресії генів при метилуванні ДНК.

*Досліджено вплив інгібітора метилування ДНК 5-азацитидину (5-аза) на стадії перцепції та трансдукції гравісигналу у гравітропізм, модифікацію ізоферментних спектрів пероксидази протонемі *Physcomitrium patens* (Hedw.) Mitt. в умовах зміненої гравітації, фенотип галузження й варіабельність гравітропічних кутів латеральних галузок *Polytrichum arcticum* Sw. ex Brid.*

Встановлено зв'язок між метилуванням і гравііндукцією та визначено вплив метилування на стадії сприйняття і реалізації гравісигналу. Деметилування, зумовлене дією 5-аза, знижує гравічутливість столонів — менше на стадії перцепції і більше під час трансдукції гравісигналу. Аналіз розвитку гравітропізму після застосування інгібітора метилування свідчить про збереження клітинної пам'яті про сигнал незалежно від стадії гравістимуляції. Однак тривалість пам'яті коротша на стадії перцепції і довша на стадії трансдукції, що впливає на швидкість відновлення гравітропічного росту. Диференційна дія метилування на гравііндукцію досліджується як епігенетично регульований процес, що модифікує морфологічні відмінності тропізму в умовах мікрогравітації і зміненої сили тяжіння на Землі.

*Резистентність до впливу гравітації залежить від метаболічних процесів у середовищі клітинної стінки. У біогенезі та механічній стійкості стінки важливу роль відіграє активність пероксидази. Показано, що експресія пероксидази та зміна ізоферментних спектрів ферменту у протонемі *P. patens* відбулися унаслідок деметилування ДНК. Епігенетичний поліморфізм пероксидази зв. умовах зміненої гравітації розглядається як вірогідний чинник індивідуальної стійкості рослинного організму.*

Цитування: Хоркавців Я. Д., Лобачевська О. В., Кияк Н. Я., Кордюм Є. Л. Вплив метилування ДНК на гравічутливість мохів. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 4 (143). С. 106—118. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.106>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Локальне місце галузження протонемі і просторова орієнтація бокових галузок *P. arcticum* залежать від гравітаційного вектора, є передумовою фенотипної мінливості та регулюються епігенетично, метилюванням/деметилюванням ДНК.

Ключові слова: метилювання ДНК, 5-азацитидин, адаптація, протонема, гравітропізм, галузження.

ВСТУП

Сила тяжіння є постійним фактором природного середовища, поляризаційну дію якого рослини використовують для корекції свого положення і формування габітусу. Система галузження і морфологічна форма гаметофіту мохів, закладання спорофіту і форма коробочки спорогонів перебувають під комплексним контролем світла і гравітації та взаємодії фото- і гравітропізму [6, 10].

Одним з регуляторних механізмів пластичності розвитку мохів у природному середовищі та їхньої первинної адаптації до екстремальних умов є епігенетичні зміни стану метилювання ДНК [8]. Метилювання ДНК — динамічний процес і стабільна епігенетична ознака, що відіграє важливу роль у передачі зовнішнього сигналу і зміні генної експресії та зберігається як стійка пам'ять у клітинних поділах [9, 27, 31, 32].

Досліджуючи вплив гравітації на розвиток бріофітів, у їхньому онтогенезі виявили фенотипні зміни і гравіморфози, що сформувалися у стресових умовах середовища завдяки епігенетичній регуляції гормональної активності [2, 6, 11, 36]. На основі аналізу гравітропізму протонемі залежно від метилювання ДНК було визначено, що реорієнтація гравітропного росту (після гравістимуляції) відбувається за участю клітинної пам'яті — феномену, який є частиною епігенетичної системи регуляції, зокрема посттрансляційних змін ДНК. Епігенетична пам'ять, як природний механізм, розширює варіації фенотипних ознак у відповідь на постійні флуктуації природного середовища, якого рослини не можуть уникнути через прикріпленій спосіб життя [8, 9, 32, 37]. Ряд досліджень підтверджують зміни рівня та структури метилювання ДНК залежно від біотичного та різних типів абіотичного стресу — посушливість, засолення, радіаційне опромінення різної потужності і тривалості [22, 33, 34]. Молекулярні компоненти, що контролюють посттранскрипційні зміни регуляції геному, визначено для різних груп організмів, менше для рослин, переважно

на прикладі *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh. [32], а даних про участь гравітації як поляризаційного екологічного фактора в епігенетичній регуляції розвитку немає взагалі.

Експерименти в Космосі стали засобом для вивчення впливу гравітації на модифікацію клітинної стінки рослин як органу протидії гравітаційній силі на Землі [15, 16, 28]. Визначено, що метаболізм клітинних стінок є гравітаційно-чутливим процесом, а в умовах космічного польоту, коли зменшується жорсткість стінки, активність пероксидази змінюється під час синтезу лігніну коренів, наприклад у проростків *Arabidopsis thaliana*, *Pisum sativum* [7, 17, 24]. Відомо, що підвищення загальної пероксидазної активності сприяє розм'якшенню клітинної стінки і зменшує її жорсткість в ділянці гравітропного згину, де стінка повинна бути гнучкою [18, 19, 26].

Зміну механічної пружності та розм'якшення клітинної стінки під час орбітального польоту розглядають як адаптивну функцію через невикористання механічних властивостей стінки у мікрогравітації. Реакцією, що віддзеркалює біогенез клітинної стінки, є активність ферментів модифікаторів стінки, зокрема і пероксидаз, поліфункціонального фермента, задіяного у механічній стійкості клітинних стінок рослин [3, 7, 42].

У зв'язку з участю метилювання в диференціації та розвитку рослин, яке впливає на залежні від функцій геному процеси без змін у послідовності ДНК, було проаналізовано гравічутливість гаметофіту мохів та активність пероксидази залежно від дії 5-азацитидину — інгібітора стану метилювання.

МАТЕРІАЛИ І МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

Об'єктом досліджень були види мохів *Physcomitrium patens* (Hedw.) Mitt. із Львівської обл. і *Polytarichum arcticum* Sw. ex Brid. з Антарктики.

В експериментальних дослідженнях використали стерильну лабораторну культуру, яку отримали зі спор або регенерацією листків гаметофітів. Культури вирощували стерильно в чашках

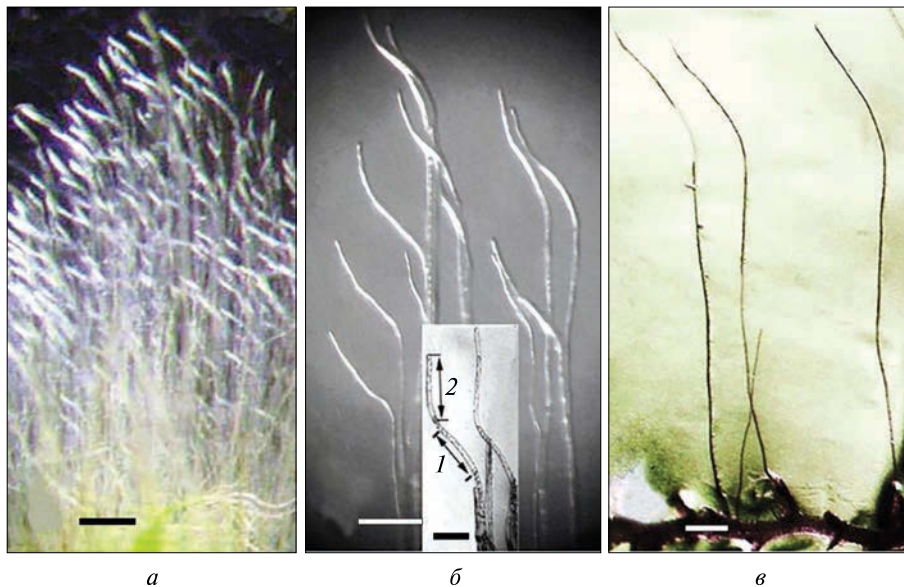


Рис. 1. Фрагмент протонемної дернини *Physcomitrium patens*: *a* — stolони у дернині по-різному реагують на гравітимуляцію: відновили першопочатковий напрям гравітропізму, не відновили, не прореагували на стимуляцію; *б* — зразки stolонів, що відновили гравітропізм, стрілка 1 на вставці — ріст після гравістимуляції при температурі +2 °С (клітини пам'ятали про гравісигнал, і протонема росла відповідно до вектора гравітації); 2 — ріст в умовах культивування +20 °С (stolони відновили початковий напрям гравітропізму). Довжина рістка 1 є одним з параметрів визначення тривалості збереження клітинної пам'яті про векторну дію гравітації. Фрагмент *в* — зразки stolонів, що не відновили гравітропізм; довжина штриха 50 мкм (*a, б, в*); довжина штриха на вставці — 30 мкм

Петрі на 0.75 % агаризованому середовищі Кюпа II у фітотроні: фотоперіод — 16 год, освітлення — 40 мкмоль м⁻²с⁻¹, температура — 20 °С, вологість — 90 %. Визначили гравічутливість протонеми *P. arcticum* з Антарктики та галуження *P. patens* після дії 5-азацитину. Гравістимуляцію і клиностакування протонеми провели аналогічно, як описано у попередніх роботах [6, 12].

В екстрактах 1.0...1.5 місячних гаметофорів *P. patens* визначали активність пероксидази і аналізували спектрофотометричний спектр ізоформ фермента після впливу 5-азацитину на гравістимульовану протонему та після клиностакування [8].

Гістологічну реакцію з бензидином застосовували для аналізу ізоформ пероксидази на поліакриламідному гелі з використанням диск-електрофорезу [42]. Молекулярну масу (ММ) пероксидазних форм *P. patens* зіставляли із стандартним маркерним зразком білків.

Для з'ясування феномену клітинної пам'яті про збереження гравістимулу використали ін-

гібітор метилювання ДНК 5-азацитин [39]. Визначили температурні умови ($t = +2...4$ °С), що блокували ріст протонеми, але не впливали на сприйняття стимулу. Протонему в горизонтально розміщених чашках на холоді обробляли 5-азацитином перед гравістимуляцією (на стадії перцепції сигналу) і після гравістимуляції (на стадії трансдукції гравісигналу). Після того переносили чашки з протонемою в умови 20...22 °С і змінювали положення чашок на вертикальне (для гравістимуляції) або використовували клиностакування.

В одному варіанті дослідів у стерильні чашки Петрі з 8-денною гравітропною протонемою *P. patens* заливали 50-мкМ розчин 5-азацитину. Чашки у темних пакетах клали горизонтально у холодильну камеру при +2 °С на 5 год для гравііндукції. Зливши розчин, чашки з протонемою промивали 3...5 разів дистильованою водою і ставили вертикально при кімнатній температурі 22 °С на 5 год для активації гравітропізму. Через 5 год аналізували гравітропний ріст апікальних

клітин протонеми: довжину ростка, що утворився після гравістимуляції на холоді і величину гравітропного кута. Визначивши довжину ростка і знаючи швидкість росту протонеми, оцінили тривалість збереження клітинної пам'яті про гравістимул.

В іншому варіанті розчин 5-азацитидину додавали у чашки з протонемою через 5 год після її гравістимуляції на холоді. Решту процедур виконували так само, як у попередньому варіанті, змінюючи положення чашок відносно горизонтальної площини і вектора гравітації. У контролі протонему не обробляли інгібітором метилювання, аналіз проводили згідно з протоколом досліджу.

У кожному варіанті проаналізували по 200 гравітропних столонів протонеми, які вибирали стохастично із 12 окремих дернин, що росли у трьох чашках. Досліди повторювали двічі, а отримані результати опрацьовували статистично, використовуючи програми Microsoft Excel (Microsoft Corp., Redmond, Washington, USA).

РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Сила тяжіння є вирішальним екологічним фактором для росту вищих рослин, зокрема гравітропізм модулює орієнтацію росту відповідно до вектора сили тяжіння, унаслідок чого розвивається позитивний гравітропізм коренів і негативний — пагонів. В умовах мікрогравітації тропізму не виявлено, тим не менше рослини адаптуються до зміни гравітаційної сили і успішно завершують повний життєвий цикл на космічних орбітальних станціях [28—30, 40].

Гравітропну відповідь розділяють на три етапи: сприйняття сигналу, трансдукцію і ростову реакцію, хоча деякі дослідники виділяють ще інші етапи у перцепції гравісигналу [4, 46, 47, 50]. Проаналізовано утворення гравітропного згину протонеми *Physcomitrium patens* залежно від впливу інгібітора метилювання 5-азацитидину на стадії сприйняття і трансдукції гравістимулу.

Встановлено, що унаслідок перцепції гравісигналу на холоді деякий час частина столонів росла завдяки збереженню пам'яті про вектор стимулу (рис. 1, а, б, 1, в). В умовах 20 °С утворився новий згин, і гравітропізм ростків відно-

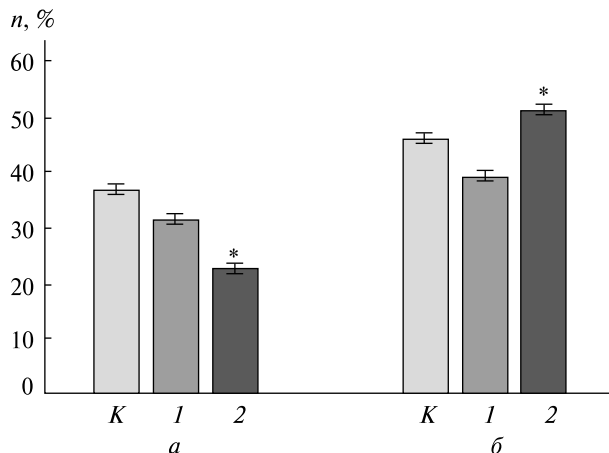


Рис. 2. Характер гравітропного росту апікальних клітин протонеми *Physcomitrium patens* після впливу 5-азацитидину; гравістимуляцію провели на холоді, $t = 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ (n — частка гравітропних столонів): а — гравітропізм протонеми після деметилювання відновився; б — не відновився (К — контроль, I — 5-аза + гравістимуляція, 2 — гравістимуляція + 5-аза). Проаналізовано по 200 столонів у варіантах а і б. Зірочкою позначено статистично достовірну різницю між експериментальними зразками при $p < 0.001$

вився (рис. 1, б, 2), або напрямок росту не змінився (рис. 1, в). Відмінності у рості були показником реакції протонеми на гравістимуляцію на холоді.

У першому варіанті, коли 5-азацитидин застосували перед гравістимуляцією, на стадії перцепції, порівняно з контролем зменшився відсоток клітин, що відновили і не відновили гравітропний ріст (рис. 2). Якщо звернути увагу на столони, що відновили гравітропізм (рис. 2, а), їхня довжина згину була більшою (рис. 3, а), ніж у контролі, тобто клітини довше пам'ятали про вектор гравістимулу. На стадії перцепції таких столонів була третина — 31.3 %.

Якщо інгібітором метилювання обробили протонему після гравістимуляції, на стадії індукції ростової реакції, кількість столонів, що відновили гравітропізм, також істотно зменшилася — їх було 22 % (рис. 2, а), менше ніж на стадії перцепції. Зате збільшився відсоток апікальних клітин, що не відновили гравітропний згин. Таких столонів було 51.1 % порівняно з 39.4 % на стадії перцепції і 45.9 % у контролі (рис. 2, б), тобто

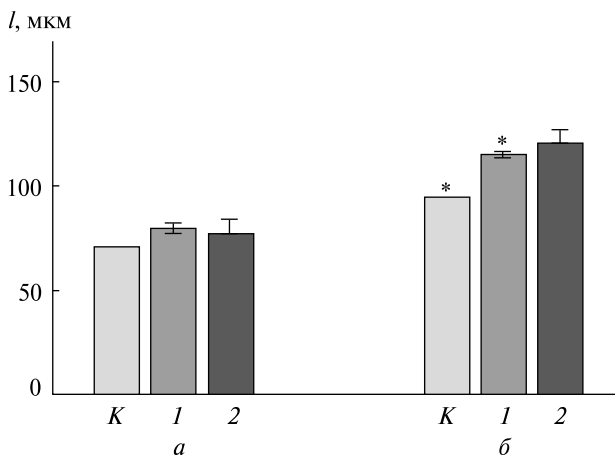


Рис. 3. Довжина згину і гравітропна реакція столонів *Physcomitrium patens*, залежно від впливу 5-азацитидину на метилювання основ ДНК на стадії перцепції і трансдукції гравісигналу (K — контроль, 1 — 5-аза + гравістимуляція, 2 — гравістимуляція + 5-аза); $n = 200$ у варіанті а і б. Примітка: * — статистично достовірна різниця між контролем і експериментальним зразком при $p < 0.05$

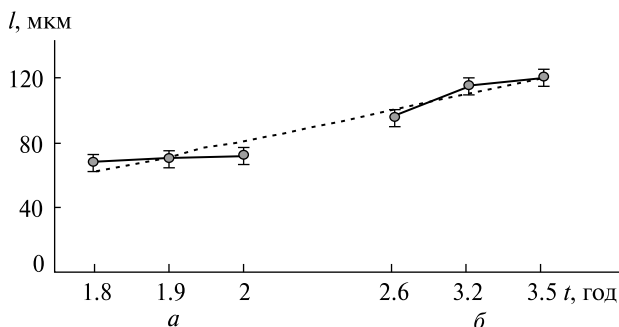


Рис. 4. Тривалість збереження клітинної пам'яті про дію гравістимулу під впливом 5-азацитидину, як похідна довжини гравітропних ростків *Physcomitrium patens* та швидкості їхнього росту; швидкість росту 3.6 мкм/год, $n = 200$

їхня клітинна пам'ять про дію гравітації на холоді також була тривалішою. Отже, незалежно від стадії гравііндукції ростова реакція-відповідь клітин протонеми на деметилювання подібна, а відновлення гравітропізму сповільнене (рис. 2, а).

Відповідно до показників довжини гравітропного згину (рис. 1, а, І; б) і швидкості росту протонеми розраховано час збереження клітинної

пам'яті про гравістимул (рис. 4). Після зміни стану метилювання на стадії перцепції клітинна пам'ять була коротшою, ніж на стадії трансдукції. Але на стадії трансдукції, зокрема для столонів, що не відновили гравітропізм, зв'язок між клітинною пам'яттю і деметилюванням проявлявся чіткіше — пам'ять про дію гравістимулу і тривалість росту були значно довшими. Однак за умови коротшої клітинної пам'яті гравітропізм поновлювався швидше, тоді як наслідком довшої пам'яті стало повільне відновлення гравітропного росту. Не виключено, що такі реакції-відповіді на дію метилювання у природному середовищі у різний час і у різних місцях можуть виявитися найбільш пристосованими до специфічних умов.

Після клиностакування гравітропний згин апікальних клітин виражений слабо, ріст столонів переважно спрямований відповідно до напрямку відцентрової сили. Таким чином, втрата поляризаційної дії гравітації під час клиностакування, що безпосередньо пов'язано з полярним транспортом фітормонів [23], істотно вплинула на епігенетично зумовлену тривалість пам'яті про орієнтацію росту протонеми і є ще одним підтвердженням значимості гравітації у гетерогенному природному середовищі.

Отже, метилювання сприяло збереженню пам'яті про гравістимул на обох етапах — і гравіперцепції, і трансдукції, що підсилить властиву для мохів природну мінливість гравічутливості. Зміни метилювання ДНК можуть вплинути на різні параметри гравізалежного росту рослин та ініціювати морфологічну мінливість кутів латеральних галузок, від чого залежить ріст і просторова орієнтація органів, наприклад в умовах водного чи температурного стресу, або вітрових буревіїв. У стресових умовах це додаткова можливість рослин відновити автотропний ріст, як дію на абіотичні чинники [13, 44, 49]. Стадії гравіреакцій виявилися під контролем епігенетичних механізмів, що сприяло фенотипній пластичності гравітропізму. Зважаючи на те, що загальне метилювання ДНК є потенційним біомаркером розвитку [32, 46], епігенетичні системи контролюють варіабельність морфогенезу в екстремальних умовах природного середовища,

і у мінливих природних умовах є важливим елементом адаптивної стратегії рослин.

Для різновікових дернин 7- і 21-денної протонемі *Physcomitrium patens* після дії інгібітора метилювання ДНК істотної різниці у гравітропізмі не виявили, однак сигнал про гравііндукцію у молодшій протонемі зберігався довше, ніж у 21-денній. Можливо, зміни у метилюванні ДНК зумовлені старінням клітин і сповільненням метаболізму [11, 31, 39]. За даними досліджень активності ядерної ДНК не виявлено різниці між контролем і деметилюваними зразками. Так, для ртуть-резистентних клонів моху *Tortula caucasica* Broth. визначення вмісту ДНК з поєднанням ДНКаз 1 свідчить про незначне збільшення некодувальної ДНК [12]. Отже, якщо зміну положення рослини відносно вектора гравітації розглядати як абіотичний стрес, пам'ять про його дію реалізується епігенетично. Однак, незважаючи на виключну роль метилювання ДНК хроматину для розвитку рослин, клітина сама може регулювати активність епігенетичної системи.

Особливою реакцією рослин на гравітацію, яку можна поставити в один ряд з гравітропізмом, є механічна стійкість до сили тяжіння. Завдяки збільшенню жорсткості клітинної стінки та модифікації анізотропії росту рослини можуть протистояти силі гравітації. Це зіграло роль в еволюції наземних рослин, сприяло формуванню адаптивних реакцій на механічні навантаження, зокрема різних форм росту, насамперед — вертикального [18, 19, 26].

Модифікація метаболізму компонентів клітинної стінки залежить від експресії пероксидаз, що впливає на фенотип верхівкових клітин з апікальним ростом [26, 28, 35]. Визначено селективну експресію генів пероксидази проростків *Arabidopsis thaliana* і утворення коротших кореневих волосків в умовах мікрогравітації, які ефективніше поглинають поживні речовини. Це важливо для адаптації до умов невагомості [20, 48].

Відмінності в активації пероксидази гравістимульованої протонемі *Physcomitrium patens*, порівняно з контролем і рослинами після клиностакування, могли бути наслідком змін у метилюванні ДНК за участю 5-азацитидину. Аналіз результатів, наведених у табл. 1, свідчить, що ак-

тивність пероксидази після впливу 5-азацитидину збільшувалася і через 5 год після гравістимуляції була більшою, ніж після клиностакування. Можемо допустити, що вплив інгібітора на метилювані сайти ДНК призвів до активації генів пероксидази і синтезу ферменту. 5-азацитидин подіє як захисний чинник у стресовій ситуації та індуктор пероксидази, функціональні особливості якої можуть бути використані у структурній перебудові клітинних стінок під час гравістимуляції і гравітропізму. Короткочасне клиностакування не призвело до підвищення активності ферменту, навпаки, зменшився вплив 5-азацитидину на експресію пероксидази. Можливо, це відбулося тому, що прямолінійний напрям росту і, очевидно, метаболізм компонентів клітинної стінки за цей час не змінилися. Окрім того, між різними функціями пероксидази та факторами, що можуть на них впливати, є баланс, і притому чимало з них є невизначеними, або й антагоністичними реакціями [25, 35, 42]. Так, активність аскорбат-пероксидази істотно підвищувалася у *Pohlia nutans* після клиностакування протонемі, як реакція на стрес, на відміну від інших пероксидаз, активність яких змінювалася незначно [30].

Для порівняння змін активності пероксидази проаналізували електрофоретичний спектр ферменту *P. patens* у різних умовах впливу 5-азацитидину (рис. 5). Електрофореграми відрізнялися активністю ізоформ після гравістимуляції протоне-

Таблиця 1. Активність пероксидази гравітропної протонемі *Physcomitrium patens* після впливу 50 мкМ 5-азацитидину

Варіанти досліду	Активність пероксидази, відн.од./1г сирої маси/хв
Гравістимульована протонема, необроблена 5-аза; тривалість гравістимуляції 5 год	1.21 ± 1.1
Гравістимульована протонема після дії 5-аза; тривалість впливу інгібітора 5 год	2.50 ± 2.2*
Клиностакування + 5-азацитидин; тривалість клиностакування 24 год	2.17 ± 1.9*

Примітка: * — статистично достовірна різниця між експериментальними зразками при $p < 0.05$

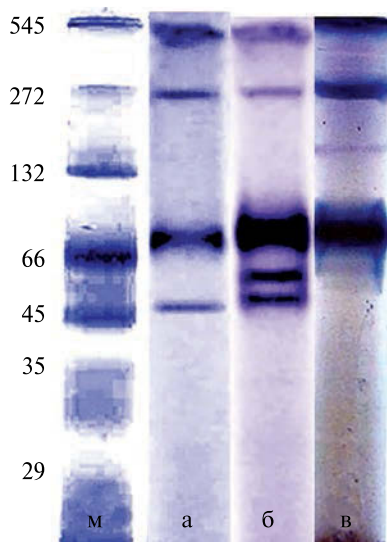


Рис. 5. Електрофореграма ізоформ пероксидази гравітропної протонеми *Physcomitrium patens*: м — маркер, а — контроль, б — після впливу 50 мкМ 5-азацитидину, в — через 24 год після клиноротації

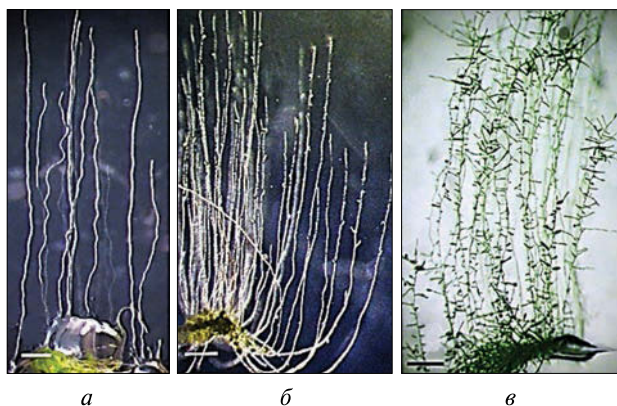


Рис. 6. Гравітропні столони дернини *Polytrichum arcticum*: у темряві: а — столони не галузилися; на світлі: б — клітини протонеми погалузилися, в — після дії 5-азацитидину значно збільшилася кількість галузок та мінливість кутів згину; довжина штриха 200 мкм

ми і клиностатування (рис. 5, а, б); пероксидазна активність після 5-азацитидину підвищувалася. Як свідчать результати аналізу спектрів ізоформ пероксидази гравістимульованої протонеми *P. patens*, активність пероксидази представлена принаймні двома катіонними та двома-трьома аніонними ізоформами (рис. 5). Відмінності між спектрами ізоформ чітко виражені після дії 5-аза-

цитидину: кількісно і якісно змінилася зона активності пероксидази з ММ у межах 45...66 кД, де спостерігали підвищення активності ферменту і зміну кількості ізоформ (рис. 5, б).

Після клиностатування (рис. 5, в) активність ізоформ 272 і 66 кД була вищою, ніж у контролі (рис. 5, а), і появилася одна вузька смуга дифузної катіонної фракції з ММ у межах 132 кД. Спільною для клиностатування і 5-азацитидину була інтенсифікація ізоформи пероксидази з 66 ММ кД (рис. 5, б, в). Не виключено, що зміна метилювання ДНК впливає на мінливість спектру та активність ізоформ під час порушення статичної векторної направленості гравітації. Доречно буде допустити, що модифікація ізоформ й підвищена активність ензиму унаслідок епігенетичних змін метилювання, найперше має відношення до розм'якшення стінки клітин протонеми і утворення згину як типової ростової відповіді на дію гравітаційної сили.

Протонема мохів реагує на силу тяжіння у темряві і росте пучком напрямлених вгору проти вектора гравітації столонів, що є показником їхньої гравічутливості та негативного гравітропного росту (рис. 6). Під впливом гравітації латеральні гілки закладаються на протонеми і ростуть під кутом до головного столону, утворюючи гравізалезний кут нахилу (GSP, gravitropic set point angle) [41, 45]. Експериментальні дослідження росту протонеми у змінених умовах гравітації і освітлення є підставою стверджувати, що величина гравітропного кута згину й напрям росту перебувають під комплексним контролем цих чинників як результат взаємодії фото- і гравітропізму [6, 10].

Використали інгібітор метилювання ДНК 5-азацитидин для дослідження взаємодії фото- і гравітропізму й проаналізували характер галуження клітин гравітропної протонеми *Polytrichum arcticum* Sw. ex Brid. Результатом післядії 5-азацитидину було інтенсивне галуження клітин на світлі, зміна кута галузок і напрямку їхнього росту відносно материнської клітини, порівняно з рослинами контролю (рис. 5).

Якщо галуження 10-денної гравітропної протонеми *P. arcticum* у контролі розпочиналося на віддалі 100...120 мкм від апікальної клітини на 3-5-й інтеркалярній клітині, то у досліді з 5-аза-

цитидином галузки утворювалися на кожній клітині столону, починаючи з апікальної (рис. 6, в). У контролі на протонемному столоні завдовжки 5...8 мм було 5...10 галузок, у досліді — понад 30...50 галузок, які відзначалися високою варіабельністю кутів згину галузок — від 20 до 90° (рис. 7).

Такий широкий діапазон значень кутів означає поступове зниження компетенції до сприйняття гравістимулу аж до втрати гравітропізму. У контролі латеральні галузки *P. arcticum* росли під гострим кутом до головного столону, і максимальна величина кута досягала 30...50°, після обробки 5-азацитидином кут збільшувався до 75...90° по усій довжині столону. Отже, гравічутливість, яка є частиною генетичного контролю гравітропізму, зменшилася унаслідок модифікації метилювання, що складно виявити у природних умовах середовища, без експерименту. Слід зазначити, що агравітропно під кутом 90° до поздовжньої осі столону росли 70 % галузок, а через 16...24 год їхній ріст змінився на гравітропний, і кут поступово досягав значень 40...50°. Морфологічні зміни були зворотними, на відміну від мутацій, тобто зумовленими епімутаціями, які відбулися унаслідок метилювання ДНК і зміни експресії генів, що зберегло пам'ять клітин про стрес. Навіть враховуючи їхню тимчасову роль, епімутації сприяють модифікації на первинному етапі адаптації [14, 29]. Те, що частина галузок зберегла майже 90° агравітропний кут нахилу і горизонтальний напрям росту, змінило життєву форму протонемної дернини.

Раніше повідомляли, що латеральні гілки протонемі *Ceratodon purpureus* (Hedw.) Brid. закладалися перпендикулярно до батьківської клітини (агравітропно), але поступово переорієнтувалися відповідно до векторної дії гравітації, і кут гравітропного згину зменшувався [10]. У апікальній частині столону у 3...5-й клітині величина кута була невисокою — 30...40°, в наступних 6...10-й інтеркалярних клітинах кут збільшувався до 60...80°. В основі столону унаслідок протидії гравітаційній силі кут латеральних галузок досягав 90°, і ріст був плагіотропний [10].

Ситуативно, у певних умовах середовища горизонтальний плагіотропний ріст може бути ви-

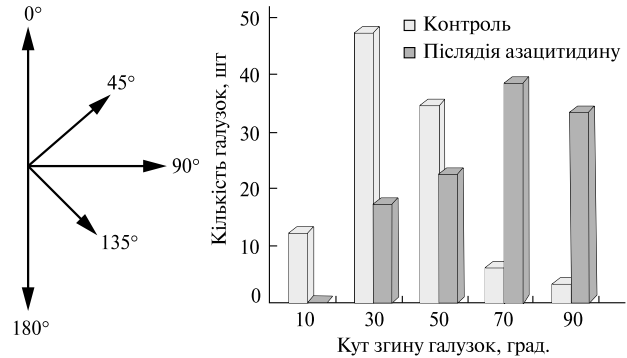


Рис. 7. Величина кута галузок гравітропних столонів *Polytrichum arcticum* у контролі та після впливу 50 мкМ 5-азацитидину

гідним фенотипом, зважаючи, зокрема, на те, що така форма росту поширена серед мохів. У *A. thaliana* неvertикальна орієнтація росту є типовою ростовою формою для кореневої системи рослин. Бокові корені на ранніх етапах розвитку ростуть майже горизонтально, однак це критично для ефективного живлення, надалі латеральні корені повільно викривляються, доки зрештою не досягнуть вертикальної орієнтації [21, 45].

В аридних кліматичних умовах спеціалізованою реакцією гаметофіту мохів є плагіотропний ріст підземної каулономи, часто поєднаний з негативним гравітропізмом головного столону і бокових хлоронемних галузок. Такі морфологічні особливості є адекватним пристосуванням до середовища в умовах дефіциту води і можливістю утворити надземну асиміляційну дернину [5, 38].

ВИСНОВКИ

Зв'язок між метилюванням основ ДНК і стадіями гравііндукції клітин протонемі *Physcomitrium patens* розглядається як частина сигнальної ланки, що відповідає за модифікацію гравітропного росту. Зменшення кількості метильованих основ ДНК під впливом 5-азацитидину призводило до зниження гравічутливості на стадії перцепції і трансдукції, проте ініціювало різну тривалість збереження клітинної пам'яті про гравістимул — довшу на стадії трансдукції сигналу.

Експресія пероксидази і перебудова ізoferментних спектрів сприяє модифікації компонентів клітинної стінки протонемі *Physcomitrium*

patens, свідчить про епігенетичний поліморфізм ферменту та є фактором стійкості стінки в умовах зміненої гравітації.

Конформаційні зміни ДНК, зумовлені епігенетичною модифікацією метилювання, впливають на варіабельність галузження і величину гравітропного кута латеральних галузок протонеми

Polytrichum arcticum. Морфологічні зміни галузок зберігаються у клітинних поділах, а у нестійких, стресових природних умовах підвищують адаптивний потенціал та поліморфізм мохів.

Робота виконана за підтримки Цільової комплексної програми НАН України з наукових космічних досліджень на 2018—2022 рр.

ЛІТЕРАТУРА

1. Войцехівська О. В., Капустян А. В., Косик О. І. та ін. *Фізіологія рослин: практикум*. Ред. Т. В. Паршикова. Луцьк: Терен, 2010. 420 с.
2. Кияк Н. Я., Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д. Морфофізіологічні реакції гравічутливості та адаптації до УФ-опромінення моху *Bryum caespitosum* Hedw. з Антарктики. *Космічна наука і технологія*. 2021. **27**, № 5. С. 47—59. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.047>
3. Кияк Н. Я., Хоркавців Я. Д. Оцінка окиснювального стресу моху *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. залежно від впливу гравітації. *Космічна наука і технологія*. 2016. **22**, № 4. С. 58—66. doi: <https://doi.org/10.15407/knit2016.04.058>
4. Кордюм Є. Л., Дубина Д. В. Роль епігенетичної регуляції в адаптивній пластичності рослин. *Укр. ботан. журн.* 2021. **78**, № 5. С. 347—359. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj78.05.347>
5. Лазаренко А. С. *Структура виду і механізми видоутворення мохів*. Вибрані праці. Львів: Ліга-Прес, 2001. 231 с.
6. Лобачевська О. В., Хоркавців Я. Д., Кияк Н. Я. та ін. Гравіморфогенез гаметофіту мохів. *Космічна наука і технологія*. 2015. **21**, № 4. С. 94—102.
7. Недуха О. М. *Клітинна оболонка рослин і фактори середовища*. Київ: Альтепрес, 2015. 8 с.
8. Ріпецький Р. Т., Хоркавців Я. Д. Епігенетична адаптація мохів і феномен клітинної пам'яті. *Укр. ботан. журн.* 2012. **69**, № 2. С. 302—314. <http://dspace.nbuv.gov.ua/handle/123456789/176981>
9. Тищенко О. М., Михальська О. М., Моргун Б. В. Генетична інженерія та клітинна селекція для підвищення осмотолерантності культурних рослин. *Фізіологія рослин і генетика*. 2016. **48**, № 3. С. 257—266.
10. Хоркавців Я. Д., Кордюм Є. Л., Лобачевська О. В. та ін. Галузження протонеми *Ceratodon purpureus* в умовах зміненої сили тяжіння. *Укр. ботан. журн.* 2015. **72**, № 6. С. 588—595. http://nbuv.gov.ua/UJRN/UBJ_2015_72_6_10
11. Хоркавців Я. Д., Лобачевська О. В., Кияк Н. Я. *Участь метилювання ДНК у гравіморфогенезі мохів Polytrichum arcticum і Physcomitrella patens*. Актуальні проблеми фізіології рослин і генетики: матер. Міжнарод. наук. конф., присвяченої 75-річчю інституту фізіології рослин і генетики НАН України (17 червня 2021 р., Київ): Тези. Київ, 2021. С. 203—205.
12. Хоркавців Я. Д., Ріпецький Р. Т., Баїк О. Л. Фенотипічна та епігенетична адаптація клону моху до ртуті. *Цитологія і генетика*. 2009. № 5. С. 22—27.
13. Ashapkin V. V., Kutueva L. I., Vanyushin B. F. Epigenetic variability in plants: heritability, evolutionary significance. *Russian J. Plant Physiol.* 2016. **63**, № 2. P. 181—192 [in English].
14. Cannon A. E., Salmi M. L., Clark G. B., et al. New insights in plant biology gained from research in space. *Gravitational and Space Res.* 2015. **3**, № 2. P. 3—10. doi: 10.2478/gsr-2015-0007
15. Correll M. J., Pyle, T. P., Millar, K. D. L., et al. Transcriptome analyses of *Arabidopsis thaliana* seedlings grown in space: implications for gravity-responsive genes. *Planta*. 2013. **238**. P. 519—533. doi: 10.1007/s00425-013-1909-x.
16. Cowles J. R., LeMay, R., Jahns G. Seedling growth and development on space shuttle. *Adv Space Res.* 1994. **14**, № 11. P. 312. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90273-9](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90273-9)
17. de Micco V., De Pascale S., Paradiso R., et al. Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biol.* 2014. **16**, № 1. P. 31—38. doi: 10.1111/plb.12098. Epub 2013 Sep 9.
18. Francoz E., Ranocha P., Nguyen-Kim H., et al. Roles of cell wall peroxidases in plant development. *Phytochem.* 2014. **112**. P. 15—21. doi: 10.1016/j.phytochem. PMID: 25109234
19. Gechev T. S., Hille J. Hydrogen peroxide as a signal controlling plant programmed cell death. *J. Cell Biol.* 2005. **168**, № 1. P. 17—20. doi: 10.1083/jcb.200409170. PMID: 15631987
20. Guyomarc'h S., Lérans S., Auzon-Cape M., et al. Early development and gravitropic response of lateral roots in *Arabidopsis thaliana*. *Phil. Trans. R. Soc. B.* 2012. **367**. P. 1509—1516. doi:10.1098/rstb.2011.0231
21. Hangarter R. P. Gravity, light and plant form. *Plant Cell and Environment.* 1997. **20**. P. 796—800. doi: 10.1046/j.1365-3040.1997.d01-124.x.

22. Hauser F., Waadt R., Schroeder J. I. Evolution of abscisic acid synthesis and signaling mechanisms. *Curr Biol.* 2011. **21**, № 9. P. 346—355. doi: 10.1016/j.cub.2011.03.015
23. Herranz R., Medina F. J. Cell proliferation and plant development under novel altered gravity environments. *Plant Biol. (Stuttg.)*. 2014. 1. P. 23—30. doi: 10.1111/plb.12103 PMID: 24112664
24. Hoson T. Plant growth and morphogenesis under different gravity conditions: relevance to plant life in space. *Life*. 2014. **4**. P. 205—216. doi:10.3390/life4020205 [PubMed]
25. Hoson T., Soga K., Mori R., Saiki M., Nakamura Y., Wakabayashi K., Kamisaka S. Stimulation of elongation growth and cell wall loosening in rice coleoptiles under microgravity conditions in space. *Plant Cell Physiol.* 2002. **43**. P. 1067—1071. doi:10.1093/pcp/pcf126
26. Hoson T., Wakabayashi K. Role of the plant cell wall in gravity resistance. *Phytochemistry*. 2015. **112**. P. 84—90. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.08.022.
27. Jablonka E., Lamb M. J. *Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life. A Bradford Book.* The MITT Pres. Series. Sterelny K., Wilson R. A. (eds.). Cambridge, Massachusetts; London, England. 2014. 563 p. doi:10.1186/1475-925X-4-68
28. Jin J., Chen H., Cai W. Transcriptomic Analysis Reveals the Effects of Microgravity on Rice all on Board the Chinese Spaceship Shenzhou 8. *Microgravity Sci. and Technol.* 2018. P. 1—10. Springer Science+Business Media B.V., part of Springer Nature 2018. <https://doi.org/10.1007/s12217-018-9633-6>
29. Karahara I., Suto T., Yamaguchi T., et al. Vegetative and Reproductive Growth of Arabidopsis Under Microgravity Conditions in Space. *J. Plant Res.* 2020. **133**. P. 571—585. doi:10.1007/s10265-020-01200-4
30. Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., et al. Microbiological and Nutritional Analysis of Lettuce Crops Grown on the International Space Station. *Front. Plant Sci.* 2020. **11**. P. 1—15. doi:10.3389/fpls.2020.00199
31. Kim M., Costello J. DNA methylation: an epigenetic mark of cellular memory. *Exp. & Molecular Med.* 2017. **49**. P. 1—8. doi:10.1038/emm.2017.10
32. Kordyum E. L. Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *Plant Biol.* 2014. **16**. P. 79—90. <https://doi.org/10.1111/plb.12047>
33. Kovalchuk I., Abramov V., Pogribny I., et al. Molecular Aspects of Plant Adaptation to Life in the Chernobyl Zone. *Plant Physiol.* 2004. **135**, № 1. P. 357—363. <https://www.jstor.org/stable/41754>
34. Kravets A. P., Sokolova D. A., Vengzhen G. S., et al. Corn plant DNA methylation pattern changes at UV- C irradiation fractionating. *Cytology and Genetics.* 2013. **47**. P. 29—33. doi:10.3103/S0095452713010052
35. Kwon T., Sparks J. A., Nakashima J., et al. Transcriptional response of Arabidopsis seedlings during spaceflight reveals peroxidase and cell wall remodeling genes associated with root hair development. *Amer. J. Bot.* 2015. **102**, № 1. P. 21—35. <https://doi.org/10.3732/ajb.1400458>
36. Kyyak N. Y. Metabolism of carbohydrates and activity of the antioxidant system in mosses on a post-technogenic salinized territory. *Regulatory Mech. Biosyst.* 2022. **13**, № 2. P. 189—196. <https://doi.org/10.15421/022224>
37. Lebedeva M. A., Tvorogova V. E., Tikhodeyev O. N. Epigenetic mechanisms and their role in plant development. *Genetica.* 2017. **53**, № 10. P. 1115—1131. doi: 10.7868/S0016675817090089
38. Lobachevska O. V., Kyyak N. Y., Khorkavtsiy Y. D., et al. Gravi-sensitivity of mosses and their gravity-dependent ontogenetic adaptations. *Life*. 2022. **12**, № 1782. P. 2—14. <https://doi.org/10.3390/life12111782>
39. Malik G., Dangwal M., Kapoor S., et al. Role of DNA methylation in growth and differentiation in *Physcomitrella patens* and characterization of cytosine DNA methyltransferases. *FEBS J.* 2012. **279**. P. 4081—4094. doi:10.1111/febs.12002
40. Medina F. J., Villacampa A., Ciska M., et al. Understanding Reduced Gravity Effects on Early Plant Development Before Attempting Life-Support Farming in the Moon and Mars. *Front. Astron. Space Sci.* 2021. **8**. P. 1—8. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.729154>
41. Mullen J. L., Hangarter R. P. Genetic analysis of the gravitropic set-point angle in lateral roots of Arabidopsis. *Adv Space Res.* 2003. **31**, № 10. P. 249—257. doi: 10.1016/s0273-1177(03)00249-7. PMID: 14686437
42. Passardi F., Cosio C. Peroxidases have more functions than a Swiss army knife. *Plant Cell Repts.* 2005. **24**, № 5. P. 255—265. doi:10.1007/s00299-005-0972-6
43. Rothe G. Unterschiede im Enzymmuster von Prototnemata, Moospflänzchen, Sporogon und Kallus der Laubmooskreuzung *Funaria hygrometrica* x *Physcomitrella piriforme*. *Beitrage zur Biologie der Pflanzen.* 1972. **48**. P. 433—444.
44. Roychoudhry S., Bianco M. D., Kieffer M., et al. Auxin controls gravitropic setpoint angle in higher plant lateral branches. *Curr Biol.* 2013. **23**, № 15. P. 1497—504 doi: 10.1016/j.cub.2013.06.034; PMID: 23891109
45. Roychoudhry S., Kieffer M., De Bianco M., et al. The developmental and environmental regulation of gravitropic setpoint angle in Arabidopsis and bean. *Sci. repts.* 2017. **3**. P. 1—12. doi: 10.1016/s0273-1177(03)00249-7 PMID: 14686437
46. Sato E. M., Hijazi H., Bennett M. J., et al. New insights into root gravitropic signalling. *J. Exp. Bot.* 2015. **66**. P. 2155—2165. doi: 10.1093/jxb/eru515 PMC4986716

47. Swarup R., Bennett M. J. Root gravitropism. *Annu. Plant. Rev. Online*. 2018. P. 157—174. doi:10.1002/9781119312994.apr0401
48. Valério L., De Meyer M., Penel C., et al. Expression analysis of the *Arabidopsis* peroxidase multigenic family. *Phytochem*. 2004. **65**. P. 1331—1342. doi: 10.1016/j.phytochem.2004.04.017.
49. Vandenbrink J. P., Kiss J. Z., Herranz R., et al. Light and gravity signals synergize in modulating plant development. *Frontier in Plant Sci*. 2014. **563**. P. 1—18. doi:10.3389/fpls.2014.00563
50. Villacampa A., Sora L., Herranz R., Medina F. J., et al. Analysis of graviresponse and biological effects of vertical and horizontal clinorotation in *Arabidopsis thaliana* root tip. *Plants*. 2021. **10**, № 4. P. 1—20. doi:10.3390/plants10040734

REFERENCES

1. Voitsekhivska O. V., Kapustian A. V., Kosyk O. I., et al. *Physiology of Plants: manual*. Ed. Parshykova T. V. Lutsk, Teren, 2010, 420 p. [in Ukrainian].
2. Kyyak N., Lobachevska O., Khorkavtsiv Y. (2021). Morpho-physiological reactions of gravisensitivity and adaptation to UV irradiation of the moss *Bryum caespitium* Hedw. from Antarctica. *Space Sci. and Technology*, **27**, № 5, 47—59. <https://doi.org/10.15407/knit2021.05.047> [in Ukrainian].
3. Kyyak N., Lobachevska O., Khorkavtsiv Y. (2016). Estimation of the oxidative stress in moss *Pohlia nutans* (Hedw.) Lindb. depending on the influence of gravity. *Space Science and Technol.*, **22**, № 4, 58—66. <https://doi.org/10.15407/knit2016.04.058>.
4. Kordyum E. L., Dubyna D. V. (2021). The role of epigenetic regulation in adaptive phenotypic plasticity of plants. *Ukr. Bot. J.*, **78**, № 5, 347—359. <https://doi.org/10.15407/ukrbotj78.05.347> [In Ukrainian].
5. Lazarenko A. S. *Species structure and mechanisms of species formation of mosses*. Eds. M. A. Holubets, I. C. Danul'kiv. Proc. works "Liha-press". Lviv, 2001. 231 p. [in Ukrainian].
6. Lobachevska O., Khorkavtsiv Ya., Kyyak N., et al. (2015). Gravimorphogenesis gametophytes of mosses. *Space Sci. and Technol.*, **21**, № 4, 94—102 [in Ukrainian].
7. Nedycha O. M. (2015). *Plant cell wall and environment*. Kyiv: Altep'press [in Ukraine].
8. Ripetskyj R. T., Khorkavtsiv Ya. D. (2012). Epigenetic adaptation in mosses and the phenomenon of cell memory. *Ukr. Botan. J.*, **69**, № 2, 302—314 [In Ukrainian].
9. Tishchenko O. M., Mykhalska S. I., Morgun B. V. (2016). Genetic engineering and cell selection for enhancing of crops osmotolerance. *Fiziol. rast. genet.*, **48**, № 3, 257—266. doi: <https://doi.org/10.15407/frg2016.03.257> [In Ukrainian].
10. Khorkavtsiv Y. D., Kordyum E. L., Lobachevska O. V., et al. (2015). Branching of *Ceratodon purpureus* protonemata effected under altered gravity conditions. *Ukr. Bot. J.*, **72**, № 6, 588—595. http://nbuv.gov.ua/UJRN/UBJ_2015_72_6_10 [in Ukrainian].
11. Khorkavtsiv Y., Lobachevska O., Kyyak N. (2021). Involvement of DNA methylation in gravimorphogenesis of mosses *Polytrichum arcticum* and *Physcomitrella patens*. Conference dedicated to the 75th anniversary of the Institute of Plant Physiology and Genetics of the National Academy of Sciences of Ukraine (Kyiv, June 17), 203—205 [in Ukrainian].
12. Khorkavtsiv Ya. D., Rypetskyj R. T., Baik O. L. (2009). Phenotypic and epigenetic adaptation of the moss clone to mercury. *Cytology and Genetic*, № 5, 22—27 [in Ukrainian].
13. Ashapkin V. V., Kutueva L. I., Vanyushin B. F. (2016). Epigenetic variability in plants: heritability, evolutionary significance. *Russian J. Plant Physiology*, **63**, № 2, 181—192 [in English].
14. Cannon A. E., Salmi M. L., Clark G. B., et al. (2015). New insights in plant biology gained from research in space. *Gravitational and Space Res.*, **3**, № 2, 3—10. doi: 10.2478/gsr-2015-0007.
15. Correll M. J., Pyle T. P., Millar K. D. L., et al. (2013). Transcriptome analyses of *Arabidopsis thaliana* seedlings grown in space: implications for gravity-responsive genes. *Planta*, **238**, 519—533. doi: 10.1007/s00425-013-1909-x.
16. Cowles J. R., LeMay, R., Jahns G. (1994). Seedling growth and development on space shuttle. *Adv in Space Res.*, **14**, № 11, 312. [https://doi.org/10.1016/0273-1177\(94\)90273-9](https://doi.org/10.1016/0273-1177(94)90273-9)
17. De Micco V., De Pascale S., Paradiso R., et al. (2014). Microgravity effects on different stages of higher plant life cycle and completion of the seed-to-seed cycle. *Plant Biology*, **16**, № 1, 31—38. 10.1111/plb.12098. Epub 2013 Sep 9.
18. Francoz E., Ranocha P., Nguyen-Kim H., et al. (2014). Roles of cell wall peroxidases in plant development. *Phytochem.*, **112**, 15—21. doi: 10.1016/j.phytochem. PMID: 25109234.
19. Gechev T. S., Hille J. (2005). Hydrogen peroxide as a signal controlling plant programmed cell death. *J. Cell Biol.*, **168**, № 1, 17—20. doi: 10.1083/jcb.200409170. PMID: 15631987.
20. Guyomarc'h S., Léran S., Auzon-Cape M., et al. (2012). Early development and gravitropic response of lateral roots in *Arabidopsis thaliana*. *Phil. Trans. R. Soc. B*, **367**, 1509—1516. doi:10.1098/rstb.2011.0231.
21. Hangarter R. P. (1997). Gravity, light and plant form. *Plant Cell and Environment*, **20**, 796—800.

22. Hauser F., Waadt R., Schroeder J. I. (2011). Evolution of abscisic acid synthesis and signaling mechanisms. *Curr Biol.*, **21**, № 9, 346—355. doi: 10.1016/j.cub.2011.03.015.
23. Herranz R., Medina F. J. (2014). Cell proliferation and plant development under novel altered gravity environments. *Plant Biol. (Stuttg)*, **1**, 23—30. doi: 10.1111/plb.12103 PMID: 24112664.
24. Hoson T. (2014). Plant growth and morphogenesis under different gravity conditions: relevance to plant life in space. *Life*, **4**, 205—216. doi:10.3390/life4020205 [PubMed]
25. Hoson T., Soga K., Mori R., Saiki M., Nakamura Y., Wakabayashi K., Kamisaka S. (2002). Stimulation of elongation growth and cell wall loosening in rice coleoptiles under microgravity conditions in space. *Plant Cell Physiol.*, **43**, 1067—1071.
26. Hoson T., Wakabayashi K. (2015). Role of the plant cell wall in gravity resistance. *Phytochem.*, **112**, 84—90. doi: 10.1016/j.phytochem.2014.08.022.
27. Jablonka E., Lamb M. J. *Evolution in Four Dimensions: Genetic, Epigenetic, Behavioral, and Symbolic Variation in the History of Life. A Bradford Book.* The MITT Pres. Series. Sterelny K., Wilson R. A. Eds. Cambridge, Massachusetts; London, England. 2014, 563 p. doi:10.1186/1475-925X-4-68
28. Jin J., Chen H., Cai W. (2018). Transcriptomic Analysis Reveals the Effects of Microgravity on Rice alli on Board the Chinese Spaceship Shenzhou 8. *Microgravity Sci. and Technol.*, 1—10. Springer Science+Business Media B. V., part of Springer Nature 2018. <https://doi.org/10.1007/s12217-018-9633-6>.
29. Karahara I., Suto T., Yamaguchi T., et al. (2020). Vegetative and Reproductive Growth of Arabidopsis Under Microgravity Conditions in Space. *J. Plant Res.*, **133**, 571—585. doi:10.1007/s10265-020-01200-4.
30. Khodadad C. L. M., Hummerick M. E., Spencer L. E., et al. (2020). Microbiological and Nutritional Analysis of Lettuce Crops Grown on the International Space Station. *Front. Plant Sci.*, **11**, 199. doi:10.3389/fpls.2020.00199.
31. Kim M., Costello J. (2017). DNA methylation: an epigenetic mark of cellular memory. *Exp. & Molecular Med.*, **49**, 1—8. doi:10.1038/emm.2017.10.
32. Kordyum E. L. (2014). Plant cell gravisensitivity and adaptation to microgravity. *Plant Biol.*, **16**, 79—90. <https://doi.org/10.1111/plb.12047>.
33. Kovalchuk I., Abramov V., Pogribny I., et al. (2004). Molecular Aspects of Plant Adaptation to Life in the Chernobyl Zone. *Plant Physiol.*, **135**, № 1, 357—363. <https://www.jstor.org/stable/41754>
34. Kravets A. P., Sokolova D. A., Vengzhen G. S., Grodzinsky D. M. (2013). Corn plant DNA methylation pattern changes at UV-C irradiation fractionating. *Cytology and Genetics*, **47**, 29—33. doi:10.3103/S0095452713010052.
35. Kwon T., Sparks J. A., Nakashima J., et al. (2015). Transcriptional response of Arabidopsis seedlings during spaceflight reveals peroxidase and cell wall remodeling genes associated with root hair development. *Amer. J. Bot.*, **102**, № 1, 21—35 <https://doi.org/10.3732/ajb.1400458>.
36. Kyyak N. Y. (2022). Metabolism of carbohydrates and activity of the antioxidant system in mosses on a post-technogenic salinized territory. *Regulatory Mech. Biosyst.*, **13**, № 2, 189—196. <https://doi.org/10.15421/022224>.
37. Lebedeva M. A., Tvorogova V. E., Tikhodeyev O. N. (2017). Epigenetic mechanisms and their role in plant development. *Genetica*, **53**, № 10, 1115—1131. doi: 10.7868/S0016675817090089.
38. Lobachevska O. V., Kyyak N. Y., Khorkavtsiv Y. D., et al. (2022). Gravi-sensitivity of mosses and their gravity-dependent ontogenetic adaptations. *Life*, **12**, № 1782, 2—14. <https://doi.org/10.3390/life12111782>.
39. Malik G., Dangwal M., Kapoor S., et al. (2012). Role of DNA methylation in growth and differentiation in *Physcomitrella patens* and characterization of cytosine DNA methyltransferases. *FEBS J.*, **279**, 4081—4094. doi:10.1111/febs.12002.
40. Medina F. J., Villacampa A., Ciska M., et al. (2021). Understanding Reduced Gravity Effects on Early Plant Development Before Attempting Life-Support Farming in the Moon and Mars. *Front. Astron. Space Sci.*, **8**, 1—8. <https://doi.org/10.3389/fspas.2021.729154>.
41. Mullen J. L., Hangarter R. P. (2003). Genetic analysis of the gravitropic set-point angle in lateral roots of Arabidopsis. *Adv Space Res.*, **31**, № 10, 249—257. doi: 10.1016/s0273-1177(03)00249-7. PMID: 14686437.
42. Passardi F., Cosio C. (2005). Peroxidases have more functions than a Swiss army knife. *Plant Cell Repts*, **24**, № 5, 255—265. doi:10.1007/s00299-005-0972-6.
43. Rothe G. (1972). Unterschiede im Enzymmuster von Protonemata, Moospflänzchen, Sporogon und Kallus der Laubmooskreuzung *Funaria hygrometrica* x *Physcomitrella piriforme*. *Beitrage zur Biologie der Pflanzen*, **48**, 433—444.
44. Roychoudhry S., Bianco M. D., Kieffer M., et al. (2013). Auxin controls gravitropic setpoint angle in higher plant lateral branches. *Curr Biol.*, **23**, № 15, 1497—504. doi:10.1016/j.cub.2013.06.034; PMID: 23891109.
45. Roychoudhry S., Kieffer M., De Bianco M., et al. (2017). The developmental and environmental regulation of gravitropic setpoint angle in Arabidopsis and bean. *Sci. repts*, **3**, 1—12. doi: 10.1016/s0273-1177(03)00249-7 PMID: 14686437.
46. Sato E. M., Hijazi H., Bennett M. J., et al. (2015). New insights into root gravitropic signalling. *J. Exp. Bot.*, **66**, 2155—2165. doi: 10.1093/jxb/eru515 PMC4986716.
47. Swarup R., Bennett M. J. (2018). Root gravitropism. *Annu. Plant. Rev. Online*, 157—174. doi:10.1002/9781119312994.apr0401.

48. Valério L., De Meyer M., Penel C., et al. (2004). Expression analysis of the *Arabidopsis* peroxidase multigenic family. *Phytochem.*, **65**, 1331–1342. doi: 10.5897/AJB10.2291.
49. Vandenbrink J. P.; Kiss J. Z.; Herranz R., et al. (2014). Light and gravity signals synergize in modulating plant development. *Frontier in Plant Sci.*, **5**, 1–18. doi:10.3389/fpls.2014.00563.
50. Villacampa A., Sora L., Herranz R., Medina F. J., et al. (2021). Analysis of graviresponse and biological effects of vertical and horizontal clinorotation in *Arabidopsis thaliana* root tip. *Plants*, **10**, № 4, 1–20. doi:10.3390/plants10040734.

Стаття надійшла до редакції 08.05.2023

Після доопрацювання 24.05.2023

Прийнято до друку 25.05.2023

Received 08.05.2023

Revised 24.05.2023

Accepted 25.05.2023

Ya. D. Khorkavtsiv¹, Senior Researcher, Ph. D. in Biol.

E-mail: ecomorphogenesis@gmail.com

O. V. Lobachevska¹, Senior Researcher, Head of Department, Ph. D. in Biol.

E-mail: ecobryologia@gmail.com

N. Ya. Kyyak¹, Senior Researcher, Deputy Director for scientific work, Ph. D. in Biol.

E-mail: kyyak_n@i.ua

E. L. Kordyum², Head of Department, Dr. Sci. in Biol., Prof.

E-mail: cellbiol@ukr.net

¹ Institute of Ecology of the Carpathians, National Academy of Sciences of Ukraine

4, Kozelnytska Str., Lviv, 79026 Ukraine

² M. G. Kholodny Institute of Botany of the National Academy of Sciences of Ukraine

2 Tereshchenkivska Str., Kyiv, 01601 Ukraine

EFFECT OF DNA METHYLATION ON GRAVISENSITIVITY OF MOSSES

Gravity is a constant environmental factor in plant growth and development. Real or simulated microgravity causes stress responses in plants, in which DNA methylation is involved. We investigated the effect of the DNA methylation inhibitor 5-azacytidine (5-aza) on the perception and transduction of the gravity signal into gravitropism and on the peroxidase isoenzyme spectra in *Physcomitrium patens* (Hedw.) Mitt. protonemata under conditions of altered gravity, as well as on *Polytrichum arcticum* Sw. ex. Brid. phenotype branching and variability of gravitropic angles of lateral branches. The influence of DNA methylation on the perception and realization of the gravity signal was determined. DNA demethylation in the 5-aza presence decreased the gravisensitivity of stolons — less at the stage of perception and more during gravity signal transduction. An analysis of gravitropism under the inhibition of DNA methylation showed the signal preservation in cell memory regardless of the stage of gravistimulation. However, cell memory about a signal was shorter at the perception stage and longer at the transduction stage, that affects a rate of the gravitropic growth recovery. The different effect of DNA methylation on gravi-induction is considered as an epigenetically regulated process that modifies morphological differences in mosses' tropism under real microgravity in space flight and simulated microgravity on earth. Resistance to microgravity depends on intensity of cell wall metabolism. Peroxidase activity plays an important role in the biogenesis and mechanical stability of the cell wall. It was shown that the changes in the expression of peroxidase genes and enzyme isoforms in the *P. patens* protonemata may be a result of DNA demethylation. Epigenetic polymorphism of peroxidase under microgravity is regarded as a probable factor of individual resistance of plant organisms.

Keywords: DNA methylation, 5-azacytidine (5-aza), gravitropism, adaptation, protonemata, stolon, lateral branch.

<https://doi.org/10.15407/knit2023.03.119>

D. ELFIKY*¹, Head of structural, thermal, space Environment Dept. Space Science Div., Ass. Prof.

ORCID: 0000-0003-4772-667X

E-mail: delfiky@narss.sci.eg

S. AZIZ¹, RA on structural, thermal, space Environment Dept. Space Science Div., MSc

E-mail: sara.ramadan.aiz93@gmail.com*, sara.ramadan@narss.sci.eg*

N. HESHAM¹, RA on structural, thermal, space Environment Dept. Space Science Div., Bsc

E-mail: nourhanhesham531@gmail.com

A. AYMAN², Head of Payload Dept., PhD

E-mail: ayman.ahmed@moonvillageassociation.org

¹ National Authority for Remote Sensing and Space Science (NARSS)

23-josef-tito, new nozha, Cairo 11769, Egypt

² Egyptian Space Agency, Cairo, Egypt

*Corresponding author

LOW COST DOSIMETER MODULE FOR MVA LUNAR LANDER MISSION

Understanding the lunar radiation environment is crucial for future space exploration missions, as the lack of atmospheric and magnetic shielding allows charged particles of varying energies and origins to penetrate the surface of the moon. In space radiation environments, it is common practice to use radiation dosimeters to measure absorbed dose and dose rate.

In this study, the payload will include a radiation dosimeter capable of measuring the radiation intensity at the landing site's surface. The design concept and implementation of a radiation readout system for the real-time measurement of gamma absorbed dose and dose rate at the surface of the landing area for the MVA mission are based on a photodiode sensor that is commercially available and will be used as a gamma radiation sensor. The module experienced low levels of activity (Cs¹³⁷, Co⁶⁰, and Sr⁹⁰). The performance of the photodiode-based module has been demonstrated by the Giger counter. Due to its low cost and high sensitivity, this radiation module would be clearly advantageous.

Keywords: Lunar lander, Radiation dosimeter, photodiode sensor, TIA.

1. INTRODUCTION

Future space research missions require a comprehensive knowledge of the lunar radiation environment, as the lack of air and magnetic shielding allows charged particles of varying energies and origins to penetrate the lunar surface [3]. In space radiation conditions, the measurement of absorbed dosage and dose rate is a routine duty; this is achieved with equipment known as radiation dosimeters [7]. Using a multi-national team approach, different partners working on

the payload system modules of the MVA lunar lander will create an image system for the MVA payload lunar lander. System aims include getting a live stream of the Earth from the Moon, detecting radiation dosage and earthquakes on the Moon's surface and transmitting this data back to Earth via satellite for the purpose of gathering scientific data, those sensors will be put on the platform in question. The radiation sensor module is being developed by the National Authority for Remote Sensing and Space Science,

Цитування: Elfiky D., Aziz S., Hesham N., Ayman A. Low Cost Dosimeter Module for MVA Lunar Lander Mission. *Space Science and Technology*. 2023. 29, № 4 (143). P. 119–126. <https://doi.org/10.15407/knit2023.03.119>

© Publisher ПН «Академперіодика» of the NAS of Ukraine, 2023. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

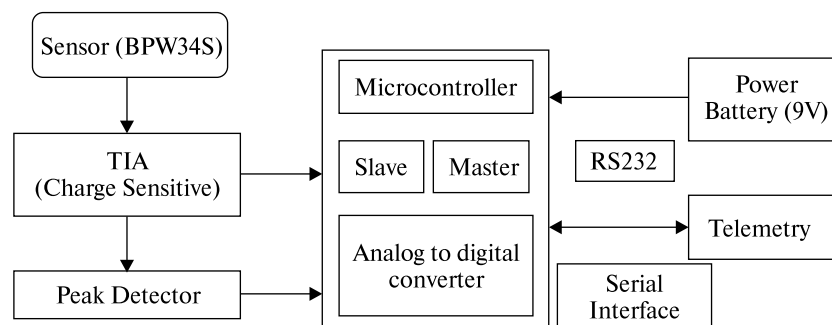


Figure 1. Design concept of the radiation dosimeter readout module

which is a joint partner. In this project, the camera will have a radiation dosimeter that can measure the radiation intensity at the surface of the landing area. The radiation dosimeter data will be translated into “sound signals”, which can be used as an exciting effect with the image to create more publicity: “You can hear and see the lunar surface!” The device will detect gamma in the 10 keV — 1 MeV energy range using a low-cost photodiode sensor. This radiation module is an obvious winner due to its low cost and high sensitivity. PIN photodiodes have been used in a variety of works to detect radiation directly without the use of an expensive low-noise charge preamplifier [5, 6]. Low leakage photodiodes with entry windows that are thin enough to enable gamma radiation to pass through to the depletion zone have shown sufficient energy resolution to be connected to inexpensive preamplifiers for gamma radiation. Accordingly, there is a need for a low-cost, portable, and adaptable amplifier that could be attached to the detector. The most significant quality of the amplifier in such an application is not the energy resolution but the noise discrimination, because the detector will be utilized as a particle counter. We employed three PIN photodiodes in our design to enhance the active area of the sensor and, hence, minimize decimation noise.

2. METHODOLOGY

2.1. Sensor Selection. Due to its tiny sensitivity region, the PIN photodiode is an ideal radiation detector for our experiments. It’s simple to identify signals from tiny samples because the cosmic ray background is so low [4]. Bpw34s PIN photodiodes may be used to detect gamma rays that travel through its depletion

layer and form numerous electron-hole pairs. When the diode is reverse-biased, virtually all of the charge carriers will be driven away, resulting in a tiny current pulse that can be amplified and processed [8]. Because the photodiode’s output signal has such a small amplitude, an instrumentation amplifier circuit with extremely low noise is required. Light must be fully eliminated when using a photodiode as a detector of gamma radiation because else the photocurrent would overwhelm the signal we are looking for [9].

2.2. Design Concept. Bpw34s, a commercially available PIN photodiode, has been used in this work to evaluate a small and unique dosimeter device. The concept of functioning is dependent on the electrical properties of the sensor being changed by radiation (i.e. the change of current flowing through the sensor or the voltage across the sensor). Because of their tiny size and inherent sensitivity to ionizing radiation, photodiodes are frequently employed as radiation sensors. From Pico-ampere to Micro-ampere, the photodiode’s output signal is a current. The output current is so little that it can’t be picked up by the sensor. As a result, the output signal must be amplified and the current converted into a proportional voltage using the Transimpedance amplifier TIA technique [10]. In order to digitize the TIA output voltage signals, there is always a trade-off between hardware resources, expenses, and space and power consumption when selecting a conversion approach. To capture the TIA’s output in digital signal processing (DSP), high-speed ADCs with sampling rates of up to 500,000 samples per second (sps) are used. The light detector’s output is digitized directly at even greater rates (> 250 Msps) in another digital technique. Pulse shape discrimina-

tion, for example, necessitates the use of high-rate digitization to capture temporal pulse shape information. Analog pulse height can't be reliably calculated since the sampling time is so sluggish compared to the light pulse width. Using a peak detector (PKD) [2], a well-known analogue circuit that can convert transient voltage pulse heights into permanent voltage [1], is the best approach in this scenario. Serial Interface will receive the output data through RS232 and forward it to the destination. Fig. 1 depicts the circuit's overall design idea.

We chose the TL082 for TIA and LM358 for PDK for such design (2 pF) because of its excellent combination of low bias current, offset voltage, power consumption, and wide bandwidth with feedback resistor (50 k) and feedback capacitor.

The ATmega328-based Arduino Nano is a small, complete, and breadboard-friendly board (Arduino Nano 3.x). The Arduino Nano is organized using the Arduino (IDE), which is available for a variety of platforms. IDE is an abbreviation for Integrated Development Environment. An accurate clock frequency is generated using an Arduino Nano.

2.3. The System Simulation Model. In general, there are three major steps for simulating the sensor readout board. Firstly, simulation of the photodiode output by a two-diode model Secondly, the transient impedance amplification (TIA) circuit, which works as a pre-amplifier for the signal produced by the photodiode. Finally, the peak detector PKD circuit counts the signal, which converts the transient voltage pulse heights into persistent voltages. The final output will be the input of the microcontroller, where microcontroller is used to count the detected signals. The simulation model of the sensor board is shown in Fig. 2. Simulation of the photodiode (Bpw34s) depends on simulating the maximum output of the dark current in dark condition when the photodiode is reverse biased with 9 V. The output current of the photodiode is (I_{pd}) the current output of the photodiode that connected between the ground and the inverting input of the op-amp, it is approximately 70 μ A as shown in Fig. 2. The design of the Transimpedance amplifier (TIA) process presented C_f and R_f are the feedback resistor (R_1) and feedback capacitor (C_1) respectively. The peak detector (PKD) circuit was used to remove the voltage drop across the diode.

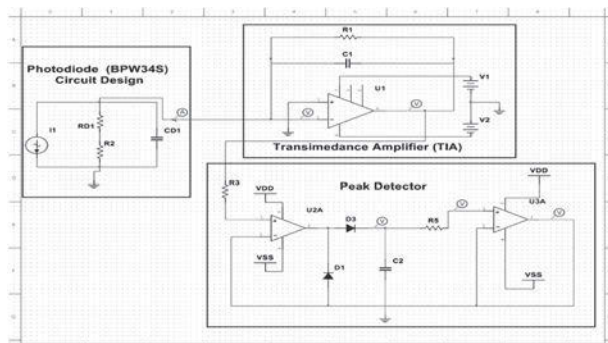


Figure 2. The system simulation model of the gamma radiation readout module

Table 1. Radiation Sources

Source	Energy	Activity
Co ⁶⁰ (gamma)	2.8 MeV	1.0 μ C
Sr ⁹⁰ (beta)	1.17 MeV	10 μ C
Co ⁶⁰ (gamma)	1.3 MeV	2.8 mC
Cs ¹³⁷ (gamma)	662 keV	1 mC

2.4. Software Overview. The main task of the software design is controlling the microcontroller to count the output signals in response to the radiation levels that pass through the photodiode to ensure an accurate counting result. Once the circuit is powered, the pulses are received by the microcontroller according to the radiation dose and counted; then, with an easy calculation, we can get the value of the radiation. The analog signal output of the (PKD) with pulse width is 250 microseconds and pulse height is 0–5 V is received by analog pin A1 of microcontroller. This pin works as ADC, so the signal converted to digital signal in range to 0–1024. This value compared with lowest level of volt induced by photodiodes when exposed to radiation sources. If the value is greater than threshold value the counter will start to count. The code we use for the board is counting pulses every one minutes. So we get the number of pulses by minute (CPM), then, according to the photodiode documentation we divide (CPM) by the conversion factor of the photodiode (0.0057) and we have the value of radiation in μ SV/h.

2.5. The System Testing. The sensor board must be tested by exposing the board to different types of

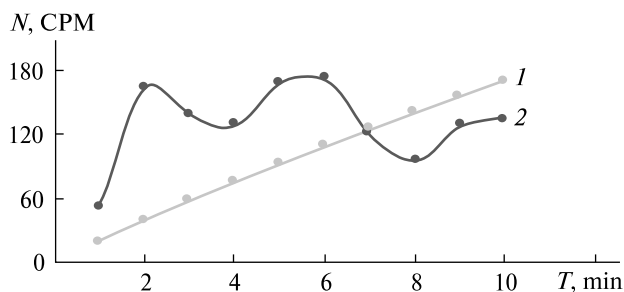


Figure 3. The reading of Bpw34s board (line 1) and Geiger counter (line 2) after irradiation to Co^{60} with activity $1 \mu\text{C}$ ($E = 2.8 \text{ MeV}$)

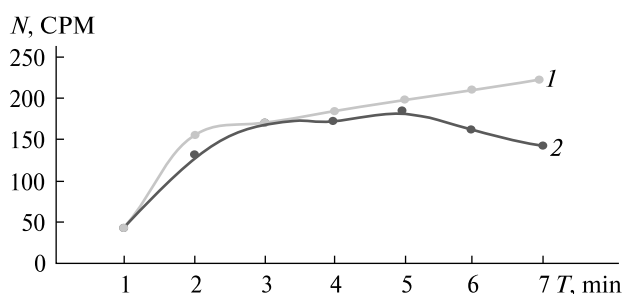


Figure 4. The reading of the board (line 1) and Geiger counter (line 2) after irradiation to Sr^{90} with activity $10 \mu\text{C}$ ($E = 1.17 \text{ MeV}$)

radiation, and compare the result of the system with the Geiger counter, the testing was done at Helwan university labs. Three radiation sources were chosen to the irradiation process are Cs^{137} , Co^{60} , and Sr^{90} . The radiation sources and its activity is shown in Table 1.

Appendix 1 includes the Figures, which demonstrate a) prototype of the sensor board, b) the schematic design of the sensor board, c) final 3D design of the sensor board, and d) mechanical structure of the aluminum box.

3. RESULT AND DISCUSSION

3.1. Simulation Model. Firstly, the result of the simulation model of the photodiode circuit shown at left of according to the photodiode characterization as “photodiode Bpw34s circuit Design”, the circuit simulated by current source in range of ($1 \mu\text{A}$ to $70 \mu\text{A}$) according to the amount of dark current corresponding to reverse bias, shunt resistance (5 M ohm) and photodiode capacitance (30 pF) simulate the shunts inside the photodiode. Secondly, operational ampli-

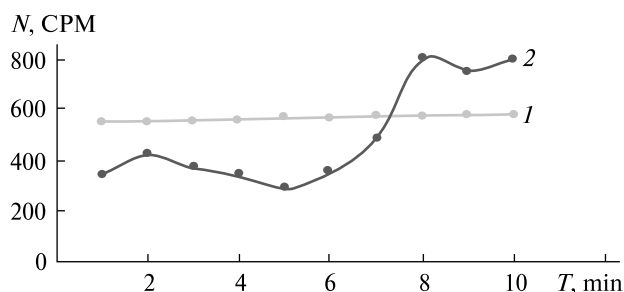


Figure 5. The reading of the board (line 1) and Geiger counter (line 2) after irradiation to Cs^{137} with activity 1 mC ($E = 662 \text{ keV}$)

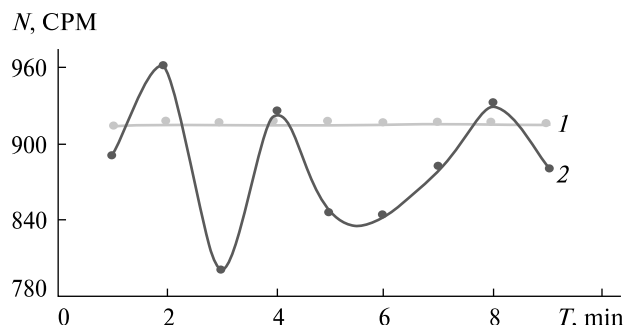


Figure 6. The reading of the board (line 1) and Geiger counter (line 2) after irradiation to Co^{60} with activity 2.8 mC ($E = 1.3 \text{ MeV}$)

fier (TL082) used in the Trans impedance amplifier (TIA) circuit with feedback resistor (50 k) and feedback capacitor (2 pF). Thirdly, the design of the peak detector designed by operational amplifier (LM358) and diode, in order to detect the output of Transimpedance amplifier (TIA). There are three LEDs in the simulation inductor to the Bpw34s output dark current. Also there is a LCD to display the output voltage of the (TIA) and (PKD). There is LCD in order to display the output voltage of the TIA and PKD voltage with the highest level of the illumination in order to define the threshold voltage value.

As a result, the diode becomes forward biased and acts as a closed switch whenever the applied voltage signal exceeds the diode’s threshold voltage. Using a diode as a buffer, the circuit operates as a buffer circuit in this case. So, whatever input is applied to the positive terminal of the op-amp, the output terminal will receive.

The diode is forward biased during the first positive half cycle of the op-amp output. Concurrently,

the capacitor is charged to the input signal's maximum peak value. The circuit is a voltage follower buffer circuit in this instance, as shown. Because the op-amp output is LOW during the first negative half cycle, the diode is biased in the other direction. As a result, the capacitor stores the maximum value of the input signal until the diode is once again forward biased. When the diode is reverse biased, the op-amp is in open loop condition and enters saturation, causing the capacitor to discharge into the R and the R to become saturated. Thus, a diminishing slope in the signal's negative cycle was occurred. The output voltage of the TIA and PK changed, and so did the maximum output current. Accordingly, the maximum output current changed with the maximum voltage. The specifications of this photodiode dosimeter read onboard are presented in the Table 2.

3.2. Radiation Test. Both systems are exposed to different radiation sources as listed in Table 1. The comparison between the performance of both systems are discussed in the following subsections.

3.2.1. Irradiation with Co^{60} with low activity $0.1 \mu C$. The results of exposing the Geiger counter and Bpw34s sensor board is shown in Fig. 3. The figure showed the count per minute (CPM). The photodiode sensor sensing the low-level gamma radiation of Co^{60} with energy 2.8 MeV with low activity $0.1 \mu C$. The Bpw34s sensor reading is saturated no significant change was observed in the reading. The Geiger counter reading is oscillated and isn't saturated. The Geiger counter is not sensitive to low dose of gamma.

3.2.2. Irradiation with Sr^{90} with low activity $10 \mu C$. The results of exposing the Geiger counter and Bpw34s sensor board is shown in Fig. 4. The figure showed the Count per Minute (CPM) and radiation accumulated

Table 2. Photodiode sensor board specifications

Item	Value
Radiation type	Low level gamma ray (keV – MeV)
Board dimension	$10 \times 10 \text{ cm}^2$
Interface	Serial RS232
Power budget	About 1 mW
Sampling rate	250 ksp/s
Sensitivity	19 Count/keV
Mechanical interface	Albox with dimension $16 \times 17 \text{ cm}$
Weight	50 g without batteries

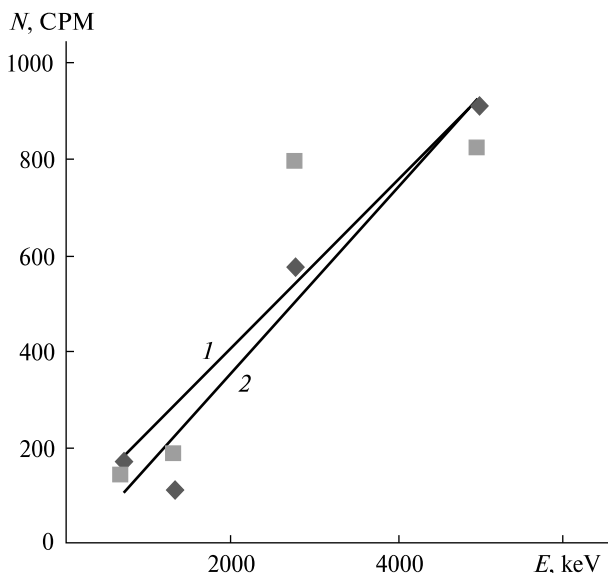


Figure 7. Sensitivity of the sensor board (diamonds, line 1: $N = 0.1903E - 21.254$; $R^2 = 0.9491$) vs. Geiger counter (squares, line 2: $N = 0.1734E + 59.448$; $R^2 = 0.7993$)

dose in (μSV). The photodiode sensor sensing the low-level beta radiation of Sr^{90} with energy 1.17 MeV with low activity $10 \mu C$. The Bpw34s sensor reading is more stable than Geiger counter which shown a fluctuation in the reading. The sensor can sense in MeV range. The CPM and the radiation accumulated dose is increasing linearly with exposure time.

3.2.3. Irradiation with Cs^{137} with high activity 1 mC . The results of exposing the Geiger counter and Bpw34s sensor is shown in Fig. 5. The figure showed the Count per Minute (CPM) and radiation accumulated dose in (μSV).

The photodiode sensor sensing the low-level beta radiation of Cs^{137} with energy 662 keV with high activity 1 mC . The Bpw34s sensor reading is more stable than Geiger counter which shown a fluctuation in the reading. The sensor can sense in keV range. The CPM and the radiation accumulated dose is increasing linearly with exposure time.

3.2.4. Irradiation with Co^{60} with high activity 2.8 mC . The results of exposing the Geiger counter and Bpw34s sensor is shown in Fig. 6. The figure showed the Count per Minute (CPM) and radiation accumulated dose in (μSV).

The photodiode sensor not sensing the high-level gamma radiation of Co^{60} with energy 1.3 MeV with

high activity 2.8 mC. The Bpw34s sensor reading is saturated on 915 CPM. While the Geiger counter reading is fluctuation is less than at low level activation. The sensor cannot sense in the high MeV range.

3.2.5. The system sensitivity. In order to calculate the sensitivity (δ) of photodiode sensor and Geiger counter, it is defined as ratio of number counted n by sensor to the exposed radiation energy:

$$\delta = n/E.$$

The CPM for each source is counted after 10 min accumulated dose.

As shown in Fig. 7, the sensitivity of the Geiger counter is 17 CPM per mR hr⁻¹ while, the sensitivity of the Photodiode sensor is 19 CPM per mR hr⁻¹. The sensitivity of the photodiode sensor is 17 CPM per mR hr⁻¹, Range of energy measurement is keV to MeV. Through this project the design and implementation and testing for radiation sensor readout board based on photodiode are presented and described in details.

Appendix 2 includes the Figures, which illustrate a) software's flow chart, b) simulated circuit after testing, and c) the final output of the circuits with function generator.

4. CONCLUSIONS

Through this work the design, implementation and testing for radiation photodiode sensor readout board are presented and described in details. A system consisting of a transimpedance amplifier (TIA)

and a peak detector (PKD) circuit for use with a Bpw34s PIN photodiode was developed with the goal of producing a low-cost system that can be used in the detection of low energy levels of gamma rays (via Arduino-Nano). The specifications of the system was determined, the board area is 100 cm², the interface is Serial RS232, the power needed is 1 mW and the sampling rate is 250 ksp/s.

The performance of the system for the detection of gamma rays was determined using a Co⁶⁰, Cs¹³⁷, and Sr⁹⁰ radiation source. In comparison with Geiger counter, the photodiode reading is more stable than Geiger counter. The sensitivity of the Geiger counter is 17 % while, the sensitivity of the Photodiode sensor is 19 %. The photodiode can sense in range from keV to MeV. When the photodiode sensor exposes to Co⁶⁰ with high activity 2.8 mC the reading is saturated. The photodiode is more reliable at low activity. The designed circuit can work as an Beta and Gamma counter. Indeed, it could be used in a lunar mission after more space environment qualification tests.

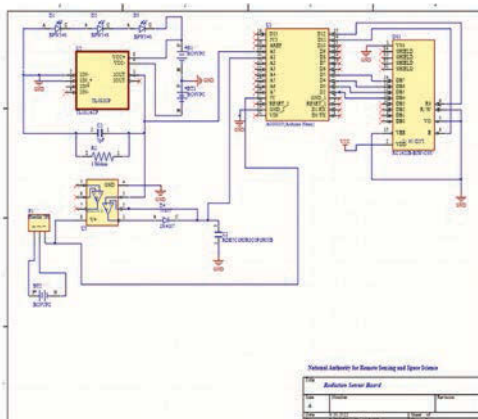
COMPETING INTERESTS

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper. The data that support the findings of this study are openly available.

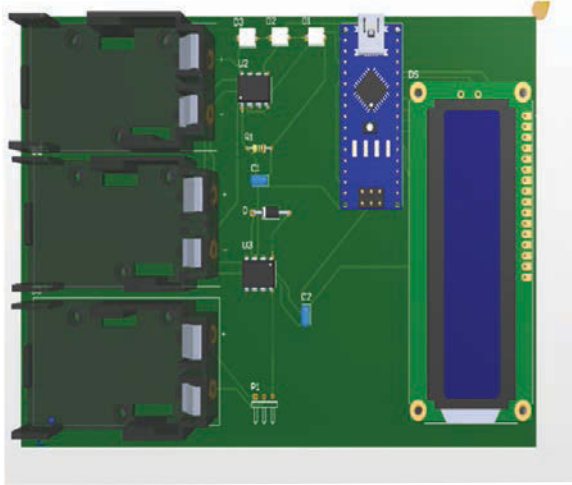
Appendix 1



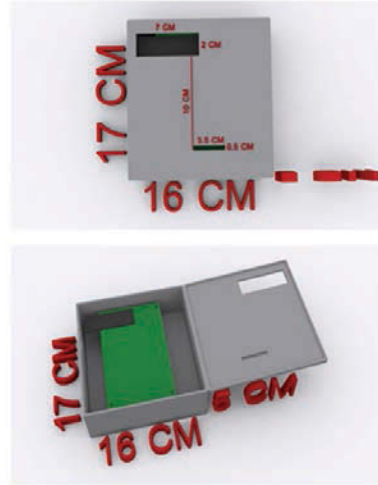
a) The prototype of the sensor board



b) The Schematic design of on the sensor board

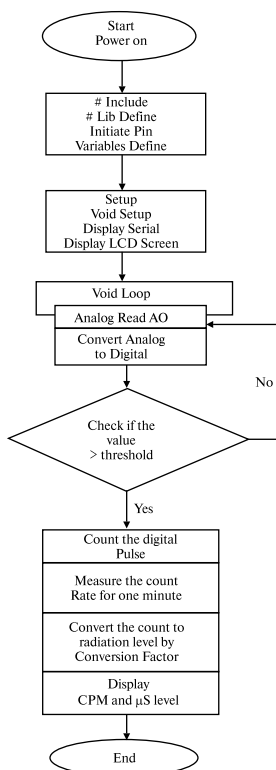


c) Final 3D design of the sensor board

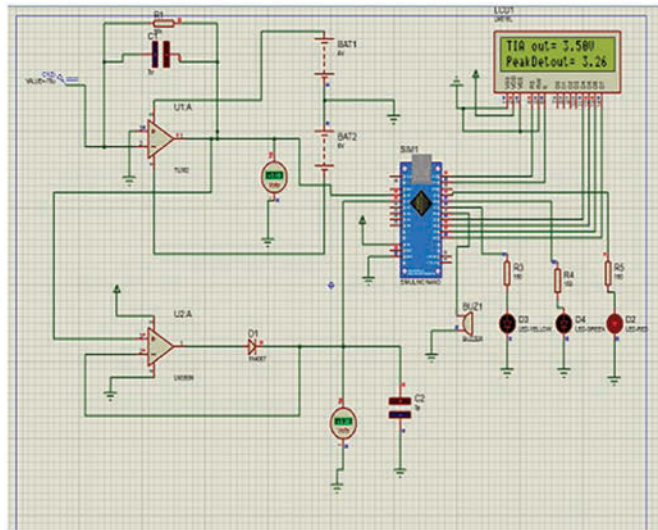


d) Mechanical structure of the aluminum box

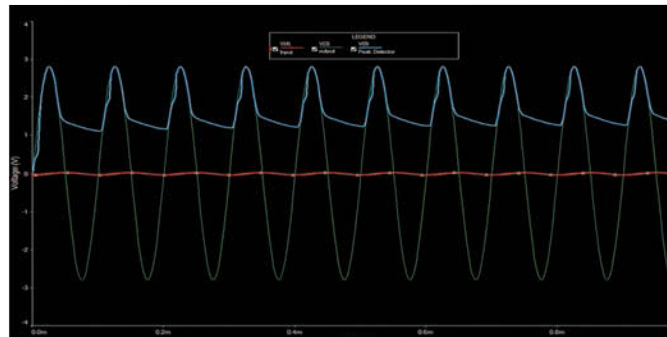
Appendix 2



a) Software's flow chart



b) Simulated circuit after testing



c) The final output of the circuits with function generator

REFERENCES

1. Achtenberg K., Mikolajczyk J., Szabra D., Prokopiuk A., Bielecki Z. (2020). Review of peak signal detection methods in nanosecond pulses monitoring. *Metrology and Measurement Systems*, **27**(2), 203–218. DOI:10.24425/mms.2020.132770.
2. Chierici A., Malizia A., di Giovanni D., Fumian F., Martellucci L., Gaudio P., d'Errico F. (2021). A low-cost radiation detection system to monitor radioactive environments by unmanned vehicles. *Eur. Phys. J. Plus*, **136**.
3. Gieseler J., Oleynik P. (2020). Radiation Monitor RADMON aboard Aalto-1 CubeSat: First results. *Adv. Space Res.*, **66**, 52–65.
4. Gooda P. H., Gilboy W. B. (1987). High resolution alpha spectroscopy with low cost photodiodes. *Nuclear Instrum. and Methods Phys. Res. A*, **255**, 222–224.
5. Graeme J. G. (1996). *Photodiode Amplifiers: OP AMP Solutions*, McGraw Hill Professional.
6. Knoll G. F. (2010). *Radiation Detection and Measurement*, 4th edition, Hoboken, N.J: Wiley.
7. Narici L., Berger T., Matthiä D., Reitz G. (2015). Radiation Measurements Performed with Active Detectors Relevant for Human Space Exploration. *Front Oncol.*, **5**, 273. Publ. online 2015, Dec 8. DOI: 10.3389/fonc.2015.00273.
8. Nowotny R., Reiter W. L. (1977). The use of silicon pin-photodiodes as a low-energy photon spectrometer. *Nuclear Instrum. and Methods Phys. Res. A*, **147**, 477–480.
9. Oliveira C. N. P., Houry H. J., Santos E. J. P. (2016). PiN photodiode performance comparison for dosimetry in radiology applications. *Phys. Medica*, **32**, 1495–1501.
10. Renker D., Lorenz E. (2009). Advances in solid state photon detectors. *J. Instrum.*, **4**, P04004.

Стаття надійшла до редакції 26.02.2023

Після доопрацювання 08.05.2023

Прийнято до друку 08.05.2023

Received 26.02.2023

Revised 08.05.2023

Accepted 08.05.2023

Д. Елфікі*¹, керівник відділу структурного, термічного та космічного середовища

Департаменту космічних наук, доц., проф.

ORCID: 0000-0003-4772-667X

E-mail: delfiky@narss.sci.eg

С. Азіз¹, РА зі структурного, термічного та космічного середовища Департаменту космічних наук, магістр

E-mail: sara.ramadan.aiz93@gmail.com*, sara.ramadan@narss.sci.eg*

Н. Хешам¹, РА зі структурного, термічного та космічного середовища Департаменту космічних наук, бакалавр

E-mail: nourhanhesham531@gmail.com

А. Ахмед², нач. відділу корисного навантаження, д-р техн. наук

E-mail: ayman.ahmed@moonvillageassociation.org

¹Національне управління з дистанційного зондування та наук про космос (НУДЗНК)

23, вул. Йозефа Тіто, Ель Ножа, Каїр 11769, Єгипет

²Єгипетське космічне агентство, Каїр, Єгипет

НИЗЬКОСОБІВАРТИСНИЙ ДОЗИМЕТРИЧНИЙ МОДУЛЬ ДЛЯ МІСІЇ MVA LUNAR LANDER

Знання радіаційного середовища Місяця має вирішальне значення для майбутніх місій дослідження космосу, оскільки відсутність атмосферного та магнітного екранування супутника дозволяє зарядженим частинкам різної енергії та походження проникати на його поверхню. У дослідженнях космічного радіаційного середовища загальною практикою є використання радіаційних дозиметрів для вимірювання поглиненої дози та її потужності. У цьому дослідженні корисне навантаження включатиме радіаційний дозиметр, здатний вимірювати інтенсивність радіації на поверхні місця посадки. Концепція дизайну та реалізація системи зчитування рівня радіації для вимірювань в режимі реального часу поглиненої дози гамма-випромінювання та потужності дози на поверхні зони приземлення для місії MVA базуються на фотодіодному давачі, який є комерційно доступним і використовуватиметься як давач гамма-випромінювання. Модуль протестовано на низькому рівні радіоактивності (Cs¹³⁷, Co⁶⁰ та Sr⁹⁰). Працездатність модуля на основі фотодіода перевірено за допомогою лічильника Гейгера. Низька вартість та висока чутливість такого модуля визначення рівня радіації є його суттєвими перевагами.

Ключові слова: місяцехід, радіаційний дозиметр, фотодіодний сенсор, ТІА.

Моніторинг космічного простору і космічне сміття

Space Environment Monitoring and Space Debris

<https://doi.org/10.15407/knit2023.04.127>
УДК 537.877

Ю. М. ЛАВРИЧ¹, старш. наук. співроб., канд. техн. наук, провід. наук. співроб.

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3616-2135>

E-mail: lavrigh@westa-inter.com, jurynlav@gmail.com

М. І. БИСТРОВ², голов. конструктор РЛС дальнього спостереження, нач. КБ «Дніпровське».

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

E-mail: bustrovni@gmail.com

В. І. ПРИСЯЖНИЙ³, нач., старш. наук. співроб., канд. техн. наук.

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>

E-mail: vip.17071957@gmail.com

Д. В. ПЯСКОВСЬКИЙ⁴, експерт, канд. техн. наук. Заслужений працівник освіти,

Лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки

E-mail: piaskovskyi_dv@use.ua

¹Інститут транспортних систем і технологій Національної академії наук України
вул. Писаржевського 5, Дніпро, Україна, 49005

²АТ КБ «Дніпровське»

вул. Будівельників 34, Дніпро, Україна, 49089

³Національний центр управління та випробувань космічних засобів

вул. Князів Острозьких 8, Київ, Україна, 01010

⁴Державне космічне агентство України

вул. Князів Острозьких 8, Київ, Україна, 01010

РЕАЛІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЇ ПОДВІЙНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ КОНТРОЛЮ КОСМІЧНОГО ПРОСТОРУ

***Актуальність.** Радіолокаційні засоби контролю космічного простору, незважаючи на свою потенційну багатофункціональність, є монофункціональними системами. Для забезпечення ефективної реалізації цільових функцій використовуються лише деякі із загального числа потенційно можливих функцій, інші наявні функції не досліджується і, як наслідок, залишаються без застосування. Цільові ж функції більшості наявних вітчизняних і зарубіжних радіолокаційних станцій контролю космічного простору (РЛС ККП) практично зводяться лише до функції контролю космічних об'єктів, що знаходяться на різних орбітах. Отримана при цьому радіолокаційними засобами контролю космічного простору інформація використовується не в повному обсязі, в результаті чого не відбувається формування нових цільових функцій. Як показує історія розвитку оборонних комплексів, в більшості промислово розвинених країн є приклади використання як військових розробок в цивільних цілях (спін-офф), так і цивільних — у військових цілях (спін-он). В результаті синергії цих процесів посилюється акцент на стратегію подвійних технологій і подвійних інновацій.*

Цитування: Лаврич Ю. М., Бистров М. І., Присяжний В. І., Пясковський Д. В. Реалізація технології подвійного використання засобів контролю космічного простору. *Космічна наука і технологія*. 2023. **29**, № 4 (143). С. 127—140. <https://doi.org/10.15407/knit2023.04.127>

© Видавець ВД «Академперіодика» НАН України, 2023. Стаття опублікована за умовами відкритого доступу за ліцензією CC BY-NC-ND license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Мета. Метою роботи є дослідження можливості розширення цільового застосування і впровадження іоносферного каналу в вітчизняну радіолокаційну станцію РЛС 5Н86 Дніпро (Нен House) шляхом використання більшості її функціональних систем для реалізації функції контролю іоносфери.

Метод. У роботі використаний порівняльний аналіз основних функціональних систем і технічних характеристик РЛС 5Н86 Дніпро і радіолокаторів некогерентного розсіювання світової мережі контролю іоносфери.

Результати. Проаналізовано основні характерні риси і особливості РЛС 5Н86 і з урахуванням особливостей сигналів обґрунтована можливість використання багатофункціональності РЛС для формування нової цільової функції контролю космічного простору. З прикладної точки зору наведено ряд конкретних науково-практичних рішень, спрямованих на реалізацію технології подвійного призначення при здійсненні функції контролю іоносфери радіолокаційною станцією — як для вирішення завдань підвищення власної ефективності функціонування, так і для інтересів фундаментальної науки. Показано, що створення нових цільових РЛС ККП засновано як на використанні вже наявних систем в експлуатованій РЛС, так і на введенні нових. Обґрунтовано важливість наукової задачі, пов'язаної з реалізацією функції контролю іоносфери і можливістю інтеграції в світову мережу контролю іоносфери.

Висновки. Наявність науково-технічного доробку та практичного досвіду вітчизняного розробника РЛС ККП робить реалізацію нової цільової функції цілком реалістичною, реалізація технології подвійного призначення забезпечить ефективне рішення як прикладних, так і фундаментальних наукових завдань.

Ключові слова: радіолокаційні станції контролю космічного простору, іоносфера, радарі некогерентного розсіювання, радіозондування.

ВСТУП

Більшість радіолокаційних систем, що використовують метод некогерентного розсіювання, можуть здійснювати зондування іоносфери Землі на відстань до 1000 км, яка визначається потенціалом радіолокаційних установок [4], але отримані дані характеризують стан іоносфери тільки поблизу установки. Незважаючи на численні дослідження, варіації параметрів D-області іоносфери вивчено найменше з-поміж інших висотних областей. Однією з причин цього є обмежене число методів діагностики параметрів D-області. Водночас вивчення D-області має не тільки фундаментальне, але і прикладне значення, оскільки зміни електронної щільності в ній істотно впливають на поширення радіохвиль в діапазоні роботи радіолокаційних станцій контролю космічного простору (РЛС ККП). F-область іоносфери є неоднорідним і нестаціонарним середовищем, теоретичне і експериментальне вивчення якої також ще далеко не закінчене. Тому, незважаючи на наявність досить великого числа способів діагностики іоносфери, розробка нових методик та використання нових засобів контролю космічного простору є досить актуальною задачею.

Об'єктом дослідження є РЛС ККП — стаціонарний наземний комплекс радіотехнічної апаратури.

Мета роботи — обґрунтування можливості та шляхів формування нової функції контролю іоносфери з урахуванням характерних особливостей РЛС ККП і з забезпеченням збереження функції контролю космічних об'єктів.

ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

В даній роботі передбачається розглянути деякі аспекти формування функції контролю іоносфери вітчизняною радіолокаційною станцією з використанням науково-технічних напрацювань вітчизняного розробника. Як правило, питання досліджень іоносфери наявними РЛС ККП висвітлюються у спеціальній літературі, недоступній широкому колу, і найчастіше розглядаються з суто теоретичних позицій. Більш детально й широко контроль іоносфери висвітлено для радарів некогерентного розсіювання (РНР).

МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИ

У більшості країн в основі напрямків для вирішення різних завдань дослідження космосу лежать радіолокаційні технології, для яких характерне стрімке зростання досягнень, що випереджає стандартні підходи і рішення [10]. Україна, яка має в своєму розпорядженні радіолокаційну станцію контролю балістичних і космічних об'єктів — РЛС 5Н86 Дніпро (Нен House), бере участь в освоєнні та використанні космічного простору

як через реалізацію власних проєктів, передбачених Загальнодержавною космічною програмою, так і через проєкти, що виконуються в кооперації з іншими країнами [1].

РЛС ККП є дорогими інформаційними засобами як на етапі створення, так і у процесі експлуатації. Традиційно РЛС ККП типу 5Н86 вирішували завдання в інтересах лише Міністерства оборони, сьогодні змінився тільки Замовник (Державне космічне агентство), хоча невідома і тим більше незрозуміла втрата інтересу Міністерства оборони до таких радіолокаційних станцій, які об'єктивно потрібні принаймні обом. РЛС, як і раніше, залишається монофункціональним засобом з реалізацією лише функції контролю космічного простору (КО), результати якого використовується в інтересах тільки одного Замовника. Цілком зрозумілі наслідки збереження монофункціональності РЛС, але при оцінці економічної ефективності таких систем потрібно враховувати можливість створення додаткових функцій з урахуванням вартості. Значна частина цього ланцюжка належить нереалізованим послугам, причому вартісний обсяг сегменту інших користувачів здатний у кілька разів перевищувати вартість витрат, зумовлених реалізацією тільки функції контролю космічного простору. Тому поряд зі зменшенням вартості експлуатації РЛС шляхом модернізації, яку проводить Національний центр управління та випробувань космічних засобів (НЦУВКЗ) Державного космічного агентства, цілком очевидним стає необхідність пошуку шляхів зменшення вартості за допомогою створення нових цільових функцій, сумісних з наявною, з використанням більшості функціональних систем діючої РЛС.

Не можна не відзначити, що технології створення РЛС ККП вже давно мають риси подвійності, правда і сьогодні часто невідомі широкому колу, але є і випадки застосування військових розробок у цивільних цілях (спін-офф) [8] (наприклад, застосування поліетиленових труб для систем охолодження, високовольтних конденсаторів 70 кВ, водоохолоджуваних резисторів потужності розсіювання 320 кВт тощо).

В даній роботі досліджується можливість розширення цільового застосування вітчизняної

РЛС 5Н86, і на основі аналізу основних технічних характеристик дається оцінка можливості її застосування для контролю іоносфери (КІ).

Сьогодні одними із найбільш інформативних інструментів діагностики іоносфери є радары РНР (ISR — Incoherent Scatter Radar) радіохвиль — потужні і чутливі радіофізичні пристрої. Глобальна мережа ISR складається з 10 РНР, зокрема Харківський (ХРНР), складних і дорогих установок, які є унікальними комплексами з різними конструктивно-схемними побудовами і різними географічними положеннями.

Сучасний контроль іоносфери включає різні види радіозондування — вертикальне (ВЗ), похиле (ПЗ), зовнішнє (ЗЗ), трансіоносферне (ТІЗ), зворотно-похиле (ЗПЗ).

Незважаючи на зростання наукового і практичного інтересу до досліджень іоносфери, подальше збільшення обсягу та поліпшення якості геофізичної інформації обмежуються недостатнім технічним потенціалом РНР. Можливості базової апаратури радара з їхніми ефективною потужністю випромінювання передавачів, ефективною поверхнею антен та реальною чутливістю радіоприймальних пристроїв можна вважати практично вичерпаними і навряд чи слід очікувати істотного поліпшення їх в найближчому майбутньому.

Відповідно до «Концепції в галузі космічної діяльності» [7] плануються космічні наукові дослідження, зокрема і дослідження іоносфери, ініційовані українськими вченими. У зв'язку з цим необхідні подальші дослідження щодо можливості збільшення обсягу інформації про характеристики іоносфери, зменшення її вартості та підвищення інформативності, тому важливим може бути використання потенційних можливостей вітчизняної РЛС 5Н86, яке може спростити вирішення поставлених перед сучасними дослідниками фундаментальних і прикладних задач.

Чинна РЛС 5Н86 Західного центру спостереження (ЗЦС) (Мукачево) є основою побудованих Харківського і Іркутського іоносферних радарів [5], тому для оцінки можливості реалізації функції контролю іоносфери (КІ) РЛС 5Н86, що зберігає функцію контролю космічних об'єктів (КО), необхідно оцінити її основні характеристики та відмінності.

Попередні оцінки, зроблені у 2012 р., вказали на можливість використання РЛС 5Н86 Дніпро для контролю іоносфери і попереднього аналізу технічних характеристик [9].

В Україні функціонує Іоносферна обсерваторія Інституту іоносфери, до складу якої входять РНР метрового діапазону з нерухомою антеною вертикального випромінювання діаметром 100 м, РНР метрового діапазону з повноповоротною антеною діаметром 25 м, нагрівальний стенд декаметрового діапазону 300 × 300 м та іонозонди вертикального й похилого зондування.

Іркутський радар, переданий по конверсії Інституту сонячно-земної фізики (ІСЗФ) РАН, створений також на базі РЛС 5Н86, є моностаціонарним імпульсним радаром з частотним скануванням, який використовує антену, конструктивно аналогічну до діючої антени в РЛС 5Н86 ЗЦС, тому науковий і практичний інтерес становить аналіз можливості використання його в ролі РНР.

Оцінимо потенційну можливість використання РЛС 5Н86 для контролю іоносфери. Для методу, що застосовується в РНР, рівень прийнятої потужності дорівнює [17]

$$P_s(h) = \frac{0.76 P_T \eta c A \cdot \sigma N_e(h)}{16\pi h^2}, \quad (1)$$

де $P_s(h)$ — потужність сигналу, некогерентно розсіяного на висоті h , P_T — імпульсна потужність передавача, η — ККД антенно-фідерного тракту, c — швидкість світла, A — ефективна поверхня антени, σ — ефективне розсіювання, N_e — концентрація електронів на висоті h .

Як видно з рівняння (1), сигнал, відбитий від розсіювальної області, залежить від енергетичних, частотних і просторово-часових характеристик як РЛС, так і середовища поширення сигналу.

Проаналізуємо ряд відмінностей РЛС 5Н86 ЗЦС від РНР, однією з яких є конструкція антенної системи радара. Антени РНР у переважній більшості є зенітними параболоїдами (зокрема і ХРНР), синфазною решіткою (Японія) чи секторальним рупором (Іркутський — ІРНР). Варто відзначити, що в даний час в світі діють лише дві установки — ХРНР та ІРНР, побудо-

вані за схожою схемою. Для усіх РНР характерна велика поверхня антени. Так, найбільший радар у м. Аресібо (Пуерто-Ріко) має антену діаметром 300 м, антени ІРНР мають площу 12.2 × 246 м, ефективна площа антени ХРНР становить 3700 м². Щодо РЛС 5Н86 ЗЦС, то вона складається з двох «крил» двухсекторної рупорної антени довжиною 250 м. Загальна апертура антени 12 × 250 м, що характерно для ІРНР і ряду інших РНР. Антена РЛС 5Н86 має два ряди щілинних антен у двох хвилеводах і комплект передавального і приймального обладнання, забезпечуючи мінімальний час поширення хвилі від першої до останньої 285-ї щілини (1.98 мкс). Кожен ряд генерує сигнал з керованою частотою, при цьому сканувальний сектор дорівнює 30° по азимуту (60° на антену) і 30° по куту місця (від 5° до 35° по висоті), що забезпечує сканування 120° по азимуту і 30° по куту місця.

Друга особливість полягає в тому, що РЛС 5Н86 ЗЦС використовує ЗПЗ-метод контролю космічного простору [2], який є основним для всіх РЛС ККП і найбільш перспективним, та вже давно увійшов у практику дослідження іоносфери поряд з вертикальним і похилим зондуванням. Є досвід його практичного застосування для прогнозування умов поширення радіохвиль у системах загоризонтної радіолокації [12]. Реальну потребу знань про характеристики іоносфери вперше гостро відчували розробники засобів загоризонтного виявлення, через відсутність яких довгі роки унеможлилювалося створення самої загоризонтної ЗГ РЛС.

Реалізація принципів загоризонтної радіолокації при створенні ЗГ РЛС 5Н32 (Russian Woodrucker) зажадала інформаційного забезпечення про характеристики тракту поширення електромагнітних хвиль для коректної роботи ЗГ РЛС, а для визначення оптимальної траси проходження зондувального променя необхідно було мати точні дані про стан іоносфери. Працюючи на першому стрибку, ЗГ РЛС має багато спільного з надгоризонтними РЛС, до яких належать всі РЛС ККП, але при похилому падінні радіохвиль на іоносферу дальність поширення, навіть при одноразовому відбитті хвилі, лежить у межах до 3000 км. Таким чином, створюється іоносфер-

ний канал, який може використовуватися для різних цілей, зокрема і для дослідження іоносфери.

Україна здійснює контроль космічного простору, застосовуючи радар системи попередження РЛС 5Н86 ЗЦС, який реалізує у повсякденній діяльності не більше ніж 20 % потенціалу РЛС.

Іоносфера, як фізичне середовище поширення радіохвиль, є невід'ємною складовою частиною РЛС 5Н86, яка функціонує в умовах високоширотної і середньоширотної іоносфери, де систематично провадяться дослідження. Радар у Харкові — єдиний РНР у середньоширотній Європі, призначений для отримання параметрів іоносфери в незбурених і збурених умовах. РЛС 5Н86 ЗЦС за своїми основними технічними параметрами порівнянн з середньоширотними радаром ХРНР, ІРНР і Кіото (Японія), які доповнюють довготний ланцюжок середньоширотних радарів НР (Мілстоун-Хілл, США). Область застосування результатів науково-практичних досліджень постійно розширюється, охоплюючи важливі напрямки, зокрема сейсмоіоносферний [15].

При роботі радіолокаційних станцій далекого виявлення необхідно вирішувати задачу компенсації впливу іоносфери. При обробці вимірювань дальності до космічного об'єкта за допомогою РЛС виникає іоносферна помилка вимірювання дальності, зумовлена різними значеннями швидкості поширення радіохвилі в іоносфері та у вакуумі.

Дослідження, які здійснював Головний конструктор РЛС 5Н86 (РТІ ім. академіка Мінця), у необхідному обсязі не було завершено через початок серійного виробництва. Фундаментальні та прикладні дослідження було припинено на етапі констатації факту впливу іоносфери, тому у сучасних умовах доцільно ретельно ознайомитися з результатами наукових досліджень, впроваджених в апаратні засоби Інституту іоносфери.

У підсумку, дальність до виявленого об'єкту, виміряна по затримці сигналу, який відбивається не від нижньої межі іоносфери, а на деякій її глибині R , буде завжди більшою від реальної дальності D :

$$R = D + \Delta R. \quad (2)$$

Іоносферна помилка ΔR вимірювання дальності пов'язана з електронною та іонною концентрацією в іоносфері виразом [3]

$$\Delta R = \frac{8.06 \cdot 10^7}{f^2} \int_0^R N_e(s) ds, \quad (3)$$

де f — частота випромінювання, N_e — електронна концентрація, s — траєкторія уздовж променя «РЛС — об'єкт».

Для горизонтально однорідної іоносфери вираз (3) може бути записано у вигляді

$$\Delta R = \frac{8.06 \cdot 10^7}{f^2} \int_0^h N_e(s) \cos \beta(z) dz, \quad (4)$$

де z — висота прольоту об'єкта над Землею, h — поточна висота, $\cos \beta(z)$ — косинус зенітного кута променя радара на висоті z , який визначається виразом

$$\cos \beta(z) = \sqrt{\frac{\cos^2 \beta_0 + 2z/R_3 + (z/R_3)^2}{(1 + z/R_3)}}, \quad (5)$$

де $\cos \beta_0$ — косинус зенітного кута променя радара на поверхні Землі, R_3 — радіус Землі. Для не дуже великих зенітних кутів ($\beta_0 \leq 30^\circ$) $\cos \beta(z)$ практично збігається з $\cos \beta_0$.

З виразів (3) — (5) видно, що похибка вимірювання дальності залежить від електронної концентрації N_e , висоти прольоту h і зенітного кута променя радара на поверхні Землі β_0 : що більшими є N_e , h , β_0 , то більшим буде ΔR . Успішне врахування компенсації впливу іоносфери на поширення радіохвиль безпосередньо визначає точність роботи радіолокаційних станцій, особливо РЛС ККП.

Кожен з сучасних методів оцінки стану іоносфери з компенсацією іоносферних похибок має свої переваги і недоліки, і ефективність їхньої роботи сильно залежить від частотного діапазону роботи РЛС. Найточнішим методом автоматизованої обробки інформації, отриманої в результаті досліджень іоносфери, є її дослідження самим радіолокаційним засобом, тому що робота ведеться в секторі відповідальності виробу, обробка розсіяних від іоносфери радіосигналів здійснюється тими ж апаратно-програмними засобами, що і обробка сигналів для основного завдання РЛС.



Рис. 1. Загальний вигляд РЛС 5Н86 (Мукачево), ІРНР і ХРНР (зліва направо)

При використанні для дослідження іоносфери самої РЛС можна використовувати більшість штатних систем, не потрібно створювати додаткові засоби, і, як наслідок, не потрібно вживати додаткові інженерні та конструктивні рішення з розміщення, графіків і алгоритмів роботи. Основним недоліком використання власних ресурсів РЛС при дослідженні іоносферних змін є витрата часового ресурсу виробу. Загальний вигляд РЛС 5Н86 ЗЦС, ІРНР і ХРНР наведено на рис. 1.

Однією з особливостей, здатних вплинути на ступінь реалізації функцій контролю іоносфери, є діапазон частот зондування. Аналіз характеристик РНР світової мережі показав, що вони працюють в досить широкому діапазоні частот: 46.5...50.0 МГц (MU Кіото, Японія), Аресібо (Пуерто-Ріко), 150...400 МГц (ІРНР, ХРНР, RRE Малверн), 1330 МГц (Радар Сондрестрем). Для всіх РЛС (Харків, Іркутськ, Мукачево) робочий діапазон частот 154...162 МГц.

Діапазон потужності зондування починається з рівнів 0.5 МВт (Радар ESR, Свалбард) і закінчується рівнем 15 МВт (Радар RRE Малверн), який більше використовується для радіоастрономічних спостережень. Найбільш застосовуваний діапазон потужності лежить в межах 1...3 МВт (EISCAT, ІРНР, ХРНР, ЗЦС), в яких лежить і потужність РЛС 5Н86. Як видно, частотний діапазон та енергетичний потенціал РЛС 5Н86 ЗЦС відповідають основним вимогам до РНР і дозволяють її використання для цілей контролю іоносфери.

При роботі в режимі аналізу іоносфери діапазон дальності повинен охоплювати досить великий для РЛС метрового діапазону радіохвиль висотний діапазон — від 90 до 600 км. Більшість радіолокаційних систем на базі методу НР, зокрема і ХРНР, проводять зондування іоносфери Землі на висоті до 1000 км, що визначається потенціалом РНР, але, як вже вказувалося, отримані дані характеризують стан іоносфери у невеликій околиці станції ВЗ.

РНР і РЛС 5Н86 можуть працювати як з гладким (простим), так і з фазокодоманіпульованим (ФКМ) зондувальним сигналом. Тривалість зондувального імпульсу для ІРНР лежить у діапазоні 70 до 900 мкс: 700...800 мкс — для гладкого взькосмугового сигналу і 100...200 мкс — для ФКМ широкосмугового сигналу. Для РЛС 5Н86 тривалість зондувального сигналу дорівнює 200...800 мкс.

Проведені в роботі [14] експерименти дозволили визначити область мінімальної і максимальної тривалості сигналу для дослідження іоносфери в діапазоні 0.1...50 мс. Цілком логічно, що необхідне проведення досліджень достатності запланованого в ході модернізації РЛС 5Н86 ЗЦС діапазону тривалості — 0.2...16 мс для досліджень іоносфери. Натомість програма наукових досліджень з використанням ХРНР використовувала тривалість зондувальних імпульсів від 40 мкс до 1 мс [3].

Однією з особливостей роботи РЛС 5Н86 є сканування діаграми спрямованості променя



Рис. 2. Загальний вигляд передавачів ІРНР (зліва) і РЛС 5Н86

по куту $5^{\circ} \dots 35^{\circ}$, тому необхідно провести дослідження можливості реалізації функції контролю іоносфери при такому секторі сканування. Проведені дослідження можливості контролю іоносфери РЛС метрового діапазону вказали на можливість відновлення висотного профілю електронної та іонної концентрацій на малих зенітних кутах променя радара ($0 \dots 20^{\circ}$). Модельні розрахунки профілю потужності іоносферних перевідбитів можуть бути використані для великих зенітних кутів РЛС без істотних її змін, але з припущенням при цьому необхідності впровадження іоносферного каналу. Оскільки ІРНР побудовано на базі РЛС 5Н86 «Дніпро» для того ж частотного діапазону хвиль, зазначені дані можуть вважатися достовірними. Не можна не відмітити, що наступні покоління РЛС ККП вже працюють в діапазоні кутів місця $\varepsilon = 0^{\circ} \dots 40^{\circ}$ (РЛС Дарьял) і більше ($\varepsilon = 2^{\circ} \dots 70^{\circ}$ — РЛС Воронеж-М).

Таким чином, схемотехнічні рішення передавального і антенного пристроїв РЛС 5Н86 здатні в основному забезпечити формування зондувального сигналу в режимах контролю як космічних об'єктів, так і іоносфери. Загальний вигляд передавачів ІРНР і РЛС 5Н86 наведено на рис. 2.

Сучасний інноваційний підхід до використання радіолокаційних засобів полягає у формуванні та використанні багатьох функцій таких систем. Наприклад, Європейську радіолокаційну систему некогерентного розсіювання EISCAT (European Incoherent Scatter Radars) призначено для вивчення структури і властивостей полярної

іоносфери Землі, а також для обмеженого вирішення завдань контролю космічного простору. Система є інтернаціональною, а її роботу і фінансування забезпечує Євросоюз, здійснюючи співпрацю з українськими вченими Радіоастрономічного інституту НАН України та Інституту іоносфери НАН та МОН. В результаті вже є багато спільних робіт.

ІРНР під час штатного режиму КІ за рік реєструє близько 100 тисяч прольотів через сектор сканування КО. Наземні станції Австралії, які використовуються для стеження за супутниками, як правило, перебувають також у віданні різних австралійських урядових установ разом з НАСА та Європейським космічним агентством. Побічно, але і ХРНР змогла виявити старт ракет, реєструючи хвильові обурення, які супроводжували їхні пуски [4].

В даний час алгоритми РЛС 5Н86 передбачають обслуговування цілей, які мають балістичну траєкторію, відносно високі швидкості і не здійснюють у більшості випадків маневрів на траєкторії. Всі інші типи цілей робочим алгоритмом селектуються і не приймаються в обробку. Інакше кажучи, з радіолокаційного сигналу, що приймається РЛС і є адитивною сумішшю сигналів КІ і КО, виділяється тільки сигнал КО. Тому, з точки зору подвійної технології, необхідно провести дослідження можливості поєднання функцій контролю КО і КІ на базі наявної конструктивно-схемної побудови РЛС 5Н86.

Важливим моментом при цьому є те, що РЛС 5Н86 побудована за принципом двосекторних РЛС (СРЛС), при цьому кожна СРЛС функціо-

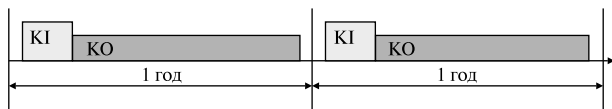


Рис. 3. Розподіл часового ресурсу РЛС з впровадженням алгоритмом отримання іоносферного профілю

нує незалежно і містить два незалежні радіолокаційні канали (РЛК). Таким чином, РЛС 5Н86 містить 4 РЛК, кожний з яких функціонує незалежно і здійснює виявлення і супровід космічних об'єктів у своєму секторі огляду.

Усі задіяні в режимі контролю іоносфери РНР, принаймні основні їхні системи, мають архітектуру, практично ідентичну з РЛС 5Н86. Основні характеристики ХРНР практично ідентичні параметрам РЛС 5Н86 ЗЦС, а багато з них і кращі, що також вказує на можливість використання наявних функціональних систем РЛС 5Н86 ЗЦС для цілей контролю іоносфери.

При цьому важливо, щоб дослідження іоносфери і внесення відповідних поправок при автоматизованій обробці розсіяних від іоносфери сигналів не погіршувати здатність РЛС виявляти і супроводжувати літальні апарати. Цю особливість потрібно використати при організації робочого циклу штатної роботи по цілі і контролю іоносфери, при побудові алгоритмів обробки і формуванні вихідних повідомлень. Багаторічний набір статистики показав, що для РЛС дальнього виявлення метрового діапазону радіохвиль значним для внесення іоносферних поправок є інтервал стаціонарності іоносфери, рівний одній годині. З огляду на сучасну інтенсивність запусків, встановлену з вітчизняних і міжнародних каталогів КО, велика частина яких незмінна, робить можливим в часовій діаграмі роботи РЛС виділити як цикл контролю КО, так і цикл контролю КІ. Один із можливих способів, що був реалізований в ІРНР, полягає у визначенні необхідного часового інтервалу окремо для кожного режиму (рис. 3).

У режимі контролю іоносфери ІРНР аналіз одного напрямку вимагає 58.87 с, що становить 1.64 % часового ресурсу радара, решту часу відведено контролю космічних об'єктів. Контроль простору РЛС 5Н86 здійснюється повільним

оглядом (ПО) і швидким оглядом (ШО). ШО використовується тільки для виявлення цілей і дозволяє суттєво зменшити час огляду (період огляду всього сектору дорівнює близько 10 с, а з використанням ПО період огляду значно збільшується (20.96 с).

Мінімальний період огляду сектору однією СРЛС

$$T_{\min} = \frac{\Delta\epsilon}{\Delta\epsilon_{0.5}} T_{\Pi},$$

де $\Delta\epsilon$ — розмір сектору огляду по азимуту, $\Delta\epsilon_{0.5}$ — розмір діаграми спрямованості по азимуту, T_{Π} — період повторення зондувальних сигналів, який визначається максимальною дальністю супроводу цілей.

Як впливає з оціночних розрахунків часових параметрів, суміщення двох функцій з використанням поєднаної антени РЛС (або інших варіантів) можливе, причому дані іоносферних вимірювань можуть бути застосовані для роботи самої РЛС. Часові характеристики ІРНР — такт передачі 1 мс, такт прийому 8 мс, такт обробки 35 мс — цілком можна реалізувати на базі РЛС 5Н86 ЗЦС.

Для ефективного використання часового ресурсу РЛС ККП при проведенні іоносферних вимірювань важливим є вибір кількості напрямків, в яких необхідна побудова іоносферного профілю та апроксимація отриманих даних для інших напрямків сектора відповідальності РЛС. Збільшення кількості вимірювань в секторі підвищує точність відновлення іоносферного профілю, але при цьому вимагає більшого часового ресурсу. Для цього потрібно використовувати наявну чи розробити нову карту іоносферних неоднорідностей в точці дислокації РЛС 5Н86. Серед відомих найбільшу популярність має міжнародна довідкова модель іоносфери IRI (International Reference of Ionosphere) [18]. Останні версії — IRI-2007 і IRI-2012 — хоча і є глобальними медіанними моделями іоносфери, але точність визначення концентрації електронів у іоносфері, наприклад, моделлю IRI-2007, становить всього 15...25 %, чого часто недостатньо, і тому необхідна адаптація моделі до поточного стану іоносфери. Метод ВЗ іоносфери характеризує стан іоносфери в невеликій околиці станції ВЗ, чого

при далекій радіолокації недостатньо, і тому необхідне дослідження можливості адаптації за даними методу ЗПЗ, який характеризує іоносферу у великому регіоні.

В основі алгоритму визначення електронної та іонної концентрації у бар'єрній зоні роботи 5Н86 можуть бути використані дані, отримані в результаті багаторічних спостережень стану іоносфери за допомогою як ІРНР, так і ХРНР. Дистанційно-частотні характеристики (ДЧХ), які отримуються при ЗПЗ в широкому секторі азимутів і які характеризують стан іоносфери у великому регіоні, дозволяють провести адаптацію наявних моделей ІРІ до поточного стану іоносфери в даному регіоні. Так, в даний час вже розроблено способи адаптації моделі та корекції за даними зворотно-похилого зондування [16], а одночасне зондування іоносфери у вертикальному і похилому напрямках за допомогою радарів значно підвищує можливості дослідження іоносфери [6].

При виконанні заходів щодо модернізації РЛС 5Н86 стає можливим використання сигналів з новими частотно-часовими параметрами, тому одним із завдань, які потрібно буде розв'язати в ході реалізації функції контролю іоносфери, є вибір виду зондувального сигналу, з урахуванням сигналів, які використовують сучасні РЛС ККП і РНР. В даний час найчастіше використовуються ФКМ і лінійно-частотно модульовані (ЛЧМ) сигнали. В РЛС ККП, зокрема і в РЛС 5Н86, ЛЧМ-сигнали досі не застосовувались з кількох причин. Для ЛЧМ-сигналу властива неоднозначність визначення частоти Доплера, а при рівні бічних пелюсток, всього на 13 дБ нижчому від основного, спостерігається прийом шумів, які призводять до помилок визначення часового положення, для усунення яких потрібно формувати спеціальну діаграму спрямованості і зміни амплітуд обвідної на її краях. Для потужних РЛС це неможливо, зважаючи на особливості роботи кінцевих підсилювачів, що працюють в режимі кл. «С» з неможливістю керування зміною амплітуди. Застосування ЛЧМ-сигналу, таким чином, потребує розробки додаткових пристроїв. Як відомо, ширина діаграми спрямованості, роздільна здатність і сама база ЛЧМ-сигналу пов'язані з девіацією. Ширина діаграми спрямо-

ваності обернено пропорційна частоті девіації ЛЧМ-сигналу, тому застосування ЛЧМ-сигналу має на увазі збільшення девіації, але це призводить до формування вузької діаграми.

Через те що більшість вимог, які пред'являються до зондувальних імпульсів, як з точки зору забезпечення монохроматичності випромінювання, так і з точки зору забезпечення достатньої роздільної здатності, носять суперечливий характер, необхідні подальші дослідження можливих видів сигналів.

Найбільш дискусійним є питання щодо варіантів використання антен, але однозначно ясно, що робота антени повинна бути реалізована в наявному частотному діапазоні з можливістю її багатофункціонального використання для реалізації обох функцій. Модернізація антени може полягати або у збереженні наявної у заміні рупорної антени типу 6ПА на поєднану приймально-передавальну систему з фазованими антенними решітками у модульному виконанні. З огляду на енергоспоживання РНР становить науковий інтерес можливість роботи антенної системи 5Н86 для цілей іоносферних спостережень у пасивному режимі, хоча такий досвід для ІРНР вже є — це звичайна процедура реєстрації сигналів без посилки зондувального імпульсу.

Можливість інтегрованого застосування наявних інструментальних засобів контролю з огляду на сучасну тенденцію побудови багатофункціональних РЛС потребує проведення НДР за участю фахівців НЦУВКЗ, Головного конструктора та Інституту іоносфери, що дозволить отримати техніко-економічне обґрунтування і конструктивно-схемні рішення для реалізації такої можливості.

У рамках методології загальної теорії систем можливі два принципово різних підходи до обґрунтування складних систем озброєння. Згідно із досвідом проектування РЛС ККП тривалість проектування складних наукоємних систем за канонічною моделлю розробки, з урахуванням повного циклу «розробка — виготовлення — випробування», становить 7...10 років. Тому для умов України найкращим рішенням є модернізація 5Н86, коли майбутній вигляд зразка нового покоління не зовсім очевидний, і поетапна модернізація з одночасною оцінкою досягнутих

результатів є найменш ризиковим шляхом формування цього вигляду.

Виходячи з наявних функціональних систем станції, є кілька способів реалізації функції контролю іоносфери РЛС 5Н86. Насамперед — розробка методик і програм поділу та ідентифікації адитивного сигналу з використанням специфічних особливостей сигналів. Для підвищення продуктивності доцільне використання стробування в такті прийому, коли обробка даних відбувається тільки під час перебування сигналу в зоні контролю КО, при цьому структура обчислювальних засобів РЛС може містити окремі електронні обчислювальні модулі для обробки розділених сигналів. Реалізація цього способу можлива завдяки використанню надмірності систем станції і потребує невеликого обсягу апаратно-програмних доопрацювань станційної апаратури — узгодження, перетворення, синхронізації шлейфів і взаємообмінів з електронними обчислювальними модулями з використанням станційних осередків і блоків.

Для реалізації РЛС 5Н86 нової цільової функції контролю іоносфери потрібно з адитивної суміші сигналу виділити сигнал іоносфери шляхом ідентифікації і поділу в станційному сигнальному шлейфі та провести його попереднє перетворення для передачі споживачеві. Для цього потрібне створення кабельного іоносферного шлейфу (КШІ), аналогічного станційному сигнальному з використанням конструктивно-схемних побудов станції. У випадку поєднання в РЛС функцій контролю КО і КІ необхідно доопрацювати програмно-алгоритмічне забезпечення (ПАЗ) для забезпечення ідентифікації сигналів КО і КІ у спільному сигнальному шлейфі РЛС, виділення іоносферних сигналів і передачі їх по КШІ на пристрої прийому, перетворення і передачі споживачеві. Технічні і програмно-алгоритмічні рішення 5Н86 дозволяють реалізувати зовнішній доступ до обчислювальних і енергетичних ресурсів можливих споживачів. При цьому способом вся прийнята РЛС іоносферна інформація повинна підлягати подальшій обробці у споживача. Цілком очевидно, що простота реалізації способу не зможе забезпечити ефективність контролю іоносфери,

коли для потенційних споживачів закладаються великі труднощі при реалізації необхідних функціональних пристроїв. Для усунення можливих труднощів цього способу доцільно весь процес контролю іоносфери реалізувати безпосередньо на РЛС 5Н86 з використанням, доопрацюванням наявних і вводом ряду нових функціональних систем РЛС в ході її модернізації. Одним із способів підвищення швидкодії передачі може бути застосування оптоволоконних технологій.

НЦУВКЗ проводить ряд НДР на РЛС 5Н86 ЗЦС, серед замовлених робіт є і НДР «Розробка пропозицій та науково-технічне обґрунтування напрямків модернізації РЛС 5Н86», і вже проведено роботи, які зачіпають основні системи РЛС, однак серед них немає обговорюваної теми. Виходячи з мети реалізації функції іоносферного контролю 5Н86, для проведення модернізації необхідне доповнення напрямків модернізації та включення в загальний список виконавців фахівців Головного розробника та Інституту іоносфери з доповненням іншими виконавцями-споживачами. Потрібно відзначити, що ряд пропонованих робіт вже реалізовані і успішно використовуються в апаратних засобах Інституту іоносфери, практику реалізації якого необхідно враховувати та використовувати.

У цьому способі реалізація функції контролю іоносфери на базі наявної РЛС 5Н86 потребує створення модуля контролю іоносфери (МКІ), основними новими функціональними системами якого будуть приймач з низьким рівнем власних шумів та додаткові обчислювальні засоби (ДОЗ). У загальному випадку проект реалізації функції контролю іоносфери повинен включати:

- введення ДОЗ з відкритою архітектурою;
- розробку ПАЗ обробки результатів в реальному масштабі часу з оперативною передачею результатів у базу даних;
- модернізацію приймального тракту з урахуванням введення каналу контролю іоносфери;
- розробку реєструвального комплексу на основі швидкодіючих аналогово-цифрових перетворювачів і сигнальних процесорів;
- доробку наявних (або введення нових) систем передачі даних з урахуванням організації оперативної передачі інформації новим споживачам;

- використання інформаційних можливостей наявних вітчизняних оптичних наземних, космічних і перспективних засобів контролю іоносфери.

Однією з найважливіших задач в ході модернізації буде оснащення РЛС 5Н86 додатковими ДОЗ, що дозволить створити на РЛС 5Н86 ЗЦС комплекс алгоритмів збору та обробки геліо-географічних даних в інтересах вирішення перерахованих вище завдань. Використання штатних обчислювальних засобів 5Е73 недоцільне, а з огляду на рівні потрібних значень швидкодії і енергоспоживання, для реалізації функції контролю іоносфери доцільне застосування сучасних обчислювальних засобів.

В ході проведених в 2017—2018 рр. робіт з модернізації РЛС 5Н86 ЗЦС вченими Житомирського військового ВНЗ досліджено можливість заміни штатної обчислювальної машини 5Е73 на сучасні ЕОМ з розробкою нового ПАЗ.

Розпочата в 2023 році Інститутом транспортних систем і технологій НАН України наукова робота на тему «Розробка технології відновлення функцій радіоелектронної апаратури, використовуючи нове покоління елементної бази», показала, що функції вищих рівнів конструктивно-ієрархічного розбиття 5Н86 можна реалізувати нижчими рівнями. Наприклад, функції шафи 4ПК01 можуть бути реалізовані блоком, а функції блоку — осередком.

Тому апаратура ДОЗ може розміщуватися в технологічних приміщеннях РЛС з утворенням відповідних робочих місць. У комплект робочого місця повинен входити спецобчислювач (СОВ) і пристрій для підключення СОВ до інформаційних каналів виробу. На ДОЗ доцільно реалізувати прогнозні моделі стану іоносфери і кількісної оцінки її параметрів, для корекції яких буде використовуватися зібрана інформація. Такі моделі дозволять розрахунок розподілу концентрації електронів уздовж траси поширення радіохвиль, повороту площини поляризації, групового та фазового запізнювання, доплерівського зсуву частоти тощо.

Модернізація передавальної системи РЛС 5Н86 повинна проводитися з використанням науково-технічного доробку (НТД), створеного вітчизняним розробником практично всіх поколінь РЛС ККП — КБ «Дніпровське». Сучасний тренд полягає в застосуванні модульної побудови основних функціональних систем. Так, РЛС ККП Волга (Pill Box) містить близько 5000 передавальних модулів, РЛС АН/FPS-132 використовує 2560 приймально-передавальних модулів. Напівпровідникові мікроелектронні технології дозволяють значно зменшити розміри конструктивних елементів, забезпечити можливість більш ефективного використання антенного полотна, забезпечити значне зниження енерговитрат, а також можливість формування імпульсів у великому діапазоні тривалостей.

Використання малих рівнів потужності кожного окремого передавального модуля дозволяє значно підвищити сумарну імпульсну потужність випромінювання порівняно з тією, що є зараз (для порівняння: середня вихідна потужність модуля РЛС Волга — становить приблизно 0.4 кВт; РЛС АН/FPS-132 — 0.34 кВт).

Як відомо, недоліком РНР є велика споживча потужність, але використання сучасних виробів дозволить зменшити цю величину, що робить привабливим використання 5Н86.

Приймальна система повинна стати повністю цифровою з розташуванням безпосередньо в антені. Сигнали з антен посилюються у малошумних підсилювачах, фільтруються і оцифровуються, при цьому широкий динамічний діапазон (70 дБ) дозволить приймати як слабкі сигнали некогерентного розсіяння від нейтральної та іонізованої атмосфери, так і потужні когерентні сигнали.

Крім того, в апаратуру прийомних каналів після проходження оцифровки сигналів повинні бути вбудовані процесори попередньої цифрової обробки і тестового контролю прийомних трактів — це економить обсяг обчислювальних засобів РЛС і каналів передачі інформації, а також знижує втрати при обробці сигналів за рахунок цифрових методів вирівнювання неідентичності каналів ФАР і найбільш повного збереження обсягу радіолокаційної інформації.

В останні роки дослідження іоносфери радіофізичними методами доповнилося і оптичними і значно просунулося вперед. У процесі модер-

нізації РЛС 5Н86 Дніпро необхідно розглянути можливість використання національних оптичних і квантово-оптичних інструментальних засобів, які дозволять розширити діагностичні можливості радіолокаційного інструментального засобу [13]. З огляду на дислокацію РЛС 5Н86 доцільно для передачі даних з місця її розташування організувати канал односторонньої дії з підвищеною завадостійкістю, що дозволить реалізувати автоматизований режим обробки геофізичної інформації і надасть можливість участі у міжнародній мережі РНР.

Пропонований метод зондування іоносфери з використанням РЛС 5Н86 підтверджено свідомством на винахід України [11].

Доцільно в ході робіт розвивати наявні в Україні структури за участю НЦУВКЗ, Інституту іоносфери та інших установ, що дозволить проводити фундаментально-прикладні дослідження у рамках вирішуваних завдань.

ВИСНОВКИ

Конструктивно-схемна побудова наявної РЛС зумовлює привабливість її використання для ви-

рішення ряду наукових і практично значущих завдань.

Мультиплікативний ефект взаємного збагачення технологій веде до підвищення гнучкості, збільшення обсягу і цінності одержуваної інформації, зменшення трудомісткості створення наукової продукції та ефективного використання отриманих результатів.

У поєднанні з установкою НР Харківського інституту іоносфери РЛС 5Н86 могла б значно збільшити обсяг і цінність внеску вітчизняних дослідників у глобальні міжнародні програми дослідження іоносфери. Немає сумніву в тому, що модернізований науковий центр, який має доступ до унікальних інформаційних засобів, буде залучений до участі в національних і міжнародних програмах досліджень глобальних змін клімату, довкілля та сонячно-земних зв'язків.

Стаття не претендує на повноту, достатність і завершеність, а є продовженням наукових досліджень, пов'язаних з розширенням можливостей РЛС 5Н86. Автори сподіваються на широке обговорення фахівців, що дасть змогу знайти найбільш ефективні шляхи вирішення поставленої мети.

ЛІТЕРАТУРА

1. Андреев Ф. М., Ковбасюк С. В. Возможности многопозиционного комплекса, созданного на базе национальных РЛС надгоризонтного обнаружения баллистических и космических объектов. *Космична наука і технологія*. 2009. **15**, № 5. С. 74–81.
2. Березовский В. А., Золотарев И. Д., Васенина А. А., Свешников Ю. К. Определение параметров КВ радиолитии по результатам возвратно-наклонного зондирования ионосферы. *Вестн. Омского ун-та*. 2011. № 2. С. 98–102.
3. Богомаз А. В. Влияние ширины спектра зондирующего радиоимпульса на точность расчета параметров ионосферной плазмы в методе некогерентного рассеяния радиоволн. *Радиотехника*. 2013. Вып. 174. С. 27–31.
4. Бурмака В. П., Таран В. И., Черногор Л.Ф. Радарные наблюдения волновых процессов в ионосфере, которые сопровождают полеты космических аппаратов. *Космична наука і технологія*. 2004. **10**, № 5-6. С. 113–116.
5. Емельянов Л. Я., Живолуп Т. Г. Институт ионосферы НАН и МОН Украины. Краткий исторический обзор. *Вісник Нац. техн. ун-ту «Харківський політехнічний інститут»*. *Радіофізика та іоносфера*. 2011. № 44. С. 3–10.
6. Емельянов Л. Я., Чепурный Я. Н. Обеспечение режима одновременного зондирования ионосферы в вертикальном и наклонном направлениях с помощью радаров некогерентного рассеяния. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2017. № 47 (1268). С. 44–50.
7. *Концепція реалізації державної політики у сфері космічної діяльності на період до 2032 року*. К: ДКА України, 2012. 48 с.
8. Лаврич Ю. Н., Нетак Б. Б., Плаксин С. В., Пяковський Д. В. Особенности отечественной школы радиолокационных систем контроля космического пространства. *Наука та інновації*. 2019. **15**, № 2. С. 80–90.
9. Моргун А. А., Поляков А. Л., Ломоносов С. Е. Аналіз можливостей розширення спектру завдань окремих радіотехнічних вузлів. *Зб. наук. праць Харків. ун-ту Повітряних Сил*. 2012. Вып. 4(33). С. 103–107.
10. Панкова Л. В., Каленов С. Ю. *Приоритеты зарубежных НИОКР двойного назначения*. М: ИМЭМО РАН, 2016. 23 с.
11. Патент України №141158. Лаврич Ю. М., Плаксин С. В., Погоріла Л. М., Пяковський Д. В., Щербаков О. П. Спосіб моніторингу іоносфери радіолокаційною станцією контролю космічного простору. Опубл. 25.03.2020, Бюл. № 6.

12. Пономарчук С. Н., Куркин В. И., Пензин М. С. Исследование особенностей возвратно-наклонного зондирования ионосферы на базе ЛЧМ-иозонда. *Солнечно-земная физика*. 2017. **3**, № 3. С. 61—69.
13. Присяжний В. І., Яцків Я. С. Про співпрацю Національної академії наук України і Державного космічного агентства України зі створення системи контролю та аналізу космічної обстановки. *Вісн. НАН України*. 2021. № 12. С. 85—89.
14. Разработка программно-алгоритмического обеспечения ионосферного канала: Научно-техн. отчет. М.: ФГУБН ИСЗФ СО РАН, 2014. 66 с.
15. *Сейсмоионосферные и сейсмoeлектромагнитные процессы в Байкальской рифтовой зоне*. Ред. Г. А. Жеребцов. Новосибирск: СО РАН, 2012. 304 с.
16. Тетерин К. А. Региональная адаптация модели ионосферы IRI с использованием данных возвратно-наклонного зондирования. *Гелиогеофиз. исслед.* 2014. Вып. 7. С. 103—107.
17. Эванс Дж. Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом НР. *Тр. Ин-та инженеров по электронике и радиотехнике*. 1969. **57**, № 4. С. 139—145.
18. Bilitza D., Reinisch B. W. International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv. Space Res.* 2008. **42**, № 4. P. 599—609.

REFERENCES

1. Andreev F. M., Kovbasyuk S. V. (2009). Opportunities of a multi-position complex created on the basis of national radars for the ballistic and space objects over-horizontal detection. *Space Science and Technology*, **15**(5), 74—81 [in Russian].
2. Berezovsky V. A., Zolotarev I. D., Vasenina, A. A., Sveshnikov Yu. K. (2011). Determining the parameters of the shortwave radio line on the results of ionosphere return-inclined sounding. *Bull. Omsk. Univ.*, № 2, 98—102 [in Russian].
3. Bogomaz A. V. (2013). Influence of the Spectrum Width of a Sounding Radio Pulse on the Accuracy of Calculating the Ionospheric Plasma Parameters in the Radio Waves Incoherent Scattering Method. *Radio engineering*, № 174, 27—31 [in Russian].
4. Burmaka V. P., Taran V. I., Chernogor L. F. (2004). Radar observations of wave processes in the ionosphere that accompany spacecraft flights. *Space Science and Technology*, **10**, № 5-6, 113—116 [in Russian].
5. Emelyanov L. Ya., Zhivolup T. G. (2011). Institute of the Ionosphere of the National Academy of Sciences and the Ministry of Education and Science of Ukraine. Brief historical review. *Bull. Nat. Technical Univ. "Kharkiv Polytechnic Institute". Collection of scientific works. Thematic issue: Radiophysics and the ionosphere*, № 44, 3—10.
6. Emelyanov L. Ya., Chepurny Ya. N. (2017). Ensuring the mode of simultaneous sounding of the ionosphere in the vertical and oblique directions using incoherent scatter radars. *Bull. NTU "KhPI"*, № 47 (1268), 44—50 [in Russian].
7. *The concept of state policy realization in the field of space activity for the period up to 2032* (2012). K: SKA of Ukraine, 48 p. [in Ukrainian].
8. Lavrich Yu. N., Netak B. B., Plaksin S. V., Piaskovsky D. V. (2019). Features of the domestic school of radar systems for space control. *Sci. innov.*, **15**, № 2, 80—90 [in Russian].
9. Morgun A. A., Polyakov A. L., Lomonosov S. E. (2012). An analysis of the expansion of the spectrum for individual radio-technical systems. *Issue of scientific works of the Kharkiv University of Air Force*. № 4(33), 103—107 [in Ukrainian].
10. Pankova L. V., Kalenov S. Yu. (2016). Priorities of dual-purpose foreign R & D. M: IMEMO RAN, 23 p. [in Russian].
11. *Patent of Ukraine № 141158*. Lavrich Yu. M., Plaksin S. V., Pogorila L. M., Pyaskovsky D. V., Shcherbakov O. P. A method for ionosphere monitoring with a radar control space station., Publ. 03.25.2020, Bull. 6 [in Ukrainian].
12. Ponomarchuk S. N., Kurkin V. I., Penzin M. S. (2017). The research of the oblique-backward ionosphere sounding peculiarities on the base on the LFM ion-probe. *Solar-Earth phys.*, **3**(3), 61—69 [in Russian].
13. Prysiazhnyi V. I., Yatskiv Ya. S. (2021). About the cooperation of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine on the creation of the space environment control and analysis system. *Bull. Nat. Acad. Sci. of Ukraine*, № 12, 85—89 [in Ukrainian].
14. *Development of software and algorithmic support for the ionospheric channel: Scientific and technical report* (2014). М.: FGUBN ISZF SO RAN, 66 p. [in Russian].
15. *Seismoionospheric and seismoelectromagnetic processes in the Baikal rift zone*. (2012). Ed. G. A. Zherebtsov. Novosibirsk: SB RAS, 304 p. [in Russian].
16. Teterin K. A. (2014). Regional adaptation of the IRI ionospheric model using oblique-backward sounding data. *Heliogeophys. res.*, № 7, 103—107 [in Russian].
17. Evans J. (1969). Theoretical and practical issues of the study of the ionosphere by the HP method. *Tr. Inst. engineers in electronics and radio engineering*, **57**, № 4, 139—145.

18. Bilitza D., Reinisch B. W. (2008). International Reference Ionosphere 2007: Improvements and New Parameters. *Adv. Space Res.*, **42**, № 4, 599–609.

Стаття надійшла до редакції 24.02.2023

Після доопрацювання 27.07.2023

Прийнято до друку 07.08.2023

Received 24.02.2023

Revised 27.07.2023

Accepted 07.08.2023

Yu. N. Lavrich¹, Ph. D. in Tech. Sci., associate professor, Leading Researcher

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3616-2135>

E-mail: lavrich@westa-inter.com

M. I. Bistrov², Laureate of the State Prize of Ukraine in the fields of science and technology,

Senior designer of the distant surveillance radar, Head of Dniprovske Design Bureau

E-mail: bustrovni@gmail.com

V. I. Prysiazhnyi³, Ph. D. in Tech. Sci., associate professor, Laureate of the State Prize of Ukraine in the fields of science and technology, Head of the National Center for Control and Tests of Space

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7825-9037>

E-mail: vip.17071957@gmail.com

D. V. Pyaskovskyi⁴, expert, Laureate of the State Prize of Ukraine in the fields of science and technology,

Ph. D. in Tech. Sci

E-mail: piaskovskyi_dv@use.ua

¹Institute of Transport Systems and Technologies of the National Academy of Sciences of Ukraine

5, Pysarzhevskiyi Str., Dnipro, 49005 Ukraine

²Design Bureau Dniprovske

34, Budivelnikiv Str., Dnipro, 49089 Ukraine

³National Center of control and tests of space vehicles

8, Kniaziv Ostrozkykh Str., Kyiv, 01010 Ukraine

⁴State Space Agency of Ukraine

8, Kniaziv Ostrozkykh Str., Kyiv, 01010 Ukraine

REALIZATION OF THE TECHNOLOGY OF DUAL USE OF OUTER SPACE CONTROL MEANS

Context. The radar means of outer space control are monofunctional systems, despite their potential multifunctionality. To ensure the effective implementation of target functions, only some of the total number of potential functions are used, other existing functions are not studied and as a result, don't used. The target functions of most existing domestic and foreign radiolocation stations on space control RLS SC are practically reduced only to the control of space objects in different orbits. The obtained information is not fully used, so the new target doesn't form. As the history of the development of defense complexes shows, in most industrialized countries there are examples of the use of military developments for civilian purposes (spin-off) and civilian developments for military purposes (spin-on). As a result of these synergy processes emphasis on the strategy of double technologies and double innovation increased.

Objective. The aim of the work is to study the possibility of introducing an ionospheric channel into the domestic radar station 5N86 Dnipro (Hen House) and expanding its intended use by using most of its functional systems to implement the ionosphere control function.

Method. The paper uses a comparative analysis of the main functional systems and technical characteristics of the 5N86 Dnipro radar and non-coherent scatter radars (PHR) of the global ionosphere control network.

Results. The main characteristic features of the RLS 5N86 are analyzed and, taking into account the characteristics of the signals, the possibility of using the multifunctionality of the radar to form a new target function for monitoring outer space is substantiated. From an applied point of view, a number of specific scientific and practical solutions are given, aimed at the realization of dual-purpose technology in the implementation of the ionosphere control function by a radar station - both for solving the problems of increasing the own efficiency and for the interests of fundamental science. It is shown that the creation of new target RLS is based on both the use of already existing systems and the introduction of new ones. The importance of the scientific task on the implementation of the ionosphere control function and the possibility of integrating into the global ionosphere control network is substantiated.

Conclusions. The presence of scientific and technical developments and the practical experience of the domestic RLS SC developer makes the new target function realization absolutely realistic. The implementation of the double-purpose technology will ensure an effective solution for both applied and fundamental scientific tasks.

Keywords: radiolocation stations on space control (RLS SC), ionosphere, incoherent scattering radars (ISR), radiolocation.