

NEWS

OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES

ISSN 1991-346X

<https://doi.org/10.32014/2020.2518-1726.58>

Volume 3, Number 331 (2020), 231 – 238

UDK 550.380

IRSTI 37.15.03

V. M. Somsikov, A. B. Andreev, V. I. Kapytin, S. N. Mukasheva

Institute of the Ionosphere, National Center for Space Research and Technology, Almaty, Kazakhstan.
E-mail: vmsoms@rambler.ru, alexey.andreyev@rambler.ru, kapytinsanct@mail.ru, snmukasheva@gmail.com

**BEHAVIOR OF ACOUSTIC-GRAVITATIONAL WAVES
IN THE MESOSPHERE OVER THE KAZAKHSTAN REGION**

Abstract. Kazakhstan has been going on for more than 10 years carried out studies I effects in the mesosphere at the basis of modern optical spectrometer SATI (Spectral airglow the Temperature Imager), which is mounted on a mountain complex of Ionosphere Institute - radiopoligone «Orbita» at an altitude of 2730 m above sea level [43 ° 03'30 " N , 76 ° 58'24 " E]. The results of a continuous series of optical spectrometric observations of variations in the mesosphere between 2010 and 2016. Observations were made in Kazakhstan on the basis of modern optical spectrometer SATI (Spectral airglow Temperature Imager), which is mounted on a mountain complex of Ionosphere Institute - radiopoligone "Orbita" at an altitude of 2730 m above sea level [43 ° 03'30 " N , 76 ° 58'24 " E]. The spectral analysis of recorded wave disturbances over the entire observation period showed a wavelength distribution characteristic of acoustic-gravitational waves. It has been established that the maximum number of recorded disturbances in the mesosphere is about 100-200 km long, a noticeable separate peak is observed for wavelengths of about 350-400 km. The directions of propagation of acoustic-gravitational waves have a seasonal dependence. The western maximum in the distribution directions is observed in all seasons. The south-south-western maximum is observed mainly in winter and autumn. East-north-east has a maximum value in the spring-summer months.

Keywords: mesosphere, atmosphere, acoustic-gravitational waves.

1. Introduction. The most difficult to study area of the atmosphere is the mesosphere, lying between the lower atmosphere and ionospheric altitudes at altitudes from 40-50 to 80-90 km. The composition of the mesosphere, its temperature regime, and the chemical and dynamic processes occurring in it are increasingly of interest to geophysicists in connection with the sensitivity of this atmospheric region to variations in solar activity, chemistry of meteor metals, changes in the Earth's climate and long-term anthropogenic effects [1-3].

At present, the role of acoustic-gravitational waves (AGW) in the transfer of energy from the troposphere to the mesosphere and lower thermosphere is actively and is being investigated : changes in the ebbs and flows in the ionosphere [4], ozone variations in the upper mesosphere [4] associated with the sudden warming of the stratosphere [5-6], as well as AGW in the thermosphere and ionosphere, associated with tropical cyclones [7-8]. Work is underway to create and improve three-dimensional global models of the mesosphere and thermosphere, taking into account long-term ground-based and satellite measurements of helio-geophysical parameters [9-15].

Kazakhstan has been going on for more than 10 years carried out studies I effects in the mesosphere at the basis of modern optical spectrometer SATI (Spectral airglow the Temperature Imager), which is mounted on a mountain complex of Ionosphere Institute - radiopoligone «Orbita» at an altitude of 2730 m above sea level [43 ° 03'30 " N , 76 ° 58'24 " E] [16 -17].

This paper presents the results of a continuous series of optical spectrometric observations for the period of more than 6 years in 2010 and 2016, since in order to identify statistically significant patterns in the behavior of the AGW at altitudes mesosphere during periods of solar activity and increased seismic activity.

2. Optical research in the field of the mesosphere

The SATI instrument employs a spectral method for detecting hydroxyl intrinsic thermal radiation in a maximum emission layer located at an altitude of approximately 87 km at night [18-21]. The temperature in the mesosphere is determined by comparing the measured emission spectrum of OH (6-2) hydroxyl bands at a wavelength of 836 nm with model spectra calculated for different vibrational-rotational temperatures of hydroxyl molecules. The registration of atmospheric hydroxyl radiation was carried out from spatially separated sections of the night sky - on a horizontal ring with a diameter of about 100 km and a width of 14-16 km (figure 1).

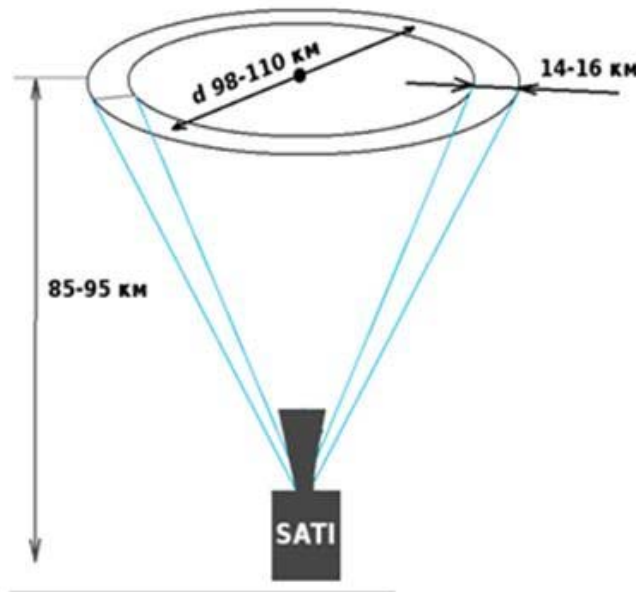


Figure 1 – Scheme of operation of the SATI spectrometer

The device operates in a regular automatic mode. The exposure time of the spectrometer is 1 minute. The average temperature in the mesosphere was monitored at night, and AGW was recorded. It determines the direction of propagation of the wave, its speed, the oscillation period and amplitude as well.

3. Methods for processing experimental SATI data

To identify statistically significant patterns in the behavior of AGW at mesopausal altitudes during periods of solar activity and increased seismic activity, data from continuous series of optical observations for a period of more than 6 years from 2010 to 2016 were processed.

As the primary data processing, the spectral images of the SATI instrument are recalculated into the values of temperature and night sky emission of the mesosphere region. Figures 2 and 3 shown the examples of the results of processing data from optical temperature measurements. The average values of temperature and hydroxyl emission over night for each month for 6 months for each month are shown in Figure 3. As a result of the initial processing of data for 6 years of measurements at SATI from 2010 to 2016, a tendency to decreases values of the maximum mesosphere temperature was found, at an altitude of 87 km, it has a maximum in November-December.

In order to determine the behavior of moving wave disturbances in the mesosphere, the necessary software was created to process SATI data using a modified Fourier transform algorithm known as the co-phase technique [22]. This software allows you to automatically detect moving wave disturbances, determine the propagation direction, wave period, propagation velocity and wavelength from optical SATI measurements (temperature and hydroxyl emission). Using these programs, the results of SATI measurements for the period from 2010 to 2016 were processed.

The temperature values are shown after removal of the constant component and harmonics with periods of more than 90 minutes. So, for a given night of measurements, the main wave mode is a

horizontally propagating wave perturbation moving in a southeast direction. During 6 hours of observation, the direction of propagation changed by no more than 30 degrees, the wave speed is 140-160 km/h, the oscillation period is 40-50 minutes, and the wavelength is defined as 90-130 km.

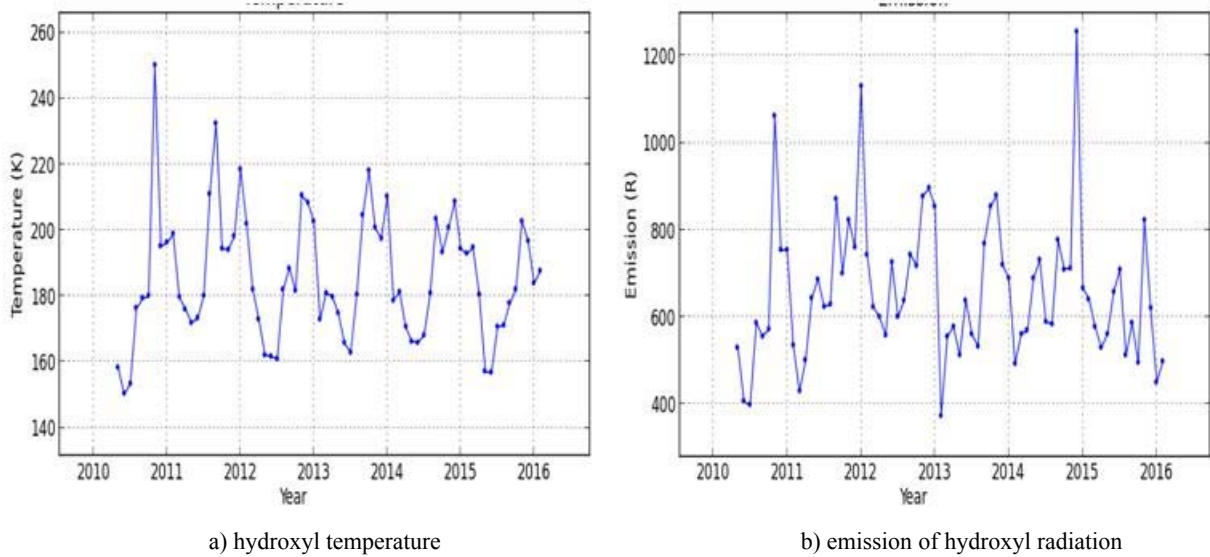


Figure 2 – Monthly average values of temperature and emission of hydroxyl radiation at an altitude of 87 km

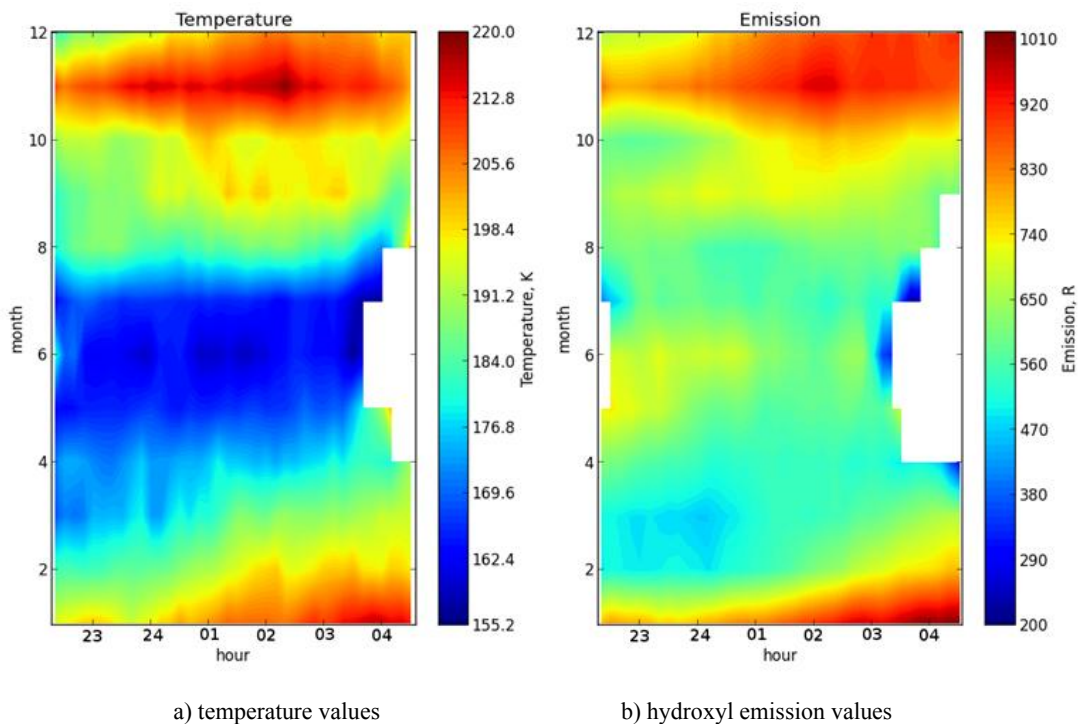


Figure 3 – The values of temperature and hydroxyl emission depending on the time of year and time of day

Figure 4 shown the typical during action registration AGW night on May 11 2010. The ordinate shows the sectors on the ring from which SATI registers night sky radiation.

An analysis of the recorded wave disturbances over the entire observation period showed a wavelength distribution characteristic of the AGW (figure 5). As follows from figure 5, the maximum number of recorded disturbances in the mesosphere has a length of about 100-200 km. There was also a noticeable separate peak for wavelengths of about 350-400 km.

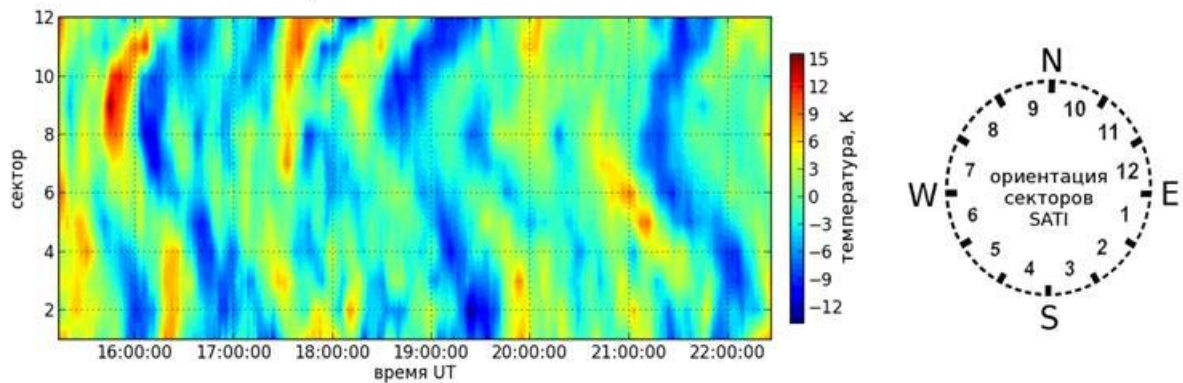


Figure 4 – Wave structure of hydroxyl temperature, values for various points on the plane of the «ring» with a diameter of ≈ 100 km during the night, according to observations at SATI 05/11/2010

To highlight the background features of the behavior of AGW in the mesosphere according to SATI, the entire period of observation data for 5 years (2010-2015) broke by seasons. Figure 6 shows the distribution for the AGW along the direction of propagation for the different seasons, clear, that the direction of propagation AGW have a seasonal dependency, especially perturbation moving east and west direction. One can distinguish the western and south-south-western and east-north-eastern maxima. The western maximum in the distribution directions is observed in all seasons. The south-south-west maximum is observed mainly only in winter and autumn. East-north-east, on the contrary, has a maximum value in the spring and summer months, although it is present in all seasons. In general, most waves have a western direction in winter and an eastern direction in summer. The characteristics of wave perturbations obtained in this way can be considered observable regularly, over 5 years of measurements at SATI.

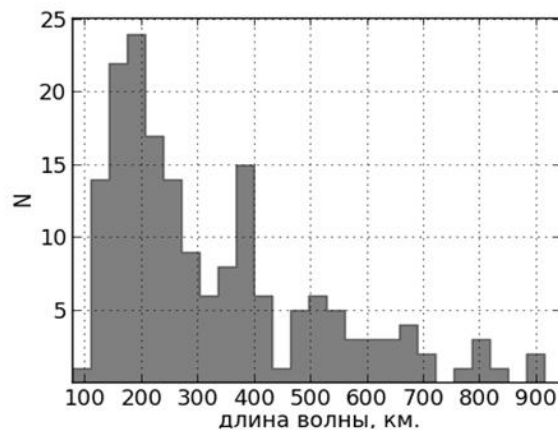


Figure 5 – Distribution of horizontal wavelengths of moving acoustic-gravitational waves in the mesosphere according to SATI for 5 years

To highlight the background features of the behavior of AGW in the mesosphere according to SATI, the entire period of observation data for 5 years (2010-2015) broke by seasons. Figure 6 shows the distribution for the AGW along the direction of propagation for the different seasons, clear, that the direction of propagation AGW have a seasonal dependency, especially perturbation moving east and west direction. One can distinguish the western and south-south-western and east-north-eastern maxima. The western maximum in the distribution directions is observed in all seasons. The south-south-west maximum is observed mainly only in winter and autumn. East-north-east, on the contrary, has a maximum value in the spring and summer months, although it is present in all seasons. In general, most waves have a western direction in winter and an eastern direction in summer. The characteristics of wave perturbations obtained in this way can be considered observable regularly, over 5 years of measurements at SATI.

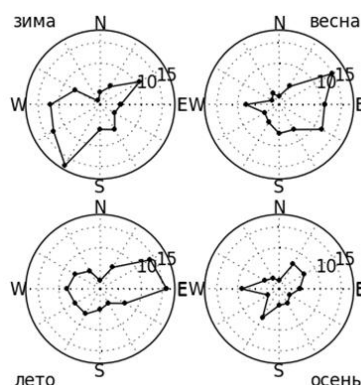


Figure 6 – Seasonal dependence of the directions of propagation of wave disturbances over 5 years

5. Conclusion. Solutions to the problems of the relationship of dynamic processes in the atmosphere with dynamic processes on Earth, prediction of catastrophic phenomena according to observations of variations in atmospheric parameters are extremely effective and relevant around the world. Therefore, they are developing intensively in all countries. Current global trends in the prediction of catastrophic geophysical events, including earthquakes, suggest the use of new methods for monitoring geophysical fields, a high degree of automation of the collection of recorded geophysical parameters and an operational analysis of the results.

Our studies in this direction allowed us to develop: the latest methods, algorithms and programs for solving problems of studying physical processes on Earth, including catastrophic events, based on an analysis of atmospheric wave disturbances in the acoustic-gravitational waves range according to data on variations in the glow of the sky at heights of the mesosphere connected. In particular, based on the results of these observations, algorithms have been created for calculating the efficiency of generation of acoustic-gravitational waves from specific ground-based sources of their propagation into the upper atmosphere, taking into account the specifics of the Almaty region.

To study the relationship between perturbations generated at the Earth's surface and perturbations at the ionospheric altitudes of spacecraft spans, data on variations in the mesosphere are needed. For these purposes, we use the latest equipment for recording optical radiation of oxygen and hydroxyl. The data obtained using this equipment make it possible to compose a general picture of dynamic processes in the atmosphere during various geophysical phenomena.

The work was performed according to the project PH 0118PK00798 in the framework of the target scientific and technical program O.0799.

В. М. Сомсиков, А. Б. Андреев, В. И. Капытин, С. Н. Мукашева

Ионосфера институты, Ұлттық ғарыштық зерттеулер мен
технологиялар орталығы, Алматы, Қазақстан

АКУСТИКА-ГРАВИТАЦИЯЛЫҚ ТОЛҚЫНДАР ТӘРТІБІ ҚАЗАҚСТАН Өңірінен мезосфера саласында

Аннотация. Мезосфераның құрамы, оның температуралық режимі, онда болып жатқан химиялық және динамикалық процестер осы атмосфералық аймақтың күн белсенділігінің вариациясына, метеорлық металдар химиясына, Жер климатының өзгеруіне және ұзақ мерзімді антропогендік әсерге сезімталдығына байланысты геофизиктерді көбірек қызықтырады.

Қазіргі уақытта тропосферадан мезосфераға және төменгі термосфераға энергия тасымалындағы акустико-гравитациялық толқындардың рөлі белсенді зерттеледі: ионосферадағы құймалар мен төгінділердің өзгеруі, стратосфераның кенеттен жылынуымен байланысты жоғарғы мезосферадағы озонның вариациясы, сондай-ақ тропикалық циклондармен байланысты термосферадағы және ионосферадағы акустико-гравитациялық толқындар. Мезосфера мен термосфераның үш өлшемді жаһандық модельдерін жасау және жетілдіру бойынша жұмыстар жүргізілуде.

Қазақстанда 10 жылдан астам уақыт бойы мезосфера саласында SATI (Spectral Airglow Temperature Imager) заманауи оптикалық спектрометрі негізінде әсерлерді зерттеу жұмыстары жүргізілуде, ол Ионосфера институтының биік таулы кешенінде – теңіз деңгейінен 2730 м биіктікте орналасқан «Орбита» радиополигонында [43°03'30"N, 76°58'24"E].

Осы жұмыста мезосфера биіктігіндегі акустико-гравитациялық толқындардың мінез-құлқындағы статистикалық маңызды заңдылықтарды анықтау мақсатында 2010 жылдан 2016 жылға дейін 6 жыл аралығындағы оптикалық спектрометриялық бақылаулардың үздіксіз қатарының нәтижелері келтірілген.

Деректерді бастапқы өңдеу ретінде SATI құралының спектрлік бейнелері мезосфера аймағындағы түнгі аспанның температурасы мен эмиссиясының мәндеріне қайта есептелген. Деректерді бастапқы өңдеу нәтижесінде SATI-де 2010 жылдан 2016 жылға дейін өлшеудің 6 жылы ішінде мезосфераның ең жоғары температурасының мәнін 87 км биіктікте азайту үрдісі белгіленген, бұл ретте ол қараша-желтоқсанда максимумға ие.

Осы бағытта біз орындаған зерттеулер мыналарды жасауға мүмкіндік берді: жердегі физикалық процестерді зерттеу бойынша міндеттерді шешуге арналған жаңа әдістер, алгоритмдер мен бағдарламалар, апатты оқиғаларды қоса алғанда, байланысты мезосфераның биіктігіндегі аспанды жару вариациясының деректері бойынша акустико-гравитациялық толқындар диапазонында атмосфераның толқындық толқуын талдау негізінде. Атап айтқанда, осы бақылаулардың нәтижелері бойынша Алматы өңірінің ерекшелігін ескере отырып, оларды атмосфераның жоғарғы қабаттарына таратудың нақты жер үсті көздерінен акустика-гравитациялық толқындарды генерациялау тиімділігін есептеу алгоритмдері жасалды.

Мезосферадағы қозғалатын толқындық ауытқулардың мінез-құлқын анықтау мақсатында, co-phase техникасы ретінде белгілі Фурье түрлендірудің модификацияланған алгоритмі көмегімен SATI деректерін өңдеуге мүмкіндік беретін қажетті бағдарламалық қамтамасыз ету жасалды. Бұл бағдарламалық қамтамасыз ету қозғалатын толқындық ауытқуларды автоматты түрде анықтауға, таралу бағытын, толқын кезеңі, таралу жылдамдығын және SATI оптикалық өлшемдерінің деректері бойынша толқын ұзындығын анықтауға мүмкіндік береді (температура мәні және гидроксил эмиссиясы). Тіркелген толқындық ауытқуларды талдау барлық бақылау кезеңінде акустика-гравитациялық толқындарға тән толқын ұзындығы бойынша бөлуді көрсетті. Мезосферадағы тіркелген наразылықтардың ең көп саны шамамен 100-200 км, толқын ұзындығы үшін шамамен 350-400 км байқалады.

SATI деректері бойынша мезосферадағы акустико-гравитациялық толқындардың жүріс-тұрысының фондық ерекшеліктерін бөлу үшін осы бақылаулардың барлық кезеңі 5 жыл (2010-2015 жж.) маусым бойынша бөлінген. Тіркелген акустика-гравитациялық толқындардың әртүрлі маусымдарға таралу бағыты бойынша бөлінуі зерттелді, акустика-гравитациялық толқындардың таралу бағыттары маусымдық тәуелділікке ие екенін көрсетті, әсіресе бұл шығыс және батыс бағытта қозғалатын ауытқуларға қатысты. Батыс және оңтүстік-оңтүстік-батыс және шығыс-солтүстік-шығыс максимумдарды бөліп көрсетуге болады. Батыс таралу бағыттарында барлық маусымда байқалады. Оңтүстік-оңтүстік-батыс максимум негізінен қыста және күзде ғана байқалады. Шығыс-солтүстік-шығыс керісінше, көктемгі-жазғы айларда, бірақ барлық Маусымда бар. Жалпы алғанда, толқындардың көпшілігі қыста батыс, ал жазда Шығыс бағыты бар. Осылайша алынған толқындық ауытқулардың сипаттамалары 5 жыл бойы SATI-де тұрақты бақыланады деп санауға болады.

Түйін сөздер: мезосфера, атмосфера, акустика-гравитациялық толқын.

В. М. Сомсиков, А. Б. Андреев, В. И. Капытин, С. Н. Мукашева

Институт ионосферы, Национальный центр космических исследований
и технологий, Алматы, Казахстан

ПОВЕДЕНИЕ АКУСТИКО-ГРАВИТАЦИОННЫХ ВОЛН В ОБЛАСТИ МЕЗОСФЕРЫ НАД КАЗАХСТАНСКИМ РЕГИОНОМ

Аннотация. Наиболее сложной для изучения областью атмосферы является мезосфера, лежащая между нижней атмосферой и ионосферными высотами на высотах от 40-50 до 80-90 км. Состав мезосферы, ее температурный режим, происходящие в ней химические и динамические процессы, все больше интересуют геофизиков в связи чувствительностью этой атмосферной области к вариациям солнечной активности, химии метеорных металлов, изменениям климата Земли и долгосрочному антропогенному воздействию.

В настоящее время активно исследуется роль акустико-гравитационных волн в переносе энергии из тропосферы в мезосферу и нижнюю термосферу: изменение приливов и отливов в ионосфере, вариации озона в верхней мезосфере, связанные с внезапным потеплением стратосферы, а также акустико-гравитационные волны в термосфере и ионосфере, связанные с тропическими циклонами. Проводятся

работы по созданию и совершенствованию трехмерных глобальных моделей мезосферы и термосферы с учетом многолетних наземных и спутниковых измерений гелио-геофизических параметров.

В Казахстане уже более 10 лет выполняются исследования эффектов в области мезосферы на базе современного оптического спектрометра SATI (Spectral Airglow Temperature Imager), который установлен на высокогорном комплексе Института ионосферы – радиополигона «Орбита» на высоте 2730 м над уровнем моря [43°03'30"N, 76°58'24"E].

В настоящей работе приведены результаты непрерывных рядов оптических спектрометрических наблюдений за период более 6 лет с 2010 г. по 2016 г., с целью выявления статистически значимых закономерностей в поведении акустико-гравитационных волн на высотах мезосферы.

В качестве первичной обработки данных спектральные изображения инструмента SATI пересчитаны в значения температуры и эмиссии ночного неба области мезосферы. В результате первичной обработки данных за 6 лет измерений на SATI с 2010 по 2016 г. установлена тенденция уменьшения значений максимальной температуры мезосферы на высоте 87 км, при этом она имеет максимум в ноябре-декабре.

Выполненные нами исследования в данном направлении позволили разработать: новейшие методы, алгоритмы и программы для решения задач по исследованию физических процессов на Земле, включая катастрофические события, на основе анализа волновых возмущений атмосферы в диапазоне акустико-гравитационных волн по данным вариаций свечения неба на высотах мезосферы связанных. В частности, по результатам этих наблюдений созданы алгоритмы расчета эффективности генерации акустико-гравитационных волн от конкретных наземных источников их распространения в верхние слои атмосферы с учетом специфики Алматинского региона.

С целью определения поведения перемещающихся волновых возмущений в мезосфере, было создано необходимое программное обеспечение, позволяющее обрабатывать данные SATI с помощью модифицированного алгоритма преобразования Фурье, известного как техника *co-phase*. Это программное обеспечение позволяет автоматически выявлять перемещающиеся волновые возмущения, определять направление распространения, период волны, скорость распространения и длину волны по данным оптических измерений SATI (значений температуры и эмиссии гидроксила). С помощью данных программ были обработаны результаты измерений SATI за период с 2010 г. по 2016 г. Анализ зарегистрированных волновых возмущений за весь период наблюдения показал распределение по длинам волн, характерное для акустико-гравитационных волн. Показано, что максимальное количество зарегистрированных возмущений в мезосфере имеет длину около 100-200 км, наблюдается заметный отдельный пик для длин волн около 350-400 км.

Для выделения фоновых особенностей поведения акустико-гравитационных волн в мезосфере по данным SATI, весь период данных наблюдений за 5 лет (2010-2015 гг.) разбивался по сезонам. Изучено распределение зарегистрированных акустико-гравитационных волн по направлению распространения для разных сезонов, показало, что направления распространения акустико-гравитационных волн имеют сезонную зависимость, особенно это касается возмущений, двигающихся в восточном и западном направлении. Можно выделить западный и юго-юго-западный и восточно-северо-восточный максимумы. Западный максимум в направлениях распространения наблюдается во все сезоны. Юго-юго-западный максимум наблюдается в основном только зимой и осенью. Восточно-северо-восточный наоборот, имеет максимальную величину в весенне-летние месяцы, хотя и присутствует во все сезоны. В целом большинство волн имеют зимой западное, а летом восточное направление. Полученные таким образом характеристики волновых возмущений можно считать наблюдающимися регулярно, на протяжении 5 лет измерений на SATI.

Ключевые слова: мезосфера, атмосфера, акустико-гравитационная волна.

Information about authors:

Somsikov Vyacheslav Mikhailovich, Institute of the Ionosphere, National Center for Space Research and Technology, doctor of physical and mathematical Sciences, Professor, vmsoms@rambler.ru, <https://orcid.org/0000-0003-1005-9367>;

Andreev Alexey Borisovich, Institute of the Ionosphere, National Center for Space Research and Technology, PhD-student, alexey.andreyev@rambler.ru, orcid.org/0000-0001-7914-5496;

Капытин Vitaly Iosifovich, Institute of the Ionosphere, National Center for Space Research and Technology, PhD-student, kapytinsanct@mail.ru, orcid.org/0000-0002-2001-9847;

Mukasheva Saule Nurmukhambetova, Institute of the Ionosphere, National Center for Space Research and Technology, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, snmukasheva@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-1609-4430>

REFERENCES

[1] Smith, A. K., Pedatella, N. M., Marsh, D. R., & Matsuo, T. (2017) On the dynamical control of the mesosphere-lower thermosphere by the lower and middle atmosphere, *Journal of The Atmospheric Sciences*, 74:933-947. DOI:10.1175/JAS-D-16-0226.1

- [2] John M. C. Plane, Wuhu Feng, Erin C. M. (2015) The Mesosphere and Metals: Chemistry and Changes, *Chemical Reviews Chem. Rev.*, 115:4497-4541. DOI: 10.1021/cr500501m
- [3] Minasyants G.S., Minasyants T.M., Vdovichenko V.D., Bibossinov A. G. (2019) Properties of ultraviolet emission at development of solar flares, *News of the National Academy of sciences of the Republic of Kazakhstan*, 3 (325):56-64. DOI.org/10.32014/2019.2518-1726.24
- [4] Goncharenko, L. P., Chau J. L., Liu H.-L., Coster A. J. (2010) Unexpected connections between the stratosphere and ionosphere, *Geophys. Res. Lett.*, 37:L10101. DOI:10.1029/2010GL043125.
- [4] Smith, A. K., López-Puertas M., García-Comas M., Tukiainen S. (2009) SABER observations of mesospheric ozone during NH late winter 2002–2009, *Geophys. Res. Lett.*, 36:L23804. DOI:10.1029/2009GL040942.
- [5] Hagan M. E., Forbes J. M. (2002) Migrating and nonmigrating diurnal tides in the middle and upper atmosphere excited by tropospheric latent heat release, *J. Geophys. Res.*, 107:4754. DOI:10.1029/2001JD001236.
- [6] Immel T. J., Sagawa E., England S. L., Henderson S. B., Hagan M. E., Mende S. B., Frey H. U., Swenson C. M., Paxton L. J. (2006) Control of equatorial ionospheric morphology by atmospheric tides, *Geophys. Res. Lett.*, 33:L15108. DOI:10.1029/2006GL026161.
- [7] Nicolls M. J., Vadas S. L., Aponte N., Sulzer M. P. (2014) Horizontal wave parameters of daytime thermospheric gravitywaves and E region neutral winds over Puerto Rico, *J. Geophys. Res. Space Phys.*, 119:575-600. DOI:10.1002/2013JA018988.
- [8] Bishop R., Aponte N., Earle G. D., Sulzer M., Larsen M., Peng G. (2006) Arecibo observations of ionospheric perturbations associated with the passage of Tropical Storm Odette, *J. Geophys. Res.*, 111:A11320. DOI:10.1029/2006JA011668.
- [9] Underwood E. (2018) Toward more realistic modeling of the mesosphere, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99, DOI.org/10.1029/2018EO096603.
- [10] Siskind D. E., Sassi F., Randall C. E., Harvey V. L., Hervig M. E., Bailey S. M. (2015) Is a high-altitude meteorological analysis necessary to simulate thermosphere–stratosphere coupling? *Geophys. Res. Lett.*, 42:8225-8230. DOI:10.1002/2015GL065838.
- [11] Pedatella N. M., Raeder K., Anderson J. L., Liu H.-L. (2014) Ensemble data assimilation in the Whole Atmosphere Community Climate Model, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 119:9793-9809. DOI:10.1002/2014JD021776.
- [12] Marsh D. R., Mills M. E., Kinnison D. E., Lamarque J.-F., Calvo N., Polvani L. M. (2013) Climate change from 1850 to 2005 simulated in CESM1(WACCM), *J. Climate*, 26:7372-7391. DOI:10.1175/JCLI-D-12-00558.1.
- [13] Jin H., Miyoshi Y., Pancheva D., Mukhtarov P., Fujiwara H., Shinagawa H. (2012) Response of migrating tides to the stratospheric sudden warming in 2009 and their effects on the ionosphere studied by a whole atmosphere–ionosphere model GAIA with COSMIC and TIMED/SABER observations.
- [14] Ren S., Polavarapu S., Beagley S. R., Nezhlin Y., Rochon Y. J. (2011) The impact of gravity wave drag on mesospheric analyses of the 2006 stratospheric major warming, *J. Geophys. Res.*, 116:D19116. DOI:10.1029/2011JD015943.
- [15] Liu H.-L., Sassi F., Garcia R. (2009) Error growth in a whole atmosphere climate model, *J. Atmos. Sci.*, 66:173-186. DOI:10.1175/2008JAS2825.1.
- [16] Pertsev N. N., Andreev A. B., Merzlyakov E. G., Perminov V. I. (2013) Mesospheric-thermospheric manifestations of stratospheric warming: joint use of satellite and ground measurements, *Modern problems of remote sensing of the Earth from Space*, 10(1): 93-100.
- [17] Somsikov V. M., Andreev A. B., Kopytin V. I. (2017) Regularities of behavior of variations of dynamic parameters of the atmosphere during periods of activation of seismic processes in the background. Ground-space monitoring of dynamics of geospheres, *Proceedings of the ionosphere Institute 2017*, 2:108-122 (in Russ.).
- [18] Sargoytchev S.I., Brown S, Solheim B.H., Cho Y.M, Shepherd G.G., López-González M.J. (2004) Spectral airglow temperature imager SATI: A ground-based instruments for the monitoring of mesosphere temperature, *Applied optics*, 43:30-37.
- [19] Aushev V.M., Fedulina I.N., Gordienko G.I., López-González M.J., Pogoreltsev A.I., Ryazapova S.Sh., Shepherd M.G. (2006) Effects in the mesosphere and ionosphere observed at northern midlatitudes, *Journal of Planetary and Space Science*, 54:559-571.
- [20] Semenov A. I., Bakanas V. V., Perminov V. I., Zheleznov Yu. a., Khomich V. Yu. (2002) radiation Spectrum of the earth's night upper atmosphere in the near-infrared region, *Geomagnetism and Aeronomy*, 42(3): 407-414. (in Russ.).
- [21] Shepherd G. (2002) Spectral Imaging of the Atmosphere, *International Geophysics Series Academic*, 82:54-62.
- [22] Hernan A., Montes K., Eric S. (1971) Posmentier. Co-Phase Analysis of Atmospheric Wave Data, *Geophys. J. Res.*, 26:271-278.