

КОСМИЧЕСКАЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИКА. КОСМИЧЕСКИЕ АППАРАТЫ. ИССЛЕДОВАНИЕ ОКОЛОЗЕМНОГО КОСМИЧЕСКОГО ПРОСТРАНСТВА

УДК 551.59:629.78

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ МЕТОД ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ПРЕДВЕСТНИКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ИЗ КОСМОСА

А. В. Карелин, К. А. Молодцов, В. В. Хегай

Представлено краткое описание модифицированного метода дистанционного зондирования предвестников землетрясений из космоса, развитого на основе молекулярно-кинетической теории конденсации в атмосфере, и показана возможность его применения в задачах обнаружения краткосрочных предвестников землетрясений на платформе малых космических аппаратов, созданных по принципу «аппарат – прибор».

Ключевые слова: предвестник землетрясений, дистанционное зондирование, космический аппарат, микроволновый зондировщик, конденсация, ионизация, поправка, химический потенциал.

Введение

Устойчивому развитию современной цивилизации препятствует совокупность угроз природного и техногенного характера, требующих принятия эффективных превентивных мер по предупреждению и защите от них. Наиболее распространенными источниками стихийных бедствий являются тектонические и опасные явления природного происхождения: лесные и степные пожары, сели, наводнения, землетрясения, извержения вулканов, цунами, оползни, ураганы и т. д.

Прогнозировать их наступление, предупреждать о таких явлениях и вызываемых ими бедствиях, катастрофах и (или) чрезвычайных ситуациях техногенного характера во всех отношениях выгоднее, чем реагировать на последующие разрушительные последствия. Поскольку возникновение трети чрезвычайных ситуаций техногенного характера обусловлено природными причинами, эффективный контроль и прогноз геофизической обстановки в окрестностях размещения технических объектов позволил бы избежать многих аварий и катастроф.

При решении задач прогнозирования угроз особую значимость имеет непрерывный мониторинг и комплексный анализ параметров разнообразных аномальных геофизических явлений, которые предшествуют возникновению стихийных бедствий и чрезвычайных ситуаций техногенного характера.

На сегодняшний день достоверно установлено, что такие аномальные явления (предвестники) имеют место в магнитосфере, ионосфере, атмосфере и литосфере Земли, могут быть зафиксированы, измерены и использованы для прогноза места, времени и силы (масштаба) чрезвычайного события. Одними из самых труднопредсказуемых и разрушительных природных катаклизмов являются землетрясения.

Целью настоящей работы является дальнейшее улучшение (модификация) уже известного метода «химического потенциала» [1, 2] для повышения вероятности обнаружения предвестников землетрясений.

Модифицированный метод химического потенциала

В настоящее время предлагается большое количество различных методов предсказания землетрясений [1]. Для создания надежной системы детектирования предвестников землетрясений следует опираться на те методы, которые имеют достаточно ясное физическое обоснование и допускают в перспективе возможность серьезного статистического анализа.

Многие физические эффекты в природе, в том числе и в атмосфере, связаны с конденсацией.

В ряде наблюдений перед землетрясением было обнаружено выделение радиоактивного газа радона-222 и резкое падение влажности [1]. Описание существенных изменений влажности в приземном слое допускает теоретическое описание с позиции молекулярно-кинетической теории конденсации [2 – 4].

Наиболее эффективно процесс конденсации во влажной приземной атмосфере идет по следующему механизму: вследствие высокой концентрации паров воды образование капель сначала идет в результате ассоциации нейтральных молекул, затем к ним со скоростью поляризационного захвата присоединяются ионные кластеры, образовавшиеся в результате плазмохимических реакций, развивающихся под воздействием внешнего ионизирующего излучения (солнечные космические лучи, галактические космические лучи, радон-222, грозовые разряды). Это, в свою очередь, приводит к затруднению отрыва молекул воды от заряженных капель вследствие более высокой энергии связи и

ускорению их удаления из объема под воздействием атмосферного электрического поля.

Количественным показателем влияния внешних воздействий накануне землетрясения на термодинамические параметры атмосферы является поправка к химическому потенциалу воды в атмосфере ΔU [2 – 4]. Величина поправки к усредненному химическому потенциалу паров воды в атмосфере по данным метеонаблюдений, измеряемая в электрон-вольтах (эВ), может оцениваться по формуле [2]:

$$\Delta U = 5,8 \cdot 10^{-10} (20T_g + 5463)^2 \ln\left(\frac{100}{H}\right), \quad (1)$$

где T_g – температура воздуха, °С; H – относительная влажность, %.

Иллюстрации суточного поведения поправки к химическому потенциалу для различных недавних землетрясений приведены на рис. 1, а – 4, а.

Видны заметные изменения поправки за несколько дней до землетрясения. Её вариации становятся ещё более заметны с разделением изменений поправки к химическому потенциалу по времени на ночные

и дневные измерения (рис. 1, б – 4, б). И совсем уже выпуклой картина становится после дальнейшей её обработки путем сглаживания с помощью скользящего среднего (рис. 1, в – 4, в), а также для большей идентификации аномалий в поведении поправки путем вычисления отношения STA/LTA (Short Time Average/Long Time Average) [5, 6]. Результаты последнего перед землетрясениями приведены на рис. 1, г – 4, г.

Данный подход к исследованию динамики поправки к химическому потенциалу позволяет получить более надежную оценку для предсказания землетрясений.

Собственно говоря, в этой дополнительной обработке результатов космических измерений отклика атмосферы на готовящееся землетрясение и состоит модификация метода «химического потенциала».

Таким образом, сочетание систематического мониторинга пространственно-временной динамики поведения температуры и относительной влажности воздуха с анализом динамики поправки к химическому потенциалу паров воды в атмосфере может позволить с достаточно высокой вероятностью предсказать сильные землетрясения.

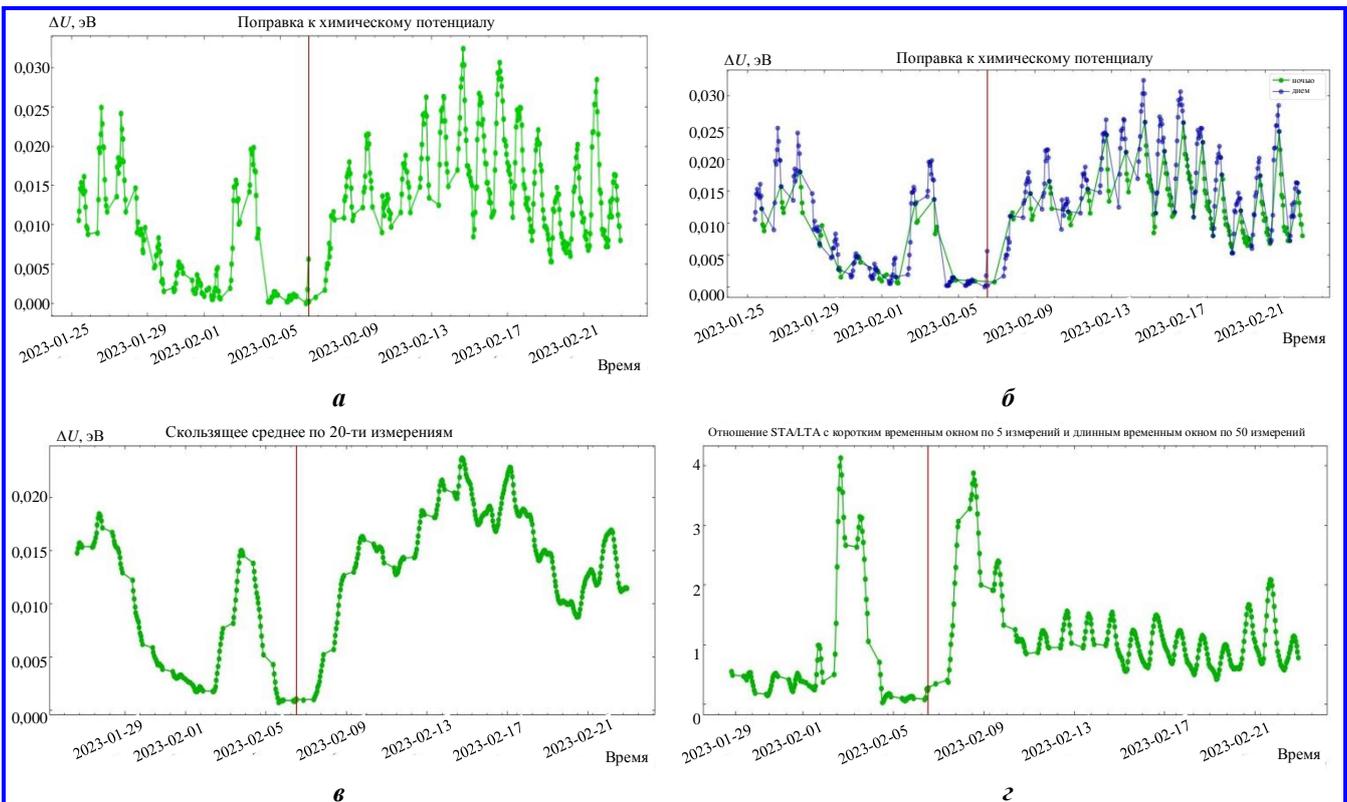


Рис. 1. Суточные вариации к поправке химического потенциала (а), вариации к поправке химического потенциала с разделением данных на дневные (с 7:00 до 19:00) и ночные (с 19:00 до 07:00) (б), скользящее среднее поправки химического потенциала (в), отношение STA/LTA для поправки к химическому потенциалу (г).

Вертикальная прямая – землетрясение в Турции 06.02.2023 (данные метеостанции в Шанлыурфе 37°6' с.ш., 38°50' в.д.)

Космические средства температурно-влажностного зондирования атмосферы

Для организации мониторинга пространственно-временной динамики температурно-влажностных профилей перспективно использовать орбитальную группировку малых космических аппаратов (КА), оснащенных сверхвысокочастотными (СВЧ) радиометрами. Такие малые КА могут быть организованы по принципу «аппарат – прибор».

СВЧ-радиометры являются одними из основных приборов в разделе оперативной метеорологии. СВЧ-зондировщики атмосферы позволяют выполнять определение параметров профилей температуры и влажности атмосферы по измерениям восходящего теплового излучения системы «атмосфера – подстилающая поверхность». Основным достоинством СВЧ-зондировщиков является слабая зависимость от погодных условий в районе измерений и возможность получать информацию о параметрах температуры и влажности атмосферы вблизи поверхности Земли.

Ключевые параметры целевых характеристик космической системы температурно-влажностного зондирования приземной атмосферы:

1. Перспективный бортовой пассивный СВЧ радиометрический комплекс (СВЧ-зондировщик) среднего разрешения (1 – 3 км) с целью измерения высотных профилей температуры и влажности атмосферы с особенным вниманием к нижним слоям.

2. Анализ характеристик исследуемого объекта диктует необходимость реализации следующих технических параметров СВЧ-зондировщика:

- пространственное разрешение по горизонтали 1 – 3 км. Возможность получения информации о температуре и влажности атмосферы, включая нижние (1 – 3 км) ее слои, для чего проводить спектральные измерения в следующих диапазонах: 15 – 22 ГГц, 50 – 60 ГГц, 80 – 100 ГГц, 170 – 196 ГГц;

- точность измерений радиоярких температур в элементе разрешения не хуже 0,03 – 0,1 К.

Актуальность разработки определяется отсутствием бортовых приборов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения задач изучения атмосферы и мониторинга опасных явлений с требуемым пространственным разрешением и дающих требуемую информацию о нижних слоях атмосферы.

Несмотря на довольно большое количество СВЧ-зондировщиков атмосферы, функционирующих в настоящее время, в основном, на иностранных КА, получение достаточно точной и достоверной информации о нижних слоях атмосферы, с нашей точки зрения, остается проблематичным.

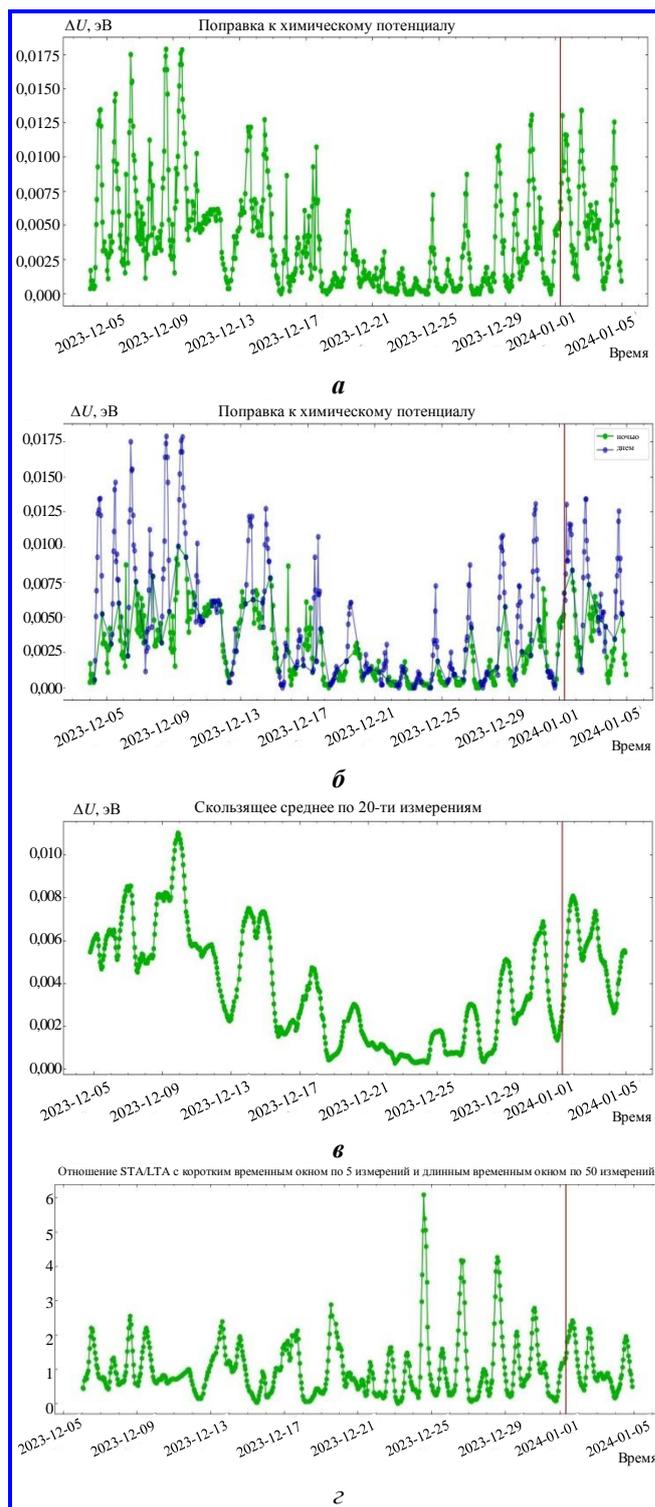


Рис. 2. Суточные вариации к поправке химического потенциала (а), вариации к поправке химического потенциала с разделением данных на дневные (с 7:00 до 19:00) и ночные (с 19:00 до 07:00) (б), скользящее среднее поправки химического потенциала (в), отношение STA/LTA для поправки к химическому потенциалу (г).

Вертикальная прямая – землетрясение в Японии 01.01.2024 (данные метеостанции в Тояме 36°42' с.ш., 137°12' в.д.)

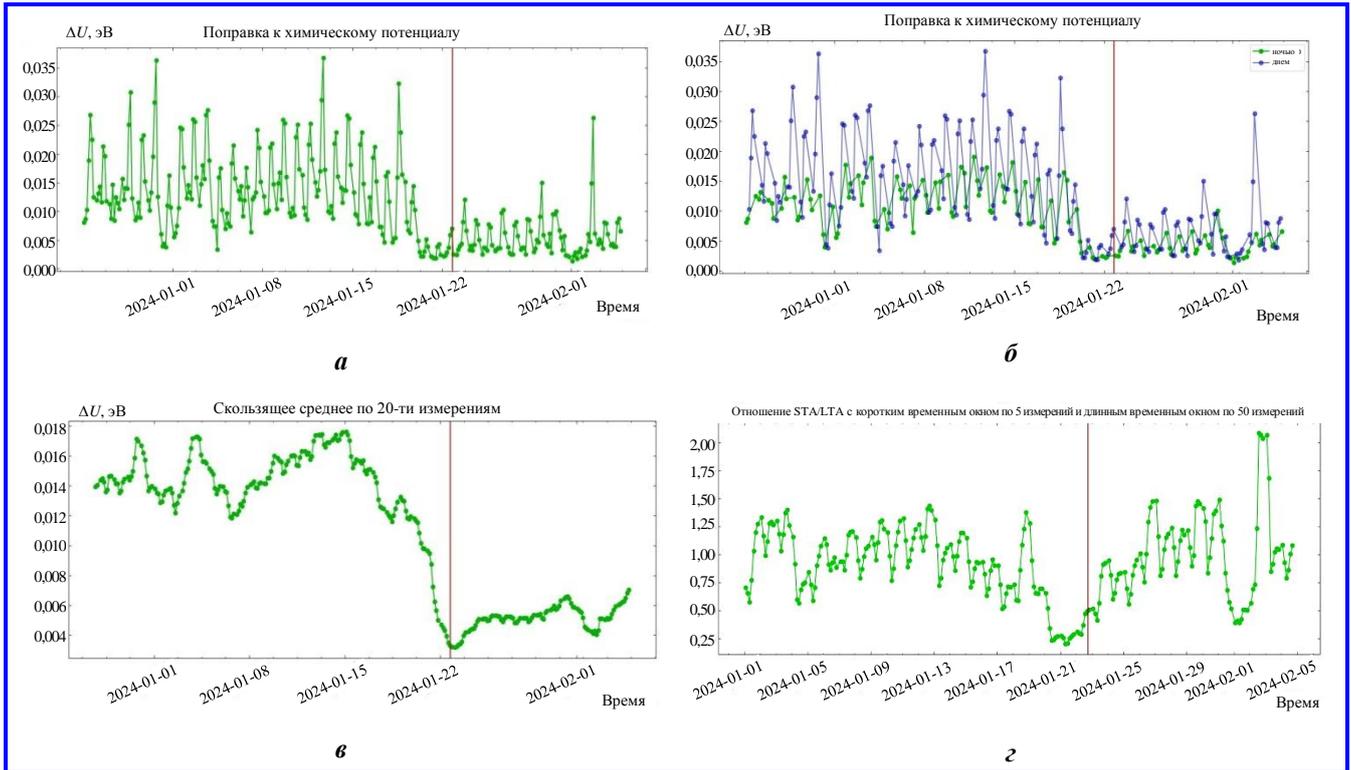


Рис. 3. Суточные вариации к поправке химического потенциала (а), вариации к поправке химического потенциала с разделением данных на дневные (с 7:00 до 19:00) и ночные (с 19:00 до 07:00) (б), скользящее среднее поправки химического потенциала (в), отношение STALTA для поправки к химическому потенциалу (г). Вертикальная прямая – землетрясение в Китае 22.01.2024 (данные метеостанции в Акчи 40°56' с.ш., 78°27' в.д.)

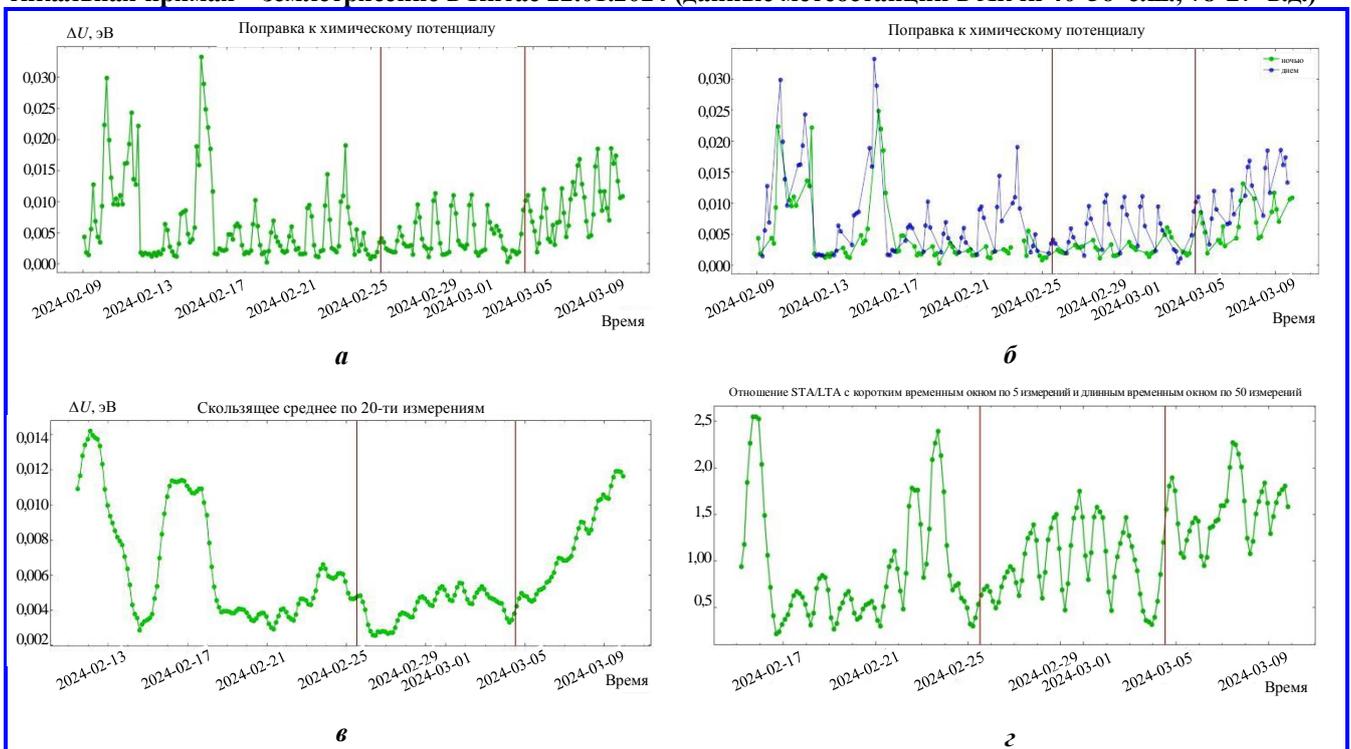


Рис. 4. Суточные вариации к поправке химического потенциала (а), вариации к поправке химического потенциала с разделением данных на дневные (с 7:00 до 19:00) и ночные (с 19:00 до 07:00) (б), скользящее среднее поправки химического потенциала (в), отношение STALTA для поправки к химическому потенциалу (г). Вертикальные прямые – землетрясения в Семиречье 25.02.2024 и 04.03.2024 (данные метеостанции в Алматы 43°14' с.ш., 76°56' в.д.)

Пространственная (горизонтальная) изменчивость профилей температуры и влажности зависит от влияния различных внешних факторов. Знание локальных вариаций профилей на масштабах порядка 1 – 3 км требуется для решения задач контроля опасных явлений, где такие локальные изменения служат основным индикатором активных процессов ионизации атмосферы.

Варианты возможной технической реализации представлены в [4, 7] в виде СВЧ радиометрических модулей.

На выходе СВЧ-радиометра формируются выходные сигналы, пропорциональные измеряемым радиоярким температурам Земли, которые регистрируются в приборе. Кроме того, собирается дополнительная информация о температурных характеристиках антенно-фидерного тракта и самого приемника. Целевая обработка информации производится на Земле.

Космическая система в перспективе имеет высокую технико-экономическую эффективность, поскольку ориентирована на использование уникального СВЧ радиометрического комплекса [7], востребованного в рамках прикладных и научно-исследовательских работ ДЗЗ из космоса.

Данный СВЧ-комплекс обеспечит проведение спутникового всепогодного круглосуточного глобального мониторинга Земли с высоким пространственным разрешением 1 – 3 км. Информация, получаемая с перспективных СВЧ-комплексов, устанавливаемых на КА ДЗЗ, может быть использована для решения задач мониторинга и предсказания чрезвычайных ситуаций, в частности предсказания землетрясений. Однако в настоящее время при контроле и прогнозе чрезвычайных ситуаций данные наблюдений в СВЧ-диапазоне применяются не в полном объеме, вследствие низкого пространственного разрешения (16 – 150 км) существующей СВЧ-аппаратуры. Таким образом, развитие космических

систем мониторинга чрезвычайных ситуаций связано с созданием нового поколения целевой аппаратуры ДЗЗ в СВЧ-диапазоне спектра.

Литература

1. Pulinets S. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere New Concepts / S. Pulinets, D. Ouzounov, A. Karelin [at al.] // Springer. – 2022. – 294 с.
2. Боярчук К. А. Базовая модель кинетики ионизированной атмосферы / К. А. Боярчук, А. В. Карелин, Р. В. Широков. – Москва : ФГУП «НПП ВНИИЭМ», 2006. – 203 с.
3. Хегай В. В. Молекулярно-кинетическая теория конденсации в атмосфере и ее применения / В. В. Хегай, А. В. Карелин // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2021. – Т. 185. – № 6. – С. 11–19.
4. Карелин А. В. Актуализация создания орбитальной группировки мониторинга радиоактивного загрязнения местности на платформе малых космических аппаратов / А. В. Карелин, К. А. Молодцов, В. В. Хегай // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2023. – Т. 194. – № 3. – С. 24–31.
5. Sabbione J. I. A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers / J. I. Sabbione, D. R. Velis // J. Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 99. – P. 42–50. – DOI : 10.1016/j.jappgeo.2013.07.011.
6. Свердлик Л. Г. Идентификация предсейсмических возмущений в атмосфере с использованием модифицированного критерия STA/LTA / Л. Г. Свердлик // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва : Институт космических исследований РАН. – 2021. – Т. 18. – № 3. – С. 141–149. – DOI : 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
7. Перспективный подход к созданию космической системы мониторинга чрезвычайных ситуаций / А. В. Карелин, В. П. Саворский, М. Т. Смирнов [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. – Королёв : АО «ЦНИИмаш», 2017. – № 2 (95). – С. 111–116.

Поступила в редакцию 19.02.2024

Александр Витальевич Карелин, доктор физико-математических наук, доцент, главный научный сотрудник, т. 8 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@tsniimash.ru.

Кирилл Алексеевич Молодцов, инженер, т. 8 (495) 513-40-88, e-mail: MolodtsovKA@tsniimash.ru. (АО «ЦНИИмаш»).

Валерий Варламович Хегай, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, т. 8 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (ИЗМИРАН).

A MODIFIED METHOD FOR REMOTE SENSING OF EARTHQUAKE PRECURSORS FROM SPACE

A. V. Karelin, K. A. Molodtsov, V. V. Hegai

A brief description of the modified remote sensing earthquake precursor method from space based on molecular-kinetic condensation theory in the atmosphere is considered and the possibility of its application in the detection short term earthquake precursor on the small spacecraft bus created on the «spacecraft – instrument» principle is discussed.

Key words: earthquake precursor, remote sensing, spacecraft, microwave sounder, condensation, ionization, correction, chemical potential.

References

1. Pulinets S. Earthquake Precursors in the Atmosphere and Ionosphere New Concepts / S. Pulinets, D. Ouzounov, A. Karelin [et al.] // Springer. – 2022. – 294 p.
2. Boyarchuk K. A. Basic model of ionized atmosphere kinetics / K. A. Boyarchuk, A. V. Karelin, R. V. Shirokov. – Moscow: FGUE «NPP VNIEM», 2006. – 203 p.
3. Khagai V. V. Molecular kinetic theory of condensation in the atmosphere and its application / V. V. Khagai, A. V. Karelin // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow: JSC «VNIEM Corporation», 2021. – Vol. 185. – No. 6. – P. 11–19.
4. Karelin A. V. Actualization of creation of orbital constellation for monitoring radioactive contamination of an area based on the small spacecraft platform / A. V. Karelin, K. A. Molodtsov, V. V. Khagai // Matters of Electromechanics. VNIEM Proceedings. – Moscow: JSC «VNIEM Corporation», 2023. – Vol. 194. – No. 3. – P. 24–31.
5. Sabbione J. I. A robust method for microseismic event detection based on automatic phase pickers / J. I. Sabbione, D. R. Velis // J. Applied Geophysics. – 2013. – Vol. 99. – P. 42–50. – DOI : 10.1016/j.jappgeo.2013.07.011.
6. Sverdlik L. G. Identification of pre-seismic disturbances in atmosphere using a modified criteria STA/LTA / L. G. Sverdlik // Current problems in remote sensing of the Earth from space. – Moscow : Space Research Institute – IKI. – 2021. – Vol. 18 – No. 3 – P. 141–149. – DOI : 10.21046/2070-7401-2021-18-3-141-149.
7. Promising approach to development of a space system for monitoring of disasters / A. V. Karelin, V. P. Savorsky, M. T. Smirnov [et al.] // Cosmonautics and rocket engineering. – Korolev : JSC «TSNIIMASH», 2017. – No. 2 (95). – P. 111–116.

Aleksandr Vitalevich Karelin, Doctor of Physics and Mathematics (D. Sc.), Associate Professor, Chief Researcher, t. 8 (495) 513-54-01, e-mail: avkarelin@tsniimash.ru.

Kirill Alekseyevich Molodtsov, Engineer, t. 8 (495) 513-40-88, e-mail: MolodtsovKA@tsniimash.ru. (JSC «TSNIIMASH»).

Valery Varlamovich Khagai, Candidate of Physics and Mathematics (Ph. D.), Leading Researcher, t. 8 (495) 851-97-80, e-mail: hegai@izmiran.ru. (Institute of Terrestrial Magnetism of RAS).