

РЕЦЕНЗИЯ



на дисертационния труд на
Красимир Николаев Кръстев
задочен докторант в Институт за космически изследвания и технологии
към Българска академия на науките (ИКИТ БАН)
в област 4.1 Физически науки; (научна специалност 01.04.08 „Физика на океана,
атмосферата и околоземното пространство“)
на тема "Изследване на радиационните условия по трасето и в орбита около Марс по
данни от апаратурата "Люлин-МО" на борда на спътника ЕкзоМарс Trace Gas Orbiter"

от чл. кор. Петър Велинов, БАН

Рецензията е изготвена в съответствие с решение на НС на ИКИТ БАН (протокол №6/08.11.2023) и заповед 114/09.11.2023 на Директора на ИКИТ БАН и в съответствие с решение на Научното жури (протокол №1/15.11.2023г).

Биографични данни за дисертанта

Красимир Николаев Кръстев има магистърска степен по физика от СУ "Св. Климент Охридски".

Той работи в секция „Слънчево-земна физика“ (СЗФ) в ИКИТ БАН от 2013г до сега като асистент.

От 2015г е задочен докторант в секция СЗФ на ИКИТ, зачислен със заповед № 04 от 12.01.2015 г. Кредитите за обучението му като докторант са 706 от минимално необходими 250. Отчислен е с право на защита, считано от 01.01.2019г със заповед 13/18.01.2019г на директора на ИКИТ.

Актуалност и новост на темата

Космическият кораб ЕхоMars Trace Gas Orbiter (ЕхоMars TGO) търси метан и други следи от газове в марсианската атмосфера, които биха могли да бъдат доказателство за възможна биологична или геоложка активност. ЕхоMars TGO е най-амбициозният съвременен международен космически проект, в който участва и нашата страна със създадената в ИКИТ БАН апаратура Liulin-МО (Люлин-МО) за измерване на космическата радиация. ЕхоMars TGO е изстрелян през март 2016г и работи в момента в орбита около Марс. Люлин-МО дава непрекъснато данни за радиационната обстановка по трасето до Марс и в орбита около планетата от април 2016, и до сега.

Изследванията на Liulin- МО от май 2016 г и до момента са предмет на тази дисертация. Уникалността на използваните данни и перспективите за пилотирани полети до Марс прави тези изследвания много актуални. Новостта на дисертацията се определя от факта, че Люлин-МО е единствената апаратура в света, която измерва в момента радиационните характеристики в орбита около Марс и една от двете, направили измервания по трасето до Марс.

Цел и задачи на дисертацията

Главна цел на дисертацията е да се изследват радиационните условия по трасето и в орбита около Марс по данни от апаратурата Люлин-МО на борда на спътника ЕкзоМарс Trace Gas Orbiter и да се даде максимално точна оценка за компонентите на

дозите и потоците космическа радиация, включително вторичната радиация в междупланетното пространство за периода на измервания по трасето до Марс.

Първата основна задача на дисертацията е анализ и интерпретация на данните получени по трасето и в орбити около Марс за измерваните от Люлин-МО дозиметрични величини. Тази задача включва решаването на подзадачи, които аз обобщавам по следния начин:

- Да се изследва зависимостта на потоците, мощностите на дозите и дозовия еквивалент от развитието на цикъла на слънчевата активност и се направят сравнения с резултатите от измерванията в други мисии;
- Да се изследва засенчващия ефект на Марс върху измерените потоци и мощности на дозите;
- Да се моделират двете събития на слънчеви космични лъчи (СКЛ) от октомври 2021 г. – GLE 73 и февруари 2022 и резултатите да се сравнят с експерименталните данни;
- Да се изведе аналитично средната дължина на пътя, който изминава частица в единичния детектор и в дозиметричния телескоп с цел правилно определяне на спектъра на линейно предаване (поглъщане) на енергията (LET спектъра) от тези детекторни системи и качествения фактор на радиацията.

Втората основна задача е изследване на влиянието на вторичните частици при формиране на отклика на детекторната система на прибора Люлин-МО. Тя включва решаването на подзадачи, които аз групирам по следния начин:

- Да се създаде числен модел, който възпроизвежда радиационното поле в междупланетното пространство по време на полета до Марс на мисията “ЕкзоМарс” Trace Gas Orbiter, а така също и съответния отклик на детекторната система на прибора. Моделът да се приложи за няколко различни защити, имитиращи конструкцията на Люлин-МО и тази на TGO. Да се направи сравнение между получените резултати за различните случаи;
- Да се получи оценка за приноса, който имат вторичните частици при формирането на LET спектъра и съответно качествения фактор на радиацията;
- За всяка компонента от спектъра на ГКЛ да се получи съответния отклик на детекторната системата. Да се определи приносът към сумарната доза на всяка компонента от спектъра на ГКЛ.
- Да се изследва приноса при формиране на допълнителни (фалшиви) сигнали от вторични частици в LET спектъра;
- На базата на създадената методология за скрининг на фалшиви вторични сигнали в LET спектрите на дозиметричните телескопи на Люлин-МО и съответно в LET спектрите на ГКЛ, да се разработи алгоритъм и да се приложи за изчистване на фалшивите вторични сигнали в експериментално получените LET спектри от телескопите на Люлин-МО (реконструиране на LET спектрите). Изчислените от реконструираните LET спектри качествени фактори на радиацията да се сравнят с получените от единичните детектори на Люлин-МО, както и с тези от други експерименти в междупланетното пространство.

Структура на дисертационния труд

Дисертационния труд съдържа 140 страници, от които 132 фигури, 30 таблици и литература, включваща 115 заглавия. Трудът включва увод и 5 глави. В **първа глава** е направен литературен обзор на източниците на йонизираща радиация около Земята, в междупланетното пространство, в орбита и на повърхността на Марс. Показано е значението на йонизиращата радиация и нейното изучаване за бъдещите пилотиращи

полети до Марс. Дадено е описание на мисията Екзо-Марс, направена е литературна справка за провежданите изследвания и получени предишни резултати за йонизиращата радиация по трасето и на повърхността на Марс. Показана е ролята и значението на прибора Люлин-МО на ЕхоMars TGO в рамките на изследването на Марс. Във **втора глава** са описани научните задачи, конструкцията и методите на измерване и изчисление на основните дозиметрични величини от Люлин-МО. Създадена е методика и е изчислен калибровъчния коефициент, по който трябва да се умножи дозата, получена от телескопа на Люлин-МО, за да се получи пълната доза в единичния детектор. В **Глава 3** на дисертацията са представени данни, получени от Liulin-МО на борда на спътника TGO по време на полета и на орбита около Марс. Изследван е засенчващия ефект на Марс върху измерените потоци и мощности на дозите. Аналитично са изведени средните дължини на пътя, който изминава частица в единичния детектор и в детектор от телескопа на Люлин-МО. Представен е алгоритъм, по който се реконструира експериментално получения LET спектър от телескопа и се изчиства от фалшиви сигнали, предизвикани от съвпадения с вторични частици. В **Глава 4** са представени резултатите от симулациите, които са направени за различни защити на детекторната система на Люлин-МО с използване на софтуера GEANT4. Дадена е оценка на приноса на вторичните частици при формиране на отклика на детекторите. Класифицирани са получените от симулацията вторични събития според механизма на тяхното формиране. Показан е приносът на отделните компоненти от спектъра на галактичните космични лъчи към сумарната доза и LET спектър. В **Глава 5** са обобщени получените резултати в дисертацията, посочени са авторските приноси, представени са насоки за бъдещо развитие на тематиката. Даден е списък на публикациите на докторанта използвани в дисертацията, а така също и списък на цитираната литература. Изказани са благодарности.

Оценявам, че целта и поставените задачи в дисертацията са изпълнени.

Автореферат

Авторефератът е изготвен съгласно изискванията, коректно отразява съдържанието и структурата на дисертацията, и показва най-важните постигнати резултати, както и авторските приноси..

Авторски приноси

Авторът е формулирал общо 7 приноса. Считам, че те отразяват коректно главните резултати, постигнати по работата върху дисертацията. Приносите могат да се формулират като научни и научно-приложни, свързани с установяване на нови факти, създаване на методи и тяхното приложение.

1. Аналитично са пресметнати редица характеристики на апаратурата Люлин-МО: средната дължина на пътя, който изминава частица в единичния детектор с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в единичен детектор; средната дължина на пътя, който изминава частица в детектора на телескопа на Люлин-МО с цел правилно определяне на LET спектъра и $\langle Q \rangle$ от спектъра на депозираните енергии в телескопа; коефициентът, по който от дозата депозирана в телескопа се преминава към дозата получена в единичния детектор.

Това е важен научно-приложен принос, защото позволява сравнение и верифициране на данните, получени от единичните детектори и

телескопите, а така също сравнение с данните от други измервания в космоса.

2. Изследван е засенчващия ефект на Марс във високоелиптична и кръгова орбити върху измерените потоци и мощности на дозите от ГКЛ. Изведени са аналитични зависимости за коефициентите на засенчване на тези величини.

Това е значим научно-приложен принос, който обяснява и оценява причината за по-ниските измерени стойности на потоците и мощностите на дозите в орбита около Марс, в сравнение с тези в свободното междупланетно пространство

3. Построени са спектъра на линейно поглъщане на енергията, определен е $\langle Q \rangle$ фактора и дозовия еквивалент по данните от пълния спектър на депозираните енергии в единичните детектори за етапите на пътуването до Марс и в орбита около Марс. Показано е добро съвпадение (в рамките на неопределеностите на величините) с измерените от апаратурата RAD на NASA MSL по време на нейното пътуване до Марс.

Това е нов научен резултат, който дава уникални сведения за радиационната обстановка при полет до Марс.

4. Моделирани са двете събития на SEP от октомври 2021 г. и февруари 2022 г., и е показано, че основен принос при формиране на двете SEP събития имат протони с енергии между 200 и 300 MeV.

Както по-горе, това е нов научен резултат, който дава сведения за спектъра на наблюдаваните слънчеви енергийни частици в нарастващата фаза на 25 слънчев цикъл.

5. Направена е числена симулация на измерванията на Люлин-МО по време на полета му до Марс през април-септември 2016. Използван е софтуера Geant4.

Това е много важен научно-приложен резултат, тъй като създаденият числен модел позволява да се сравнят и верифицират експерименталните резултати, и изяснява характера на регистрираните сигнали от детекторната система на апаратурата Люлин-МО. Това е един от най-значимите резултати в дисертацията.

Последните 2 приноса обобщавам по следния начин:

6. Създадена е методика за скрининг на фалшиви вторични сигнали от взаимодействието на първичните ГКЛ с конструкцията на космическия апарат в LET спектрите на ГКЛ, определени от телескопите на Люлин-МО. Разработен е алгоритъм, базиран на тази методика, по който се реконструира експериментално получения LET спектър от телескопа и се изчиства от фалшиви сигнали, предизвикани от съвпадения с вторични частици.

Както по-горе, това е един от най-значимите резултати в дисертацията, тъй като създадената методика и алгоритъм позволява правилна реконструкция на експериментално получения LET спектър от телескопа и производните от него величини. Те са приложен за определяне на $\langle Q \rangle$ по

експерименталните данни за LET спектъра от телескопите и е показано, че получените $\langle Q \rangle$ от телескопите са в добро съответствие с определените от единичните детектори стойности, а също така са в добро съответствие с данните от апаратурата на НАСА RAD/MSL. Това демонстрира коректността на създадения алгоритъм и служи за допълнителна верификация на експерименталните данни, което е много важно, като се има предвид, че съществуващите измервателни данни са много малко.

Публикации по дисертацията

Дисертацията се основава на 2 публикации на автора в списания с импакт фактор ("ICARUS", IF 3.2, Q1 и "Доклади БАН", IF 0.329, Q3), като във втората публикация докторантът е водещ автор, и на 4 доклада в пълен текст в сборници от международни конференции, като в 3 от докладите той е водещ автор.

По публикацията в ICARUS има забелязани 28 цитата, повечето от които в публикации, реферирани в Web of Science и/или SCOPUS.

Значимост на резултатите от дисертацията

Резултатите в дисертацията на Красимир Кръстев разширяват знанията за радиационните условия при полет до Марс. Според мен най-важни са резултатите, свързани с численото моделиране на апаратурата Люлин-МО, а именно оценката на приноса на вторичните частици при формиране на отклика на детекторите и създадената методика за тяхното идентифициране и изчистване от LET спектъра на телескопите, определянето на приноса на всяка от компонентите от спектъра на галактичните космични лъчи към сумарната доза и LET спектър, оценката на преобладаващите енергии на протоните на двете разгледани събития на слънчеви енергийни частици. Направеното моделиране позволява и да се верифицират данните от измерванията, което е много съществено, като се има предвид че експерименталните данни за радиационните величини по пътя и в орбита на Марс са много малко. Много важни по мое мнение са и резултатите, свързани с изучаване на засенчващия ефект от Марс върху измерваните величини. Описаните перспективи за приложение на разработените методи и алгоритми за анализ на данните от измервани на Люлин-МО в орбита около Марс очертават насоките за продължение на тази дейност.

Заклучение

Този дисертационен труд съдържа значими научни резултати, които представляват съществен принос към радиационните изследвания в космоса, провеждани от специалистите на ИКИТ БАН в продължение на повече от 35 години. Приносите са значими и достатъчни.

Дисертационният труд на Красимир Николаев Кръстев на тема "Изследване на радиационните условия по трасето и в орбита около Марс по данни от апаратурата "Люлин-МО" на борда на спътника ЕкзоМарс Trace Gas Orbiter", напълно отговаря на изискванията на ЗРАСРБ, правилника към него и правилниците на БАН и ИКИТ БАН за присъждане на ОНС "доктор", поради което му давам напълно положителна оценка.

Съгласно Правилниците за приложение на ЗРАСРБ, сумата от показателите 5 до 10 от група показатели Г е 40 точки при изискуем минимум за ОНС "доктор" по тези показатели 30 точки.

Предвид изложеното по-горе, предлагам на уважаемите членове на научното жури да присъдят на Красимир Николаев Кръстев образователната и научна степен "доктор" в област 4.1 Физически науки; (научна специалност 01.04.08 „Физика на океана, атмосферата и околоземното пространство“).

01.12.2023г
София

Изготвил рецензията:

д-р кор. д-р Петър Велинов

ВЯРНО С ОРИГИНАЛА

