

Справка за научните приноси
на доцент д-р Камен Асенов Козарев

по конкурс за заемане на академична длъжност „професор“ (обявен в Държавен вестник бр. 46 от 06.06.2025 г.) в област на висше образование 4.1 Физически науки, по научна специалност „Хелиофизика“ на тема „Наблюдения, моделиране и прогнозиране на краткосрочни прояви на слънчевата активност“ за нуждите на отдел „Слънце и слънчева система“ в Института по астрономия с Национална астрономическа обсерватория - Българска академия на науките (ИАНАО-БАН)

Научните изследвания след докторската ми степен са основно на тема слънчева активност, космическо време и техните прояви по време на два слънчеви цикли, което е изцяло по тематиката на обявения конкурс в ИАНАО-БАН.

За настоящия конкурс са представени 16 реферирани и индексирани в Scopus и/или Web of Science статии и доклади на конференции, които са публикувани за периода 2017–2025 година. Описаните резултати са свързани основно в работата ми по три основни направления: 1. Разработване и използване на техники за откриване и характеризиране на слънчеви изригвания, наблюдавани в различни дължини на вълната, базирана на методи за компютърно зрение и дълбоко машинно обучение; 2. Разработка и усъвършенстване на модели за ускорение и транспорт на слънчеви високоенергийни частици (SEP), и сравняването им с наблюдения от междупланетни сонди; 3. Използване на нискочестотни интерферометрични радио наблюдения за изследване в детайли на динамиката на изхвърлянията на коронална маса (CME) и енергизирането на короналните електронни потоци. Част от работата е свързана с обединяване на наблюдения и системи за моделиране, с цел създаване на по-точни и по-навременни прогнози на слънчевата активност и свързаните с нея проявления на космическо време.

1. Наблюдения и характеризиране на слънчеви изригвания

Слънчевите енергийни частици (SEPs) са свързани със слънчевата активност и явления като слънчеви изригвания, CMEs, EUV вълни, ударни вълни и радиоизлъчвания от тип II и III. Те са ключови за изучаването на енергийното разпределение и динамиката на слънчевата корона и междупланетните магнитни полета. Много от тези явления причиняват земно космическо време и представляват опасности за Земята и технологиите. Тъй като определени изригвания, ударни вълни, CMEs и EUV вълни произвеждат SEP събития, а други не, тъй като ефектите на разпространение от ниската корона до 1 AU изглеждат важни за някои събития, но не за други, и тъй като радиоизлъчванията от тип II и III и рентгеновите изблици понякога се произвеждат от енергийни частици, напускащи тези места на ускорение, е необходимо да се изучи цялата система с многочестотна и многоинструментална перспектива, която комбинира както in-situ, така и дистанционни наблюдения с детайлно моделиране на явленията. В статия **B2** представихме изчерпателно изследване на един от интересните периоди с множество изригвания през миналия слънчев цикъл,

на 4 ноември 2015 г. Тази статия демонстрира този всеобхватен подход и показва неговата необходимост, като анализира трио от необичайни и поразителни слънчеви изригвания, радио и рентгенови изблици и събития SEP. Тези събития показват както силни прилики, така и разлики от стандартните събития и помежду си, въпреки че имат много сходни междупланетни условия и само две места на изригване и области на генезис на CME. Представихме пълния набор от съответните наземни и космически наблюдения, допълвайки ги с първоначални резултати от моделирането на SEP и междупланетната магнитна свързаност, за да разработим правдоподобен сценарий за изригванията.

Един от важните и относително скоро открити феномени, свързани със слънчевите изригвания, короналните вълни или ярки фронтове (CBF) са широкомащабни вълнообразни смущения в слънчевата корона. Те се наблюдават (най-вече в екстремна ултравиолетова (EUV) светлина) като преходни ярки фронтове с крайна ширина, разпространяващи се далеч от местоположението на източника на изригването, и обикновено са предизвикани от ранните фази на короналните изхвърляния на маса (CME). Последните изследвания на отделни слънчеви еруптивни събития са използвали EUV наблюдения на CBF и метрични радио наблюдения тип II, за да покажат тясната връзка между вълните в ниската корона и шоките вълни, предизвикани от коронално изхвърляне на маса (CME). EUV изображенията с телескопа Atmospheric Imaging Assembly (AIA) на Обсерваторията за слънчева динамика (SDO) се оказаха особено полезни за откриване на широкомащабни CBF, което, комбинирано с радио и *in situ* наблюдения, дава сериозен потенциал за ранно характеризиране на ударни вълни, предизвикани от CME. Тази характеристика може да бъде допълнително автоматизирана и свързана с модели на ускорение на частиците, за да се получат оценки на потоците от частици в короната и в близката до Земята среда в ранните етапи на събитията. В статия **Г1** представихме разработена от нас система за анализ на наблюдения на ударни вълни (CASHew). Той комбинира анализ на продукти от данни на обсерваторията на NASA Heliophysics System и съответните модели, базирани на данни, в автоматизирана система за характеризиране на коронални компресивни и ударни вълни извън слънчевия лимб и оценка на способността им да ускоряват слънчеви енергийни частици (SEP). Системата използва EUV наблюдения и геометрични модели за характеризиране формата и взаимодействието на ударните вълни с короналната плазма. Тествахме рамката CASHew върху представителен списък от събития, като представихме техните характеристики. Използването на тази система допринася за цялостното разбиране на короналните ударни вълни, тяхното значение за ускорението на енергийните частици, както и за по-добрата способност за прогнозиране на потоците от SEP събития.

В статия **Г9** представихме цялостна характеристика на 26 коронални ударни вълни, предизвикани от CME, наблюдавани в ниската слънчева корона между 2010 и 2017 г. Целта на това изследване беше да се анализира и опише ранната динамика на CBF, използвайки базирана на физика хелиосферна система за прогнозиране на SEP, известна като Solar Particle Radiation Environment Analysis and Forecasting – Acceleration and Scattering Transport (SPREAdFAST), описана в статия **В3**. За да оценим зависимите от времето плазмени и компресионни параметри на CBF, използвахме

последователности от изображения с базова разлика, получени от инструмента SDO/AIA, и измервания на профилите височина-време на СМЕ, получени от инструмента Large Angle and Spectrometric COronagraph (LASCO) на борда на спътника Solar and Heliospheric Observatory (SOHO). Използвахме кинематични измервания и резултати от плазмен модел, за да изведем тези параметри. Нашият анализ даде статистически зависимости и разпределения както за ударните вълни, така и за плазмените параметри, свързани с 26-те изследвани CBF. Чрез комбиниране на наблюденията от инструментите AIA и LASCO с моделите от SPREAdFAST, получихме цялостно разбиране за ранната динамика на CBF, включително тяхната времева еволюция, свойства на плазмата и компресионни характеристики. Тези открития допринасят за нарастващия обем знания в областта и имат значение за прогнозирането на космическото време и изучаването на събитията, свързани със SEP.

Докато изследванията в статиите Г1 и Г9 се базират на аналитични модели (елипсоиди) за формата на короналните ударни вълни, последващата работа се насочи към реалистично характеризиране на зависимата от времето форма на тези обекти. Това е нужно, тъй като ускорението на SEP в ударните вълни силно зависи от точната геометрия на взаимодействието между местните магнитни полета и фронта на ударната вълна.

В статия В4 се описва нов подход за характеризирането на ударни вълни и други феномени, наблюдавани с оптични телескопи. Представихме общ метод и софтуерна система (Wavetrack) за разпознаване и проследяване на слънчеви изображения на обекти, като ударни вълни, СМЕ и влакна. Wavetrack създава маски на сегментираните пиксели, и може да се прилага към интегрални изображения или базови разлики с различни честоти/дължини на вълната за създаване на зависими от времето карти на обектите. Системата работи както за феномени наблюдавани върху слънчевия диск, така и за такива над лимба, и е в състояние да проследява добре обекти, които се разделят на отделни части с течение на времето. Схемата за изчисление е базирана на концепция за многомащабно представяне на данни чрез уейвлет трансформация и набор от техники за филтриране на изображения. Демонстрирахме нейната ефективност върху малък набор от явления, свързани с СМЕ, наблюдавани с телескопа SDO/AIA. С данните, представени йерархично на различни нива на разлагане и интензитет, нашият метод позволява извличане на определени обекти и техните маски от наблюденията, за да се проследи тяхната еволюция във времето. Представеният тук метод е общ и приложим за откриване и проследяване на различни слънчеви и хелиосферни явления в изображения. Имплементирахме този метод в свободно достъпна Python библиотека.

В статия Г10 доразвихме концепцията и приложимостта на Wavetrack, като демонстрирахме способността на системата да разпознава и следи еруптивни феномени наблюдавани с различни инструменти и дължини на вълната. Представихме наблюдателен анализ на развиващата се форма и кинематика на мащабно СМЕ от 7 май 2021 г. над източния лимб на Слънцето, наблюдавана от 1 AU. Изригването е наблюдавано непрекъснато, последователно от телескопите SDO/AIA, наземния К-коронаграф (K-Cor) на обсерваторията COronal Solar Magnetism Observatory (COSMO) на Мауна Лоа, Хавай, и телескопите C2 и C3 на инструмента Large Angle

Solar Coronagraph (LASCO) на Слънчевата и хелиосферна обсерватория (SoHO). Приложихме актуализираната многоинструментална версия на Wavetrack за автоматизирано откриване и проследяване, за да оценим и сравним еволюиращата форма на фронта на CME, докато се разпространява от слънчевата повърхност до 20 слънчеви радиуса. Wavetrack позволява проследяване на характеристики отвъд водещия ръб и е важна стъпка към полуавтоматично създаване на набори от данни за обучение на дълбоки модели за сегментиране на изображения на слънчеви изображения. Нашите изследвания потвърдиха очакваната силна връзка между EUV вълните и короналните масови изригвания (CME). В статия **Г11** приложихме системата Wavetrack за изследване на интересно изригване върху слънчевия диск, придружено от радио избухване. Освен характеризиране на формата на фронтовете, успяхме да изчислим скоростта на движение на фронта, базирано на методи за оптичен поток във векторни полета.

2. Модели за разпространение на CME и SEP в короната и хелиосферата

Характеризирането на морфологията и динамиката на коронални изригвания спомогна за създаване и прилагане на физически и статистически модели за ускорение и транспорт на високоенергитични частици в короната и хелиосферата. Фундаментален въпрос е дали ускорението на високоенергитични частици се случва в междупланетното пространство или близо до Слънцето. Последните изследвания показват, че ударните вълни, предизвикани от CME, могат да доведат до SEP докато са все още под пет слънчеви радиуса. В статия **B1** изследвахме ускорението на SEP в ранни стадии на CME и ударни вълни още по-ниско в короната, използвайки като начални източници реалистични супратермални спектри. За всяко събитие бяха използвани наблюдения от AIA и системата CASHew за моделиране на кинематиката на компресионната/ударната вълна и нейното взаимодействие с короната. След това ускорението на протоните беше моделирано с помощта на аналитичен дифузионен модел на ускорение, тъй като ударните вълни се разпространяват между ~ 1.05 и ~ 1.3 слънчеви радиуса. Демонстрираме способността на екстремните ултравиолетови вълни, свързани с ниски коронални ударни вълни, да ускоряват протоните до мулти-MeV енергии за минути, в най-ранните етапи на свързаните с тях слънчеви изригвания. Открихме, че силно енергизиране на протоните се наблюдава при високи стойности на скока на плътността, висока Алфвенова скорост, както и скоростта на ударната вълна.

В статия **B3** доразвихме концепцията за характеризиране на коронални ударни вълни комбинирано с моделиране на ускорение на SEP, добавяйки моделиране на междупланетния транспорт на частиците. Представихме системата Solar Particle Radiation Environment Analysis and Forecasting – Acceleration and Scattering Transport (SPREAdFAST), която комбинира характеризиране на CBF с няколко модела на взаимодействие и ускорение/транспорт на частици между слънцето и 1 а.е. За пръв път беше представена такава базирана на телескопични наблюдения и физични модели система, чиито резултати валидирахме като сравнихме получените симулирани времеви серии на потоците протони с *in situ* наблюдения в близост до Земята. В статия

Г2 представихме обзор на разбирането за източниците на космическа радиация от високоенергитични частици в межд�земното пространство, тяхното разпространение и взаимодействие с планетарни системи.

Освен работа по изчислителни и аналитични модели за SEP базирани на физичните закони, работим и по статистически модели за прогнозиране на SEP. В статия **Г7** представихме модели за дълбоко обучение, като използвахме архитектурата на двупосочната невронна мрежа с дълга краткосрочна памет (BiLSTM), за да обучим модели за прогнозиране на SEP за три стандартни интегрални GOES канала (>10 MeV, >30 MeV, >60 MeV) с три прогнозни прозореца (1 ден, 2 дни и 3 дни напред) въз основа на ежедневни данни, получени от базата данни OMNIWeb от 1976 до 2019 г. Тъй като променливостта на SEP се модулира от слънчевия цикъл, ние избрахме входни параметри, които улавят краткосрочните, обикновено в рамките на няколко часа, и дългосрочните, обикновено обхващащи няколко дни, флуктуации в слънчевата активност. Като входни параметри за нашия модел приехме индекса F10.7, броя на слънчевите петна, времеви ред на логаритъма на рентгеновия поток, скоростта на слънчевия вятър и средната сила на междупланетното магнитно поле. Резултатите са валидирани с набор за тестване извън извадката и са сравнени с други видове модели. Като цяло нашият модел се справи добре със среднодневни прогнози на SEP потоци, сравнено с други подобни модели. Подобно изследване, но свързано с прогнозиране еволюцията на CME в междупланетното пространство, представихме в статия **Г8**.

3. Нискочестотни радио изследвания на Слънцето и неговата активност

Нискочестотните радио наблюдения на тихото и активно Слънце имат огромен потенциал да ни дадат нова информация за термалните и нетермални процеси на ускорение и излъчване в слънчевата корона.

Счита се, че радиоизлъчването на спокойното Слънце се дължи на топлинно спирачно излъчване на горещата слънчева атмосфера. Свойствата на спокойното Слънце в микровълновия диапазон са добре проучени и могат да бъдат добре описани чрез спектъра на спирачното излъчване. В метровия и декаметровия диапазон свойствата на спокойното Слънце рядко са били изучавани поради инструменталните ограничения. В статия **Г3** представихме наблюдения на спокойната слънчева корона в честотния диапазон от 20-80 MHz с радиотелескопа LOFAR. В това изследване постигнахме безпрецедентна пространствена разделителна способност на спокойното Слънце в декаметрични дължини на вълната. Голям брой нискочестотни (LBA) антени в LOFAR осигуряват нужната пространствена разделителна способност и чувствителност. Общо 90 GB данни бяха обработени за създаване на научни изображения в тази работа. Използвахме радио източника Cassiopeia-A, за да извършим калибриране на интерферометричните наблюдения и да получим точната яркостна температура на слънчевото излъчване. В тази работа разширихме известната връзка между температурата на слънчевата яркост и честотата, $T_b(f)$, до най-ниските честоти, наблюдавани от земната повърхност, като по този начин компенсирахме липсата на нискочестотни измервания на температурата на яркостта в литературата.

Слънчевите радиоизбухвания тип III са доста често срещано явление. Те са резултат от ускорени електрони с високи енергии, разпространяващи се през слънчевата корона. Тези избухвания са от особен интерес, тъй като предоставят ценна информация за магнитното поле и плазмените условия в короната, които са трудни за директно измерване. В статия **Г5** представихме детайлно проучване на източниците и основните физически процеси на буря от избухвания тип III на 3 април 2019 г., чрез използване на многовъълнови наблюдения от наземния радиотелескоп LOFAR и космическата сонда Parker Solar Probe (PSP), както и включване на резултати от потенциален модел на коронално магнитно поле (PFSS) и магнитохидродинамични (MHD) модели. Основната цел бе да се идентифицират пространствените и времеви характеристики на радиоизточниците, както и плазмените условия по тяхната траектория. Първо, чрез нашият автоматизиран конвейер за обработка успяхме ефективно да идентифицираме и характеризираме 9 общи радиоизбухвания тип III в комбинирания динамичен спектър на LOFAR-PSP и 16 избухвания от тип III в динамичния спектър на LOFAR. Установихме, че дрейфът на честотата за откритите избухвания тип III в комбинирания спектър варира между 0,24 и 4 MHz/s, а скоростите на електронните лъчи варират между 0,013 и 0,12 c. След това обработихме данните от LOFAR в интерферометрични изображения, генерирайки моментни снимки в различни времеви точки и честоти. Нашето изследване показва, че електроните, отговорни за тези избухвания, произхождат от един и същ източник, освободени в рамките на 30 минути. Всички избухвания се появяват над югоизточния слънчев лимб, потвърждавайки един и същ произход, като също така проследяват подобни траектории в короната. И накрая, нашият анализ предостави информативна представа за физическите условия по пътя на електроните – открихме, че плътността на плазмата, получена от модела на магнитохидродинамичния алгоритъм извън сферата (MAS), е по-ниска с два порядъка от очакваната плътност. Такъв вид анализ на цяла буря от тип III избухвания не е правен досега.

Радиоспектроскопията предоставя уникална перспектива за изследване на Слънцето и космическото време, което може да разкрие информация за плазмата и енергийните електрони в слънчевата корона и вътрешната хелиосфера. Въпреки това радиочестотните смущения (RFI) от човешка дейност засягат чувствителните радиотелескопи и оказват значително влияние върху качеството на наблюдение. По този начин откриването и смекчаването на RFI за наблюденията е необходимо за получаване на висококачествени, готови за науката данни. Маркирането на RFI е особено предизвикателно за наблюдения на слънчевото и космическото време при ниска честота, тъй като слънчевите радио избухвания могат да бъдат по-ярки от RFI и може да показват подобно времево поведение.

В статия **Г3** изследвахме методите за маркиране на RFI за наблюдения на слънчевото и космическото време, включително нова стратегия за традиционния метод AOFlagger и нов метод, който използва морфологична конволюция. Тези алгоритми могат ефективно да сигнализират за RFI, като същевременно запазват слънчевите радио

избухвания. Ние описахме и тествахме три метода за маркиране на RFI, които са специално насочени към нискочестотни наблюдения на Слънцето и космическото време с радиотелескопа LOFAR. Трите метода се представят добре за динамични спектри със слънчеви радиоизбухвания. Нашият нов метод, наречен ConvRFI, е бърз, прост и активиран за GPU алгоритъм с разумна точност. ConvRFI е подходящ за задачи за предварително маркиране и маркиране на динамични спектри на Слънцето и космическото време, с по-строги изисквания за запазване на характеристиките на радиоизбухването, но по-ниски изисквания за маркиране на всички RFI проби. Другите два метода, комбинации между ConvRFI и традиционния AOFlagger, са подходящи за задачата за маркиране на чувствителни към RFI случаи, с по-висок приоритет на маркиране на проби от RFI, отколкото запазване на повече слънчеви радиоизбухвания. Ние предложихме стратегия за предварителна обработка на спектрометрични данни.

Настоящи и бъдещи насоки

По направление 1, работим по създаване на устойчиви модели с дълбоко самообучение за разпознаване и следене на ударни вълни и други свързани с СМЕ коронални феномени. Целта е да използваме наборите данни от Wavetrack, и да ги приложим за обучение на моделите, които ще бъдат генерализирани и приложими към данни от нови космически телескопи като коронаграфите Proba-3/ASPIICS и CCOR на NOAA, както и към други наземни инструменти, включително новите слънчеви телескопи в НАО Рожен и АО Белоградчик. Резултатите от тези модели ще бъдат използвани за автоматизиран мониторинг и изследвания на слънчевата активност.

По направление 2, завършваме обновяването и разширяване на глобален числен модел за ускорение и транспорт на високоенергитични заредени частици в хелиосферата. Този модел е базиран на модела Energetic Particle Radiation Environment Module (EPREM); новата версия ще бъде оптимизирана за бързо изпълняване на съвременни изчислителни системи, включително суперкомпютри. Тя ще бъде много по-гъвкава в определяне на граничните и първоначални условия, моделите на слънчев вятър, както и многократно по-добри детайли на резултатите. Планираме и ъпгрейд на системата SPREAdFAST, която да работи и споделя резултати в реално време. Освен това, понастоящем работим по подобрен статистически модел за дълбоко самообучение за прогнозиране на SEP с времева резолюция от 1 час.

По направление 3 работим по изследвания на голям брой слънчеви избухвания с интерферометрични LOFAR наблюдения. Планираме подобряване на процедурите по калибриране на данните, както и софтуерни системи за обработка на потоците данни от бъдещата LOFAR-BG станция, и различни наблюдателни продукти от наблюденията с нея.

Развитие на радиоастрономията в България

Като част от дългосрочната ми работа, свързана със слънчеви радионаблюдения, ръководя екип по създаване, опериране и развитие на първия в България професионален нискочестотен радиоастрономически телескоп, LOFAR-BG. Телескопът представлява наблюдателна станция с голям брой диполни антени, която ще бъде

разположена в близост до НАО Рожен. Тя може да работи както самостоятелно, така и като част от пан-европейския радиотелескоп LOFAR. Очаква се да бъде инсталирана и да започне работа в средата на 2026 г.

Мониторинг на космическото време от Антарктида

Ново направление в нашите изследвания е създаването на първата българска астрономическа обсерватория в близост до Антарктида, на българската база на о-в Ливингстън. През първата наблюдателна сесия там бяха осъществени едномесечни наблюдения на слънчева активност в радио диапазона, както и измервания на местното земно магнитно поле, и на космическа радиация. Планираме поне още една експедиция по настоящия проект, и работа по създаване на постоянна обсерватория на базата.

01.08.2025

/доц. д-р Камен Козарев/