



# ОТЧЕТ

Проект:

## **ВРЪЗКА МЕЖДУ АСТРОНОМИЧЕСКИТЕ ДАННИ ЗА АТМОСФЕРАТА И ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ВЪЗДУХА**

проф. д-р Таню Бонев, ръководител на проекта,

от името на участниците в колектива, работили по проекта



**Договор № 10621/15.09.2015г. между ПУДООС и ИА с НАО**

Представените в този отчет методи и резултати са разработени и получени в изпълнение на договор № 10621 от 15.09.2015 г. между Института по Астрономия с Национална Астрономическа Обсерватория (ИА с НАО) и Предприятието за Управление на Дейностите по Опазване на Околната Среда (ПУДООС). Работата по проекта продължи една година – от 16.09.2015 г. до 15.09.2016 г. Част от резултатите, получени по проекта, са представени на III конгрес по физически науки, проведен в София, 29.09 – 2.10. 2016 г. и се подготвят за публикуване в списанието за професионална астрономия, Bulgarian Astronomical Journal (<http://www.astro.bas.bg/AIJ/>).

## СЪДЪРЖАНИЕ

РЕЗЮМЕ	4
УВОД	5
ПОКАЗАТЕЛИ ЗА СЪСТОЯНИЕТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ, ИЗМЕРВАНИ ОТ КОМПЛЕКСНА ФОНОВА СТАНЦИЯ “РОЖЕН”	6
Взаимодействие на светлината с атмосферата. Разсейване и поглъщане на фотоните от звездите в атмосферата	8
Определяне на атмосферната екстинкция от фотометрия на звезди	11
Използвана апаратура	15
Наблюдения и редукция на данните	16
Данни за измерени от КФС „Рожен” стойности на замърсители на атмосферата	18
Резултати за избрани моменти	19
Атмосферна екстинкция и параметри на въздуха през ноември 2015, март и май 2016	19
Възможна антикорелация между концентрацията на фини прахови частици в приземния атмосферен слой и коефициента на екстинкция	26
Влияние на слънчевата активност върху концентрациите на азотни окиси в земната атмосфера	28
Телуричните линии: източник на информация за състоянието на Земната атмосфера и въздуха	39
Мрежа от камери за наблюдение на цялото небе и възможности за автоматизиран мониторинг на метеорната активност	44
Мотивация за изграждането на мрежа за мониторинг на метеорната активност	45
Характеристики на камерите за наблюдаване на цялото небе	49
Първи резултати от мрежата за мониторинг на метеорната активност: Базисна метеорна фотография болид от Персеиди 2016, 10 август	53
Методика на анализа	53
Координати на наблюдателните пунктове, разстояния (бази) между тях и взаимни посоки	55
Данни от експозициите и от симулациите	57
Резултати	63
Физически параметри на регистрирания болид	65
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	67

## ВРЪЗКА МЕЖДУ АСТРОНОМИЧЕСКИТЕ ДАННИ ЗА АТМОСФЕРАТА И ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ВЪЗДУХА

### РЕЗЮМЕ

Представен е отчет на проект, който представлява естествено продължение на изследванията, които бяха извършени през 2013 г. в изпълнение на работната програма по договор № 8785 от 16.01.2013 г. между Института по Астрономия с Национална Астрономическа Обсерватория (ИА с НАО) и Предприятието за Управление на Дейностите по Опазване на Околната Среда (ПУДООС). **Главната цел на този проект** е да се задълбочи анализа на съществуващите зависимости между моментното състояние на интегралните параметри на атмосферата, определяни в НАО Рожен и нейните локални свойства, измервани от комплексната фоновата екологична станция на МОСВ, инсталирана и функционираща на територията на Националната астрономическа обсерватория Рожен. Един от методите, който е използван за тази цел е корелация между данните за атмосферната екстинкция (поглъщане), получавани през всяка ясна нощ, когато се извършват астрономически наблюдения и вариациите на измерваните от фоновата станция на МОСВ локални параметри на атмосферата и слънчевата радиация.

**Друга цел** е изследване на зависимостта между слънчевата активност и локалното състояние на атмосферата, определено по измерваните от КФС „Рожен” данни.

За постигането на тази цел продължи събирането на данни за слънчевата активност за по-големи периоди от време, което повиши статистическата значимост на получените резултати. В случаите, когато са намерени такива зависимости, са определени техните количествени параметри: периоди, амплитуди, тригерни механизми, фактори за усилване или намаляване на установените корелации.

Моментното състояние на атмосферата дава отражения и върху **интензитета на телуричните линии**, които се регистрират в звездните спектри. Това обстоятелство даде възможност да бъдат поставени допълнителни ограничения при решаването на обратната задача за декомпозиция на трите съставлящи на атмосферната екстинкция, което е от съществено значение за **постигане на главната цел** на проекта.

Извършена е съществена стъпка напред за изследване на метеорната активност над територията на Р България. За целта са разширени възможностите за наблюдаване на цялото небе с добавяне на две камери, които са разположени на няколко десетки километра от камерата инсталирана в НАО „Рожен”. Това позволи извършване на триангулация на метеорните явления, точно определяне на физическите характеристики на метеорните тела и оценка на праховите частици, останали след тяхното изгаряне в горните слоеве на атмосферата. Двете нови камери бяха инсталирани на територията на Народните астрономически обсерватории в Димитровград и Кърджали. Освен научния принос за проекта, изградената мрежа от камери за мониторинг на метеорната активност предоставя възможност за нови, съвременни форми на обучение на учениците, бъдещи астрономи, които работят по различни проекти в двете Народни астрономически обсерватории.

## УВОД

В НАО Рожен се получават два вида данни характеризиращи състоянието на атмосферата – екологични (локални) и астрономични (интегрални). Целта на проекта е да се изследват зависимости между моментното състояние на интегралните параметри на атмосферата и локалните свойства на въздуха, измервани от Комплексната Фоновата Станция (КФС) на МОСВ, инсталирана и функционираща на територията на НАО Рожен. Двата потока от информация са разгледани и анализирани едновременно.

Основният метод, който е използван в проекта е корелация между данните за атмосферната екстинкция (поглъщане), получавани през всяка ясна нощ, когато се извършват астрономически наблюдения и вариациите на измерваните от фоновата станция на МОСВ локални параметри на атмосферата. Анализирани са механизмите, които оказват най-силно влияние върху качеството на изображението, екстинкцията и светенето на нощното небе. Продължи публикуването в графичен вид на данните от КФС Рожен на интернет страницата <http://eco.astro.bas.bg/>, създадена за целта през 2013 г. В момента на тази страница са публикувани верифицирани данни, получени в периода 2010 – 2016 г., период далеч надвишаващ заложения в проекта интервал от време. Графичното представяне на данните дава възможност за бърз преглед на измерените параметри на въздуха и избор за целите на изследването на онези моменти, които се характеризират със силни отклонения от средните фоновы стойности. Допълнително са събирани данни, чрез използването на които се търси зависимост между слънчевата активност и локалното състояние на атмосферата, определено по измерваните в НАО Рожен данни. В случаите, когато са намерени такива зависимости, са определени техните количествени параметри: периоди, амплитуди, тригерни механизми, фактори за усилване или намаляване на установените корелации. Показано е, че увеличената концентрация на азотните окиси, измерена от КФС Рожен може да бъде обяснена чрез въздействието на естествени механизми, а именно повишена слънчева активност.

С финансиране по договора бяха придобити две нови камери за наблюдения на цялото небе. Разработена бе система за синхронни наблюдения с тези камери и камерата инсталирана в НАО „Рожен“ през 2013 г. Получени са първи резултати с тази мрежа за мониторинг на метеорната активност. Анализирана е връзката между атмосферната екстинкция и увеличената концентрация на прахови частици. Количествен анализ на телуричните линии, идентифицирани в спектрите на звезди, получени с новия ешелен спектрограф на 2-метровия телескоп бе определена стабилността на съдържанието на кислород във високите слоеве на атмосферния въздух.

## ПОКАЗАТЕЛИ ЗА СЪСТОЯНИЕТО НА АТМОСФЕРНИЯ ВЪЗДУХ, ИЗМЕРВАНИ ОТ КОМПЛЕКСНА ФОНОВА СТАНЦИЯ (КФС) „РОЖЕН”

В КФС Рожен се контролират следните атмосферни замърсители: фини прахови частици (ФПЧ<sub>10</sub> и ФПЧ<sub>2.5</sub>), арсен (As), кадмий (Cd), никел (Ni), полиароматни въглеводороди (PAH), олово (Pb), серен диоксид (SO<sub>2</sub>), азотен диоксид (NO<sub>2</sub>), азотни оксиди (NO<sub>x</sub>), озон (O<sub>3</sub>) и C<sub>6</sub>H<sub>6</sub>. Контролират се и следните метеорологични параметри: скорост и посока на вятъра, обща слънчева радиация, относителна влажност, температура на въздуха и количество валеж. В този проект са използвани само данните за атмосферните замърсители. КФС „Рожен” е показана на фиг. 1.



Фигура 1: КФС „Рожен”, разположена на територията на НАО. В дясно, в дълбочина, се вижда купола на 60 см телескоп.

## АСТРОНОМИЧЕСКИ ДАННИ, ПОЛУЧАВАНИ С ТЕЛЕСКОПИТЕ НА НАО „РОЖЕН”

В НАО „Рожен” има три телескопа за нощни наблюдения – 2-метров телескоп, 60 см телескоп, тип Касегрен и 50/70 см Шмит телескоп. Всички телескопи са оборудвани със съвременни цифрови камери и наблюденията се провеждат всяка ясна нощ, по предварително разпределение на времето съгласно научния план на Института по астрономия с НАО. В НАО има и един телескоп за наблюдение на Слънцето, 15 см коронограф на Лио. Подробна информация за параметрите на телескопите и инструментите към тях може да се намери на официалния сайт на НАО [www.nao-rozhen.org](http://www.nao-rozhen.org). В НАО се извършват наблюдения на тела от Слънчевата система (астероиди, комети, планети и техните спътници), на звезди и звездни системи, на галактики и купове от галактики. Получават се както преки изображения на изследваните обекти в различни филтри (различни дължини на електромагнитното лъчение, така и спектри на отделни избрани обекти, най-често на звезди. Освен богата информация за изследваните обекти, получените кадри дават възможност да се измерва прозрачността на атмосферата (атмосферната екстинкция), да се анализират промени в

спектралните характеристики на нощното небе, характеристиките на телуричните линии, регистрирани в звездните спектри, качество на звездните изображения (seeing), както и параметри характеризиращи слънчевата активност.



Фигура 2: Телескопите на НАО Рожен, с които са получени данни за качеството на атмосферата. В ляво: 2-метровият телескоп, в средата: кулите на 50/70 см Шмит (на преден план) и на 60 см телескоп (в дълбочина) и в дясно: 50/70 см Шмит телескоп в подкуполното пространство.

## Взаимодействие на светлината с атмосферата.

### Разсейване и поглъщане на фотоните от звездите в атмосферата

В астрономията светлинната екстинкция се определя чрез сравняване на светимостта на добре известни звезди ("стандартни" звезди) с измерените *in situ*. По този начин се оценява пълното поглъщане на светлината (екстинкцията) по целия и път през атмосферата. Екстинкцията на светлината се променя в зависимост от моментното състояние на атмосферата – плътност, температура, влага, наличие на газове и прахови частици. Така ние трябва да получим от измерените данни приноса на различните физични процеси и да конструираме модел на разпространението на светлината в атмосферата.

За да характеризираме състоянието на атмосферата и влиянието и върху светлината се нуждаем от следната информация: вертикален профил на плътността на азотните и кислородните молекули и аерозолите, височината  $h$  и разпределението по размери  $s$  на аерозолните частици и техните оптични свойства  $\rho_{A}(h,s)$ . След това трябва да изчислим диференциалната екстинкция на светлината,  $a(\lambda)$  и пълната екстинкция на звездната светлина  $k(\lambda)$ , използвайки теорията на Ми за разсейване на светлината при различни дължини на вълната,  $\lambda$ . Тези изчисления се извършват със създадени за целта алгоритми и написани по тях програми. Програмите изискват поредица от входни параметри, които съдържат:

- Метеорологични данни (атмосферно налягане, температура и влажност)
- Аерозолни плътности, размери и химичен състав на поне три различни височини
- Астрономична екстинкция за поне 5 дължини на вълната, използвайки измервания на "стандартни" звезди с оптични телескопи
- Измерванията на тези параметри се повтарят през много безлунни и безоблачни (фотометрични) нощи. Първите два комплекта данни позволяват изграждането на модел на атмосферата в даден момент от време и изчисляване на атмосферната екстинкция. Моделът може да съдържа някои предположения и неизмерени параметри. Този модел може да бъде тестван и променен чрез сравнение на предсказанията му с третия комплект от данни.

#### Моделиране на разсейването и поглъщането на светлината в атмосферата

Астрономическата екстинкция се определя от цялата атмосфера, през която фотоните преминават по посоката на наблюдението. Ето защо за получаването на необходимите неизвестни параметри на атмосферата се нуждаем от подробен модел на взаимодействието на фотоните.

Процесите, които оказват влияние върху разпространението на светлината във видимия диапазон на електромагнитното лъчение са (1) поглъщане и разсейване върху аерозоли, (2) Релеевско разсейване върху кислородни и азотни молекули и (3) поглъщане в озона. Както е отбелязано в [3], разсейването върху аерозоли е най-същественният процес за отслабването на светлината, следван от поглъщане в аерозолите и релеевското разсейване. При оценка на влиянието на поглъщането в озона трябва да се има предвид, че озонния слой е разположен на надморска височина от 25-32 км. Освен това поглъщането е основно в областта на дължини на вълната от 0.17-0.35  $\mu\text{m}$  и много по-слабо при 0.4-0.7  $\mu\text{m}$ . Това води до заключението, че екстинкцията на светлината от звездите във видимия диапазон слабо се влияе от поглъщането в озона. Но този ефект, въпреки че е малък, трябва да се отчете при затихването на звездната светлина. Тук трябва да се отбележи, че широко възприетите коефициенти на астрономична екстинкция в озона са  $k_{\text{ext}} < 0.01 \text{ mag/airmass}$ . Стойностите на екстинкцията на звездната светлина в озона могат да бъдат оценени като свободни параметри при сравнение на предсказанията на модела и измерената астрономична екстинкция.

Друг процес, който води до кратковременно затихване на светлината е разсейване на фотоните на флукутации на плътността на въздуха. Последният ефект се нуждае от термодинамичен подход и е



обикновено значително по-малък от взаимодействието с частици [4] и има много малко влияние върху качеството на астрономическите изображения. Трябва да се има предвид, че обикновено астрономическите телескопи са разположени на голяма надморска височина с цел да работят в сравнително чиста атмосфера. Например, 2-метровият телескоп на НАО се намира на 1750 м над морското равнище, т.е. над планетния граничен слой, който се характеризира със значителна турбуленция. За избягване на остатъчни движения на въздушните маси, генерирани от температурната разлика между приземния слой и прилежащите въздушни маси, телескопът е монтирана на височина 20 метра, в специално изградена за целта кула.

Нашият подход за решаване на директния проблем с релеевското и аерозолното затихване на светлината е в рамките на класическата електродинамика. И двата процеса са описани като разсейване и поглъщане от единична малка частица (молекула или аерозол). Сечението на взаимодействие на фотоните със съставките на въздуха е точно изчислено в рамките на теорията на Ми за разсейване на електромагнитна вълна върху малка сфера. Тази теория е развита от Ми през 1908 г. и независимо от П. Дебай [4,5,6]. В този модел ние предполагаме, че няма обмяна на енергия между налитания фотон и частицата мишена (Раманово разсейване), тъй като този процес е пренебрежим в атмосферата [4]. В основата на нашия метод седи предположението, че светлината взаимодейства с малки свободни частици в хомогенна среда. Под хомогенна среда разбираме среда, в която ако има нееднородности техните характерни размери са по-малки от дължината на вълната на светлината. Ние сме възприели микроскопичен подход, предполагайки че всяка взаимодействаща частица може да се характеризира с честотно-зависим комплексен индекс на пречупване  $n$ . Тук фазовата скорост на електромагнитната вълна в средата е  $c_{ph} = c/n$  ( $c$  е скоростта на светлината във вакуум). Следвайки [4] интензивността на плоската вълна, пресичаща слой с инфинитезимално малка дебелина  $dz$ , съдържащ  $N$  различни типове частици в хомогенна среда може да се запише:

$$(1) \quad dI = -\alpha_{ext}(z)I dz$$

където  $I$  е интензивността на затихналата (разсеяна или погълната) светлина. За крайно голям слой с дебелина  $h$  и интензивност на падащата светлина  $I_0$  получаваме:

$$(2) \quad I = I_0 e^{-\int_0^h \alpha_{ext}(z) dz}$$

Коефициентът на затихване  $\alpha_{ext}$  е:

$$(3) \quad \alpha_{ext}(z) = \sum_{i=1}^N N_i(z) C_{ext,i} = \sum_{i=1}^N N_i(z) C_{sca,i}^{(3)} + \sum_{i=1}^N N_i(z) C_{abs,i}$$

където  $N_i$  е броя на частиците от тип  $i$  за единица обем. Сечението на екстинкцията е:

$$(4) \quad C_{ext,i} = C_{sca,i} + C_{abs,i}$$

където  $C_{abs}$  и  $C_{sca}$  са сечението за поглъщане и разсейване, което има размерност на площ ( $cm^2$ ). В случай на слабо разсейване в хомогенен слой с дебелина  $h$ , може да се пренебрегне многократното разсейване, тогава зависимостта (2) се свежда до:

$$(5) \quad I = I_0 e^{-\alpha_{ext} h}$$

В случай на сфера с радиус  $a$ , сеченията  $C_{sca}$  и  $C_{ext}$  могат да се разложат в безкрайни редове:

$$(6) \quad C_{sca} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1)(|a_n|^2 + |b_n|^2); \quad C_{ext} = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) Re(a_n + b_n)$$

където коефициентите на разсейване  $a_n$  и  $b_n$ , представени чрез сферичните функции на Бесел и Хенкел, са зависими от два аргумента - размерния параметър  $x$  и относителния индекс на пречупване  $m$ :

$$(7) \quad x = ka = \frac{2\pi n}{\lambda}; \quad m = \frac{n_1}{n}$$

$n$  и  $n_1$  са индексите на пречупване на средата и частицата,  $\lambda$  и  $k$  са дължината и вълновия вектор на светлината в средата. Грубо правило на пръсти е, че за числени пресмятания са достатъчни  $x$  члена от реда. По-ефективен начин за числени пресмятания е предложен в [4].

Нека да отбележим тук, че добре известната зависимост на **Релеевското разсейване** от дължината на вълната на въздушните молекули ( $1/\lambda^4$ ), отговорна за синия цвят на небето дължащо се на разсеяна неполяризирана слънчева светлина, може лесно за се получи от теорията на Ми в граница на много малки сфери  $x \ll 1$ :

$$(8) \quad I \sim \frac{a^6}{\lambda^4} (1 + \cos^2 \vartheta) I_0$$

Тук  $\theta$  е ъгъла между вълновите вектори на падащата и разсеяната светлина.

Много полезно в теорията на **аерозолното разсейване** е понятието "фазова функция"  $p(\vartheta)$  описващо ъгловото разпределение на енергията на разсеяната светлина [5]. Очевидно разпределението на разсеяната светлина около ансамбъл от частици е симетрично по азимут (по отношение на посоката на падане на светлината), т.е. зависи само от ъгъла  $\vartheta$  между разсеяната и падащата светлина. Стойността на  $p(\vartheta)d\Omega/4\pi$  дава плътностната функция на вероятността светлината да се разсее в телесен ъгъл  $d\Omega = d\cos\theta d\varphi$ , откъдето следва:

$$(9) \quad \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^\pi p(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta = \frac{1}{2} \int_0^\pi p(\vartheta) \sin\vartheta d\vartheta = 1$$

В случай на сферична частица теорията на Ми дава точно решение на ъгловото разпределение на интензивността на разсеяната светлина [4,5]. Той е разложен в безкраен ред, зависещ от коефициентите на разсейване  $a_n$  и  $b_n$  и също от асоциираните функции на Лежандър  $P_n(\cos \vartheta)$ . Както беше отбелязано комплексните коефициенти  $a_n$  и  $b_n$  са функции на размерния параметър  $x$  (т.е. зависи от отношението на радиуса на частицата и дължината на вълната) и относителния индекс на пречупване  $m$ .

От казаното дотук е ясно, че знанието на атмосферните параметри, обсъждани по-горе, ни позволяват да разработим модел на разпространението на светлината. Критичните параметри, като индексите на пречупване, размери и плътности на аерозолите, ще бъдат измерени директно чрез представената по-долу методология. Сечението на ъгловото разсейване, получено от теорията на Ми, дава възможност да се изчисли прецизно изменението на образа на въздушните порои, дължащо се на вариации в аерозолите. Същият модел позволява да изчислим астрономичната екстинкция (тук ъгловата зависимост от разсеяната светлина е несъществена). Така астрономичното детектиране на екстинкцията на звездната светлина на същото място и в същото време както и аерозолните измервания, ще позволи определянето на неизвестните параметри на модела (т.е. разпределението във височина на аерозолната компонента). Директно измерената екстинкция на звездната светлина е ценен инструмент за контролиране на прецизността на новоразработения модел.

## Определяне на атмосферната екстинкция от фотометрия на звезди

Когато излъчването от звезда или друг извънземен източник (във видимия диапазон на спектъра) преминава през земната атмосфера, то претърпява два главни типа деградация:

Сиинг (причинен от турбуленцията): изображенията на извънземните източници се размиват (разширяват);

Екстинкция (отслабване, поглъщане): излъчването на извънземните източници, достигащо земната повърхност, отслабва.

*Размиване от земната атмосфера (турбуленция):* По пътя си през земната атмосфера светлината минава през множество различни въздушни слоеве. Всеки слой има малко различна температура, налягане и плътност. Има също така малки разлики в химичния състав, праха и водното съдържание. Поради това показателят на пречупване на всеки слой е леко различен. Така, преминавайки от слой към слой, светлината се отклонява под леко различен ъгъл. Атмосферата се намира в постоянно движение, като въздухът на различни височини се движи в различни посоки с различна скорост. Минаващите през различните слоеве светлинни лъчи се пречупват под постоянно променящи се ъгли. Когато се наблюдава с телескоп, достатъчно голям, за да събира светлина, преминала през различни въздушни нееднородности, телескопът ще формира множество изображения на всяка звезда, леко отместени едно спрямо друго заради различните показатели на пречупване на въздушните нееднородности и като краен резултат имаме размито усреднено изображение.

В астрономията ефектът на размиване от атмосферата се нарича 'сиинг'. Величината на размиването зависи от свойствата на атмосферата, през която преминава светлината. Като общо правило наземните телескопи не могат да разделят детайли, по-малки от около 1 ъглова секунда. Сиингът е малко по-добър на планинските върхове и по-лош за по-ниски местоположения. Например, типичният сиинг в Националната обсерватория на Рожен е около 2 - 2.5 ъглова секунда.

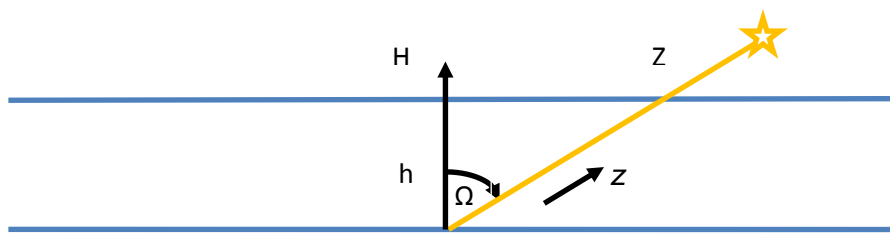
Терминът 'seeing' се използва за описание на случайните промени в посоката на светлинния лъч, влизаш в телескопа, а случайните флукутации в интензитета на лъча, предизвикани от атмосферната турбуленция, се наричат 'сцинтилации (scintillation)'. С невъоръжено око тези сцинтилации се наблюдават като 'блещукане'. Като правило, колкото е по-голяма апертурата на телескопа, толкова по-малки са относителните промени на интензитета и те стават пренебрежими при голяма площ на главното огледало на телескопа. И ефектът на сиинга, и ефектът на сцинтилациите се дължат на различните показатели на пречупване на въздуха в различните зони, през които минава светлинния лъч от наблюдавания обект [16].

*Екстинкция в земната атмосфера (отслабване):* Когато звездното излъчване пресича земната атмосфера, то отслабва частично заради разсейването и частично от поглъщането, дължащо се на молекулите и аерозолите в различните атмосферни слоеве. Явлението наричаме 'екстинкция' на излъчването (за подробности вж. напр. [8,15,20]). Отслабването на излъчването от извънземни източници във видимата спектрална област силно се различава в зависимост от това на коя дължина на вълната

наблюдаваме. Отслабването на монохроматичния енергиен поток на единица преминало разстояние е пропорционално на самия енергиен поток, което позволява да се определи константен фактор на монохроматичното отслабване, изразен в звездни величини. Този фактор наричаме ‘коефициент на екстинкция’.

Да разгледаме сноп от (оптично) излъчване на звезда, навлизащ в атмосферата (вж. Фиг.3). С  $I(\lambda)$  сме означили монохроматичния енергиен поток от звездата при дадена дължина на вълната  $\lambda$ . На основата на уравнението на лъчистия пренос и в съгласие с формула (1) относителната загуба в потока при преминало разстояние  $dz$  може да се изрази като  $dI(\lambda) = -I(\lambda)\alpha(\lambda,z)dz$ , където  $dz$  се взема в посоката на движение на светлината. Факторът  $\alpha(\lambda)$  представлява коефициентът на поглъщане (в единици дължина<sup>-1</sup>). По-надолу с  $H$  ще означаваме пълната дебелина на атмосферата при зенитен ъгъл  $\Omega = 0$ , а  $Z$  е пълната дължина, преминала от звездната светлина във въздуха по зрителния лъч. Интегрирайки по пътя  $z$ , измерен по зрителния лъч, получаваме израза

$$(10) \quad I(\lambda,z) = I_0(\lambda) e^{-\tau(\lambda,Z)}$$



Фигура 3: Сноп от светлината на звезда, преминаващ през атмосферата под ъгъл  $\Omega$ , измерван от посоката към зенита.

Тук с  $I_0(\lambda)$  е означен извънатмосферния монохроматичен поток от звездата, измерен на входа на атмосферата, а  $I(\lambda)$  е монохроматичният поток, достигащ до земната повърхност. Безразмерната величина  $\tau(\lambda)$  описва т.нар. ‘оптична дебелина’ на атмосферата по зрителния лъч. Определя се от уравнението

$$(11) \quad \tau(\lambda) = \int_{0,Z} \alpha(\lambda,z) dz.$$

При измерването на атмосферната екстинкция на звездната светлина обикновено се приема приближение за “плоска атмосфера”, в която коефициентът на поглъщане  $\alpha(\lambda,z)$  зависи само от височината  $h=zc\cos(\Omega)$ . Тогава оптичната дебелина се изразява като

$$(12) \quad \tau(\lambda) = \sec\Omega \int_{0,H} \alpha(\lambda,h) dh = \tau_0(\lambda)\sec\Omega,$$

където интегралът  $\tau_0(\lambda)$  представлява оптичната дебелина в зенита. Факторът  $\sec\Omega$  се нарича ‘въсдушна маса’ и се означава с  $X$ . Накрая имаме

$$(13) \quad I(\lambda, X) = I_0(\lambda) e^{-\tau_0(\lambda)}$$

Въздушната маса е относителното количество атмосфера, през която е минало излъчването, като за единица се приема 'дебелината' на атмосферата, когато звездата е вертикално над хоризонта (в зенита), т.е. при зенитен ъгъл  $0^\circ$ . Приблизението  $X = \sec \Omega$  е приемливо за зенитни ъгли до  $60^\circ$ , където грешката е 0.25%. Тази грешка на приближението нараства до 10% при  $\Omega = 85^\circ$ .

Прозрачността на атмосферата за дадена дължина на вълната и дадена въздушна маса  $T(\lambda, X)$ , (наричана още "пропускане") се дефинира като отношение на потоците  $I(\lambda, X)/I_0(\lambda)$ . Чрез уравнение (1) можем да свържем атмосферното пропускане с оптичната дебелина в зенита:

$$(14) \quad T(\lambda, X) = e^{-\tau_0(\lambda)X}$$

Ако  $\tau_0(\lambda) > 10$ , атмосферата се приема за напълно непрозрачна. От друга страна, при астрономични наблюдения се иска  $\tau_0(\lambda) < 0.5$  (пропускане над 61% в зенита) [вж. 13].

В астрономията звездният блясък се измерва в звездни величини. По формулата на Погсън видимата звездна величина  $m(\lambda)$  на дадена звезда, излъчваща при дължина на вълната  $\lambda$ , е

$$(15) \quad m(\lambda) = -2.5 \log_{10} I(\lambda, X) + C(\lambda),$$

където  $C(\lambda)$  е константа, отчитаща нул-пункта на скалата на звездните величини. Замествайки  $I(\lambda, X)$  от уравнение (1), изразът придобива следната форма, позната като 'закон на Бугер':

$$(16) \quad m(\lambda) = m_0(\lambda) + [2.5 \log_{10} e] \tau_0(\lambda)X = m_0(\lambda) + k(\lambda)X$$

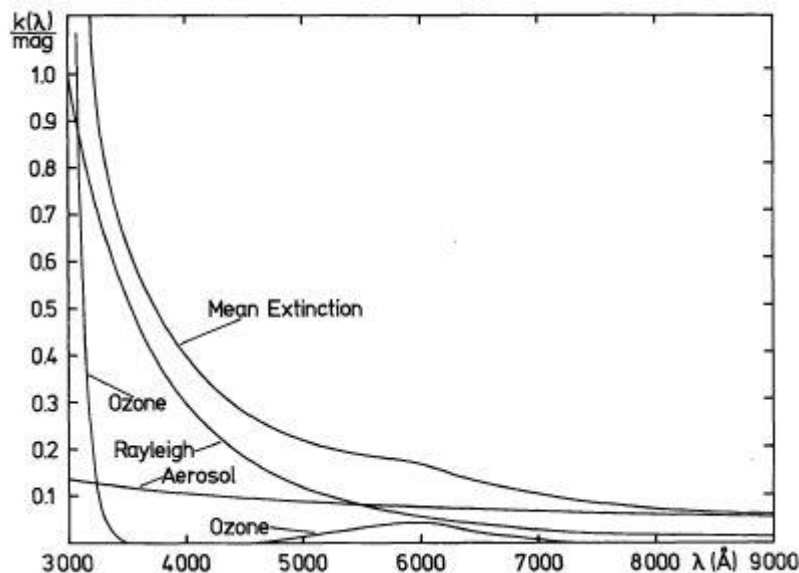
където  $m_0(\lambda) = -2.5 \log_{10} I_0(\lambda) + C(\lambda)$  е видимата величина на звездата на входа на атмосферата, а  $m(\lambda)$  е величината, измерена на повърхността на Земята, след като светлината от звездата е преминала през въздушна маса  $X$ . В астрономията  $k(\lambda)$  се нарича 'коэффициент на екстинкция' при дължина на вълната  $\lambda$  и се изразява в единици 'magnitudes/air mass'. От уравнение (16) следва, че коэффициентът на екстинкция представлява разликата в звездни величини между блясъка на звездата, когато я наблюдаваме от земната повърхност в зенита, и блясъка, който тя има на входа на атмосферата. За да се избегне евентуално объркване, трябва да отбележим, че (извън астрономията) в атмосферните изследвания коэффициентът на отслабване  $\tau(\lambda)$  също се нарича 'коэффициент на екстинкция'. В действителност двете величини са свързани така:

$$(17) \quad k(\lambda) = 2.5 (\log_{10} e) \tau(\lambda) = 1.08 \tau_0(\lambda)$$

Имайки предвид различната природа на източниците на отслабване на светлината, описани в параграф 3.1, можем да запишем

$$(18) \quad k(\lambda) = \sum_i k_i(\lambda)$$

Тук индексът  $i$  се отнася към различните екстинкционни процеси, показани на фиг.4.



Фигура 4: Пример за средната екстинкция  $k_i(\lambda)$  и нейните компоненти, дължащи се на разсейването на Рейли, аерозолното разсейване и  $O_3$  (данните са взети от [19] и са за обсерваторията Флагстаф, Аризона).

Hayes and Latham [10] отбелязват, че има три главни източника на екстинкция в земната атмосфера, които задължително трябва да се отчитат в астрономическата фотометрия: разсейването на Рейли от молекулите, аерозолното разсейване и поглъщането от молекулите.

1. *Разсейване на Рейли.* Зависимостта на вертикалната екстинкция (изразена в magnitudes/air mass), дължаща се на това разсейване, от дължината на вълната ( $\lambda$  в  $\mu\text{m}$ ) и височината ( $h$  в km) се апроксимира чрез:

$$(19) \quad k_{\text{Ray}}(\lambda, h) = 0.0094977 \lambda^{-4} \left( (n-1)_{\lambda} / (n-1)_{\lambda=1} \right)^2 \exp(-h/7.996)$$

където скалата на височините за долната тропосфера е взета 7.996 km. Членът на показателя на пречупване се дава от:

$$(20) \quad (n-1)_{\lambda} / (n-1)_{\lambda=1} = 0.23465 + 107.6 / (146 - \lambda^{-2}) + 0.93161 / (41 - \lambda^{-2}).$$

2. *Разсейване от аерозоли.* Дължи се на частици – включително прах, водни капки и замърсители от човешка дейност. Екстинкцията в този случай често се апроксимира числено с формулата:

$$(21) \quad k_{\text{aer}} = 0.05 \lambda^{\alpha} e^{-h/H} \text{ mag/air mass},$$

където  $\lambda$  е наблюдаваната дължина на вълната (в  $\mu\text{m}$ ), а скалата на височините  $H$  обикновено се взема [10] (в действителност тя варира значително в зависимост от мястото). Авторите на [19] и [10] намират типични стойности на  $\alpha = -0.9$ . По-новите измервания на зависимостта на аерозолната екстинкция от дължината на вълната дават за  $\alpha$  по-широк диапазон (-2.5 – -0.5) със средна за цялата земна повърхност стойност около 1.3.

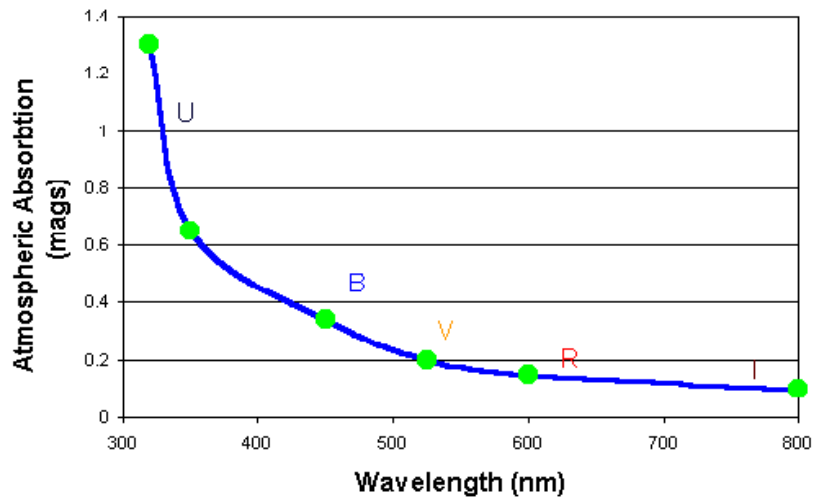
3. *Молекулярно поглъщане.* Главните компоненти на това поглъщане са абсорбционните ивици на озона, на кислорода и на водните пари. Вертикалната екстинкция от озона се апроксимира така, както е описано в “La Palma Technical Note No.31” [14].

#### Използвана апаратура

Коефициентът на екстинкция  $k(\lambda)$  лесно може да се определи от уравнение (16). Правят се няколко измервания на звездната величина  $m(\lambda)$  на стандартните звезди в хода на нощта при различни въздушни маси. Линеината апроксимация, използвайки метода на най-малките квадратични отклонения (МНК) на уравнение (7) дава екстинкционния коефициент за конкретната дължина на вълната  $\lambda$ . Допълнително атмосферното пропускане при тази дължина на вълната за различни въздушни маси може да се пресметне директно от уравнението  $T(\lambda, X) = e^{-\tau_0^{(\lambda)} X}$ . За да получим коефициентите на екстинкция (и следователно атмосферното пропускане) в различни дължини на вълните от оптичния диапазон, ще използваме стандартните U, B, V, R и I астрономически широкоивични филтри. През 50-те години на миналия век Джонсън (Johnson) определи три фотометрични ивици (U, B и V), базирани на чувствителността на фотоумножителите (ФЕУ), използвани по негово време. По-нататък бяха добавени червената и инфрачервената ивици (R и I) поради появата на ФЕУ с повишена чувствителност в червената област на спектъра. След това, през 80те години приборите със зарядова връзка (Charge Coupled Devices, CCD) детекторите изместиха ФЕУ и се наложи създаването на нов набор от филтри, който да възпроизвежда резултатите, получени по-рано с ФЕУ [7]. Днес т.нар. ‘филтри с дефиниция на Бесел (Bessell)’ се смятат за индустриален стандарт при работа с CCD матрици. С такава система от детектори и филтри са оборудвани и телескопите на НАО „Рожен”, които са използвани за целите на този проект.

На Фиг.5 е показана зависимостта на атмосферното поглъщане от централната дължина на вълната на различните филтри за средно добро място. Трябва да се отбележи, че за достигане на необходимата точност следва да се добави корекция, която е функция от цвета на стандартната звезда. Причина за това е, че ширината на използваните филтри в ивиците U, B, V, R и I е достатъчно голяма, щото спектралното разпределение на звездния поток в рамките на ивицата на пропускане на филтъра да

покаже забележим градиент. Една червена (т.е. студена) звезда ще даде повече енергия в червения край на тази ивица по сравнение с една синя (т.е. гореща) звезда. Това създава ефект на изместване на ‘центъра на тежестта’ на филтъра към червената или синята област, т.е. трябва да се въведе корекция за цвета (т.е температурата) на стандартната звезда.



Фигура 5: Вариация на поглъщането от атмосферата (в звездни величини) в зависимост от цвета на използвания филтър.

Цялата инструментална установка, използвана в проекта представлява телескоп + CCD камера + аксесоари + компютър. Такъв комплект от компоненти ще наричаме ‘Машина за астрономическа атмосферна екстинкция’ (МААЕ). Всеки от телескопите в НАО „Рожен” може да бъде използван като една МААЕ.

#### Наблюдения и редуция на данните

За да се определи на практика коефициента на екстинкция, трябва да се наблюдават през нощи с „добри” атмосферни условия (т.нар. “форометрични нощи”) определени стандартни площадки/полета, по възможност разпределени по различни зенитни ъгли. Напр., може да се използва групата звезди от т.нар. “Extended Landolt Standards”, измерена и публикувана от Galadi-Enriques, Trulouis and Jordi [9]. В тяхната работа е представен списък от 681 вторични UBVRI стандартни звезди за CCD фотометрия. Те са разпределени по V-величини от 9.7 до 19.4, а цветовият им индекс B–V варира от 1.15 до 1.97. Звездите са групирани в 11 различни площадки/полета, всяко от които се събира на единичен CCD кадър. Звездите са разположени около първичните екваториални UBVRI стандартни звезди на Ландолт (Landolt – вж. [11,12]), които широко се използват от астрономическата общност за калибровъчни цели. Те представляват вътрешно съгласувана и хомогенна реализация на широкоивичната фотометрична система на Johnson-Cousins.

Много полезна за нашите цели е също така и фотометричната база данни, поддържана от Stetson:



<http://www4.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/community/STETSON/standards/>

<http://www4.cadc-ccda.hia-ihp.nrc-cnrc.gc.ca/community/STETSON/archive/>

Първият линк съдържа т.нар. 'Стандартни фотометрични полета на Стетсън' (около 200 на брой) в Астрономическия център за данни на Канада, който се управлява от Националния съвет за научни изследвания на Канада с подкрепата на Канадската космическа агенция. Другият линк води към 'Архива със стандартни зезди на Стетсън', съдържащ UBVRi фотометрия за 40 090 отделни първични (на Landolt) и вторични (на Stetson) стандарти. За подробности вж. [17,18] и посочената там литература.

Разполагайки с кадрите с избраните площадки със стандартни звезди, получаването на екстинкционните коефициенти е предмет на рутинна астрономическа редукция, която подробно е описана в литературата.

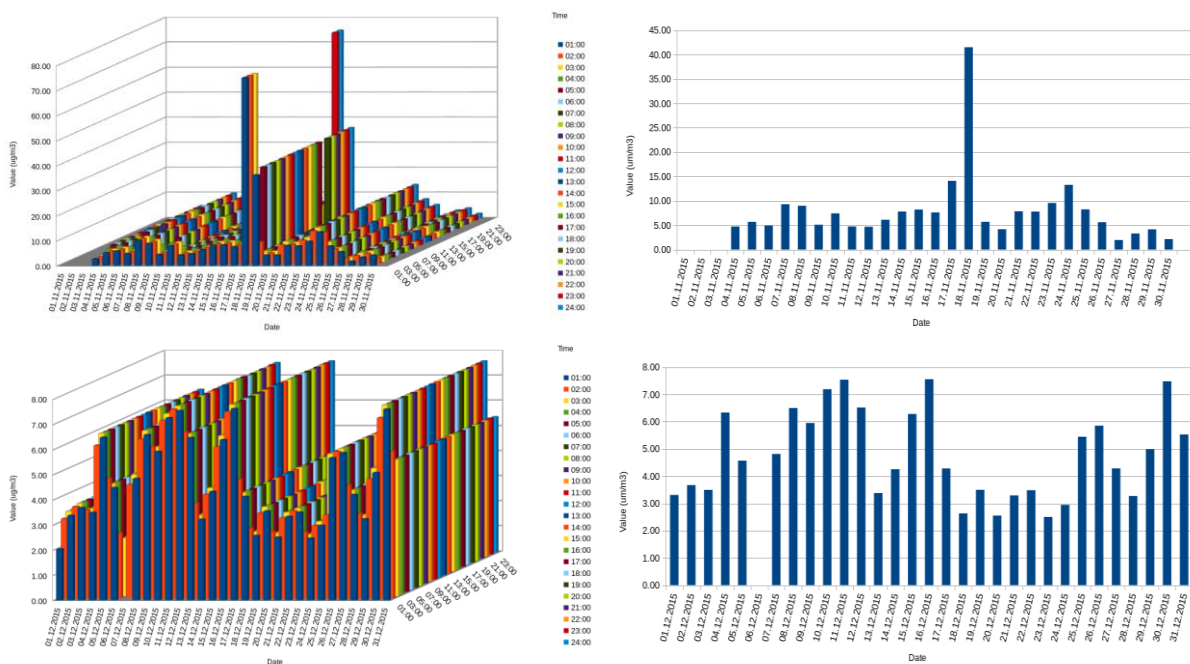
Ефективното използване на наблюдателната база изисква добро планиране на наблюденията за цялата нощ. Това планиране изисква изчисление на променящата се височина на обектите (звездите) и предварително изготвяне на разписание на последователното им обхождане.

#### Литература:

- (1) Impact of atmospheric parameters on the atmospheric Cherenkov technique, K.Bernlohr, *Astroparticle Physics*, 12, 255-268 (2000)
- (2) Feasibility study of an absolute energy calibration of imaging atmospheric Cherenkov telescopes by starlight, O. Karschnick et al., *Astronomy & Astrophysics Suppl.*, 143, 535-539 (2000)
- (3) Fundamentals of Atmospheric Modeling, M. Jacobson, Cambridge Univ. Press, 2005
- (4) Absorption and Scattering of Light by Small Particles, C. Bohren and D. Huffman, Wiley Professional Edition, 1998
- (5) Aerosol Optics - Light Absorption and Scattering by Particles in the Atmosphere, A.Kokhanovsky, SPRINGER-Praxis Publishing, 2008
- (6) Light Scattering by Small Particles, H. van de Hulst, Dover Publications, 1981
- (7) Bessel M.S. 1990, *PASP* 102, 1181.
- (8) Burki G., Rufener F., Burnet M., Richard C., Blecha A., and Bratschi P. 1995, *A&AS* 112, 383
- (9) Galadi-Enriquez D., Trullols E. and Jordi C. 2000, *A&AS* 146, 169
- (10) Hayes D. S. and Latham D. W. 1975, *ApJ* 197, 593
- (11) Landolt A.U. 1983, *AJ* 88, 439
- (12) Landolt A.U. 1992, *AJ* 104, 340
- (13) Lena P., Lebrun F. and Mignard F. 1998, "Observational Astrophysics", Berlin: Springer, p. 37
- (14) King D.L. 1985, RGO/La Palma technical note no.31, "Atmospheric Extinction at the Roque de los Muchachos Observatory, La Palma".
- (15) Rufener, F. 1986, *A&A* 165, 275.
- (16) Schroeder D. 2000, "Astronomical Optics", Academic Press.
- (17) Stetson P. 2005, *PASP* 117, 563.
- (18) Stetson P., Catelan M. and Smith H.A. 2005, *PASP* 117, 1325.
- (19) Tueg, H., White N.M. and Lockwood G.W. 1977, *A&A* 61, 679.
- (20) Vargas M.J., Benitez P.M. and Bajo F.S. 2000, *Eur. J. Phys.* 21, 245.

## Данни за измерени от КФС „Рожен” стойности на замърсители на атмосферата

Изпълнителната агенция по околна среда предостави на ИА с НАО достъп до Националната автоматизирана система за контрол качеството на атмосферния въздух – пункт КФС „Рожен”. Сътрудници на ИА с НАО продължиха публикуването на тези данни на интернет страница, създадена за целта през 2013 г., <http://eco.astro.bas.bg/index1.html>. Показани са стойностите за Бензен, азотни окиси, озон, серен двуокис и фини прахови частици по-малки от 10  $\mu\text{m}$ . Данните са организирани за отделните месеци от 2010 г., до последните верифицирани данни за 2016 г. Илюстрация на графичното публикуване на данните е показана на фигура 8. Тук е показано разпределението на фините прахови частици за месеците окт., ноември и дек. 2015 г. и за м. март 2016 г. По оста X са нанесени дните от месеца, по оста Y – часовете, а по оста Z – съдържанието на фините прахови частици, изразено в  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . С условни цветове са представени колонките за отделните часове от денонощието. Сравнението на данните за двата месеца показва, че в повечето случаи те се характеризират с приблизително еднакви средно-дневни стойности, които не надвишават 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , а през повечето дни са под 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Изключение се наблюдава единствено на 18 ноември 2015 г., когато средната дневна концентрация е по-голяма от 45  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , а около полунощ е достигнала пикови стойности над 70  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Ще се върнем към тази особеност в следващите глави, при анализа на данните за атмосферната екстинкция.



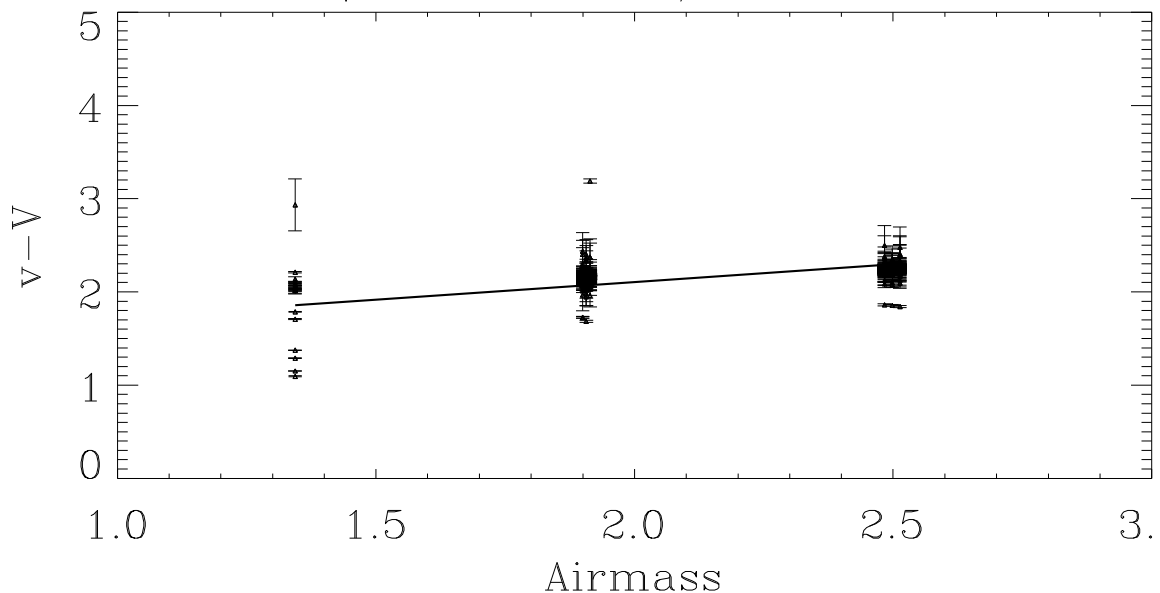
Фигура 8: Графично представени данни за концентрациите на фини прахови частици, от измервания на КФС „Рожен” за м. ноември (горе) и декември (долу) 2015 г. В ляво са представени измерените стойности по часове за всеки ден от съответния месец, а в дясно – средните стойности за съответния ден.

## Резултати за избрани моменти

Атмосферна екстинкция и параметри на въздуха  
през ноември 2015, март и май 2016

Методика: За определяне на коефициентите на екстинкция е необходимо да се извършат измервания на стандартни звезди на различна височина, т.е. при различни въздушни маси. След събиране на данните, за определяне на екстинкцията, се използва зависимостта (16). Пример за прилагането на метода е даден на фигура 9, където са представени измервания във филтър V, получени на 2.11.2015 г. Измерванията са направени на 3 различни въздушни маси и покриват интервала от 1.3 до 2.5. Използвайки линейна регресия, прилагайки метода на най-малките квадрати, получената екстинкция представлява наклона на апроксимиращата права.

$$k_V = 0.3779 \pm 0.0007$$

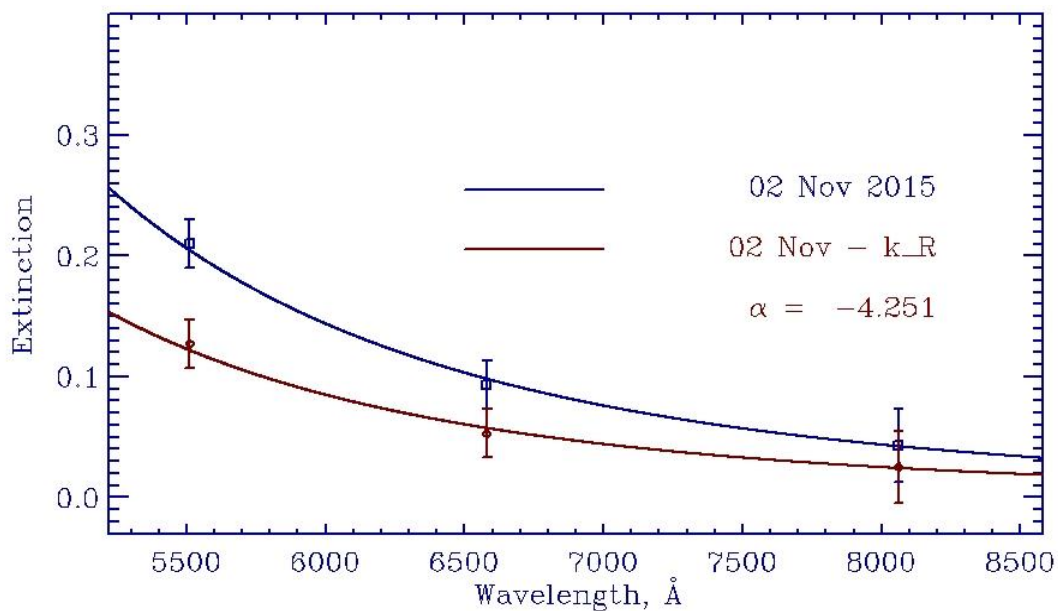


Фигура 9. Разлика между каталожни и измерени инструментални звездни величини, представена като функция на въздушната маса. Измерванията са за 2 ноември 2015 г.

При използването на голям брой звезди статистическата грешка намалява и коефициентът на екстинкция се определя с висока точност, както се вижда от представения над фигурата резултат. В представения случай на всяка от въздушните маси са направени по 363 измервания на стандартни звезди. Такива измервания са направени и с филтри R и I, за които са получени следните коефициенти на екстинкция:  $k_R = 0.0835 \pm 0.0003$  и  $k_I = 0.0432 \pm 0.0006$ . Ще използваме така получените коефициенти на екстинкцията за да анализираме нейното спектрално разпределение.

Спектралното разпределение на екстинкцията за 2.11.2015 г. е показано на фигура 10. Сините символи (квадратчета) показват получените стойности за екстинкцията в трите цвята, V, B и R. Точките са фитирани със степенен закон, резултатът е показан с плътната линия, минаваща през отсечките, които показват грешката на определяне стойността на екстинкцията. Червените ромбчета са получени след като е изваден приноса на Релеевското разсейване за съответните дължини на вълната. За целта е

използвана зависимостта (19). Тъй като поглъщането в озона е пренебрежимо малко във видимия спектрален диапазон, може да се приеме, че остатъчният принос в екстинкцията, след изваждане на Релеевската компонента се дължи на разсейване и поглъщане от аерозоли. Тази остатъчна компонента е фитирана със степенна функция, в резултат на което е получен степенният показател  $\alpha = -4.251$ . Този степенен показател е почти два пъти по-малък от средно наблюдаваните стойности за аерозолната компонента, което прави спектралното разпределение по-стръмно, с доминиращо влияние на късите дължини на вълните. Ние интерпретираме това като наличие на по-голямо количество аерозоли с размери по-малки или равни на дължината на вълната в синия спектрален диапазон, т.е. по-малки от  $0.5 \mu\text{m}$ . Основание за това ни дава обстоятелството, че разсейването е най-ефективно за частици с размери близки до дължината на вълната на лъчението.



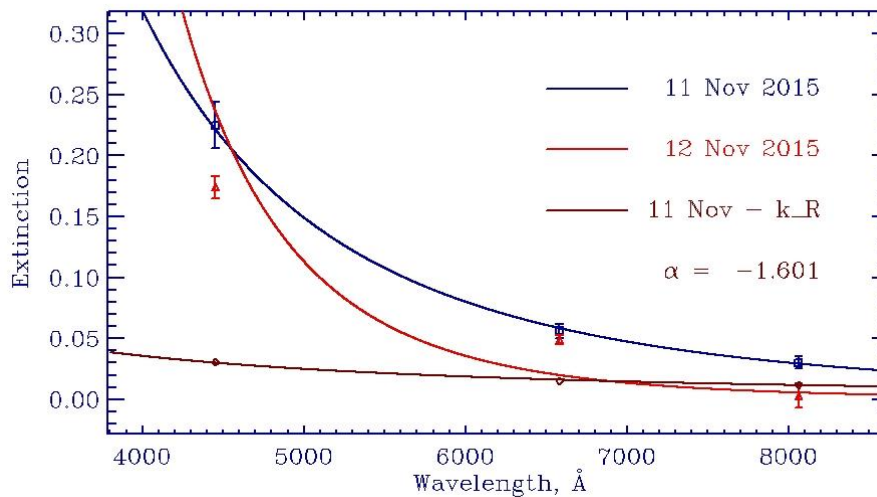
Фигура 10. Спектрално разпределение на коефициента на екстинкция за 2 ноември 2015 г. Сините символи представят получените коефициенти на екстинкцията, а червените – дела на аерозолната компонента (за подробности вижте текста).

Описаната методика за анализ на спектралното разпределение на екстинкцията бе приложена и за данните от 11 и 12 ноември. Резултатите са показани на фигура 11. Аерозолната компонента за 11 ноември се описва добре със степенен закон, със степенен показател  $\alpha = -1.601$ . Тази стойност е около средата на статистически определения диапазон от степенни показатели, което е индикация за равномерно разпределение на аерозолите по размери в субмикронния диапазон (съответстващ на видимия спектрален диапазон).

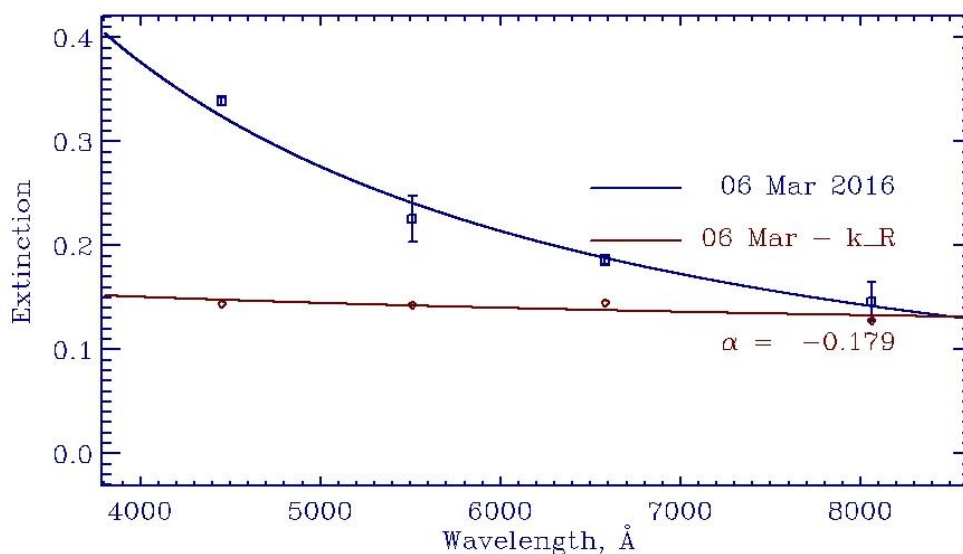
На фигура 12 са показани резултатите от измерване на атмосферната екстинкция на 6 март 2016 г. Степенният закон, който описва приноса на аерозолите в този случай е със степенен показател  $\alpha = -0.179$ . По същият начин са обработени данните за 28 май 2016 г. (фигура 13), където за степенния показател получаваме  $\alpha = -4.147$ .

В дадените примери на измерени коефициенти на екстинкцията обърнахме специално внимание на аерозолната компонента, тъй като разсейването и поглъщането на фотони от аерозолите е доминиращият фактор при формиране на общата екстинкция. Аерозолите в атмосферата имат размери от няколко нанометра до около  $100 \mu\text{m}$ , но тъй

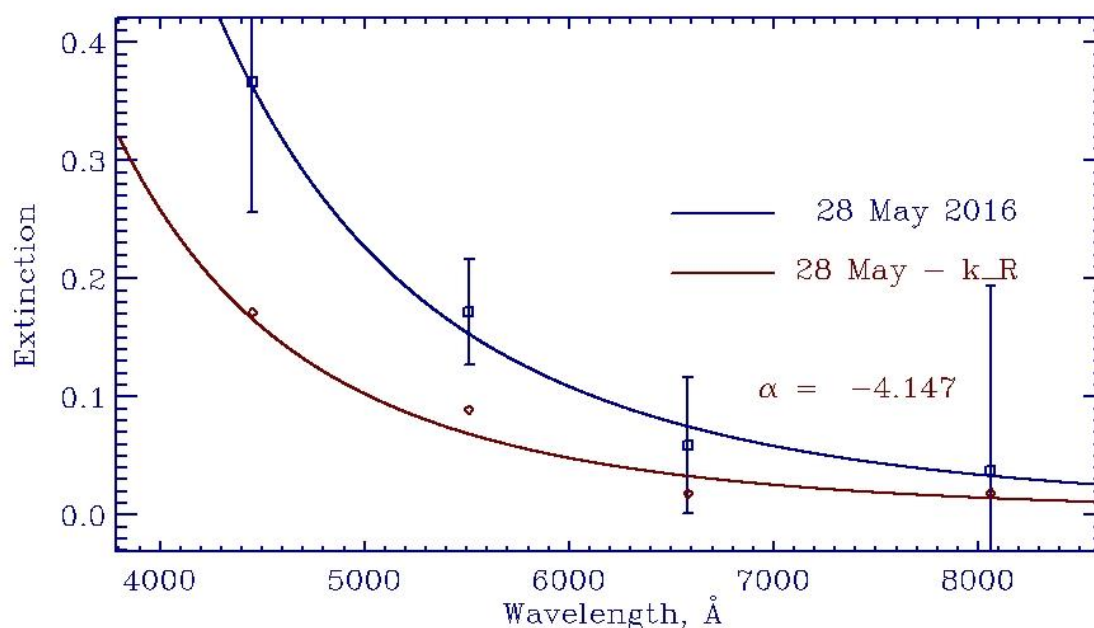
като нашите измервания са ограничени само във видимия диапазон на електромагнитния спектър, изводите които получаваме се ограничават до частици с размери от 0.38  $\mu\text{m}$  до 0.90  $\mu\text{m}$ . След изваждане приноса на Релеевското разсейване, фитирахме спектралното разпределение на приноса на аерозолната компонента със степенна функция,  $k_{\text{aer}} = 0.05 \lambda^{\alpha} e^{-h/H}$  mag/air mass. Така бяха определени степенните показатели за четирите разгледани случая – два през ноември 2015 г и по един през март и май 2016. Степенните показатели варират в диапазона от -4.25 до -0.18, като само на 11 ноември 2015 г. стойността се получи -1.6, което е в рамките на емпирически определения за стандартен диапазон от -2.5 до -0.5. Тези флуктуации могат да бъдат предизвикани от силни промени в разпределението по размер на субмикронните частици.



Фигура 11. Спектрално разпределение на коефициента на екстинкция за 11 (квадратчета) и 12 ноември (триъгълничета) 2015 г. С ромбчета в кафяво е показан дела на аерозолната компонента, а кафявата линия е апроксимацията на тази компонента със степенен закон.



Фигура 12. Спектрално разпределение на коефициента на екстинкция за 6 март 2016 г. Сините символи представят получените коефициенти на екстинкцията, а червените – дела на аерозолната компонента (за подробности вижте текста).



Фигура 13. Спектрално разпределение на коефициента на екстинкция за 28 май 2016 г. Сините символи представят получените коефициенти на екстинкцията, а червените – дела на аерозолната компонента (за подробности вижте текста).

През първите дни на ноември 2015 г., няма данни за измерената КФС „Рожен” концентрация на праховите частици с размер  $< 10 \mu\text{m}$ . Редът от данни започва на 4.11. до 6.11. концентрациите остават близки до минималните за месеца. Това ни дава основание да екстраполираме назад с две денонощия за да направим сравнение с резултата за аерозолите, получен на 2.11. Полученият тогава степенен показател е -4.25,

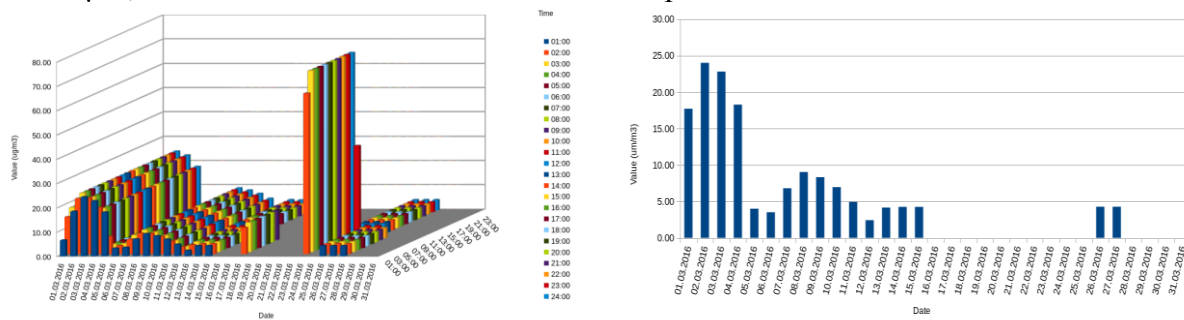
което означава силно повишен принос в поглъщането и разсейването на частици с диаметри по-малки от 0.5  $\mu\text{m}$ . При по-нататъшния анализ трябва да се има предвид, че поглъщането и разсейването са пропорционални на геометричната площ на частиците, а масите им – на техния обем. Това означава, че сравнението между двата независими източника на данни, екстинкцията от една страна и концентрацията от друга, силно ще зависи от функцията на разпределение по размер на частиците. На 2.11. относителният принос на малките частици към екстинкцията е увеличен, но в концентрацията не се наблюдава особеност, което може да се получи, ако увеличеният брой на частиците компенсира (въпреки малката маса на отделните частици) техния принос към общата маса. За илюстрация нека споменем, че една сферична частица с радиус 0.5  $\mu\text{m}$  (с хипотетична плътност от 1  $\text{g}/\text{cm}^3$ ) има маса  $5.2 \cdot 10^{-19}$   $\mu\text{g}$ , т.е за концентрация от 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  са необходими  $9.8 \cdot 10^{18}$  частици. Общата разсейваща и поглъщаща площ на тези частици е  $7.55 \cdot 10^{10}$   $\text{cm}^2$  и ако си представим една единствена частица с такова сечение, то тя ще има радиус 1.5 km и ще има тегло  $1.56 \cdot 10^{10}$  тона. Това сравнение на екстремни по размер частици демонстрира възможността за запазване на концентрацията на частиците (тегло/обем), променяйки по подходящ начин функцията на разпределение по размер. Таблица 1 показва по-реалистично тази зависимост, разглеждайки три типични по размер частици и съответното сечение и тегло на отделната частица, броя на частиците от съответния размер, които са необходими за да дадат обща маса 5  $\mu\text{g}$ , а в последната колона е общото сечение на частиците, които дават еднаквата обща маса за различните размери. Очевидно е, че при една и съща обща маса, общото сечение намалява около 1.5 пъти, докато общия брой частици е намалял почти 5 пъти, когато размерът се увеличава от 0.3  $\mu\text{m}$  до 0.5  $\mu\text{m}$ .

Радиус Cm	Сечение $\text{cm}^2$	Маса g	Брой частици за конц. 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Общо сечение, $\text{cm}^2$
$3.0\text{e-}5 = 0.3 \mu\text{m}$	$2.8\text{e-}9$	$1.13\text{e-}13$	$4.95\text{e+}19$	$1.40\text{e+}11$
$4.0\text{e-}5 = 0.4 \mu\text{m}$	$4.0\text{e-}5$	$2.68\text{e-}13$	$2.09\text{e+}19$	$1.05\text{e+}11$
$5.0\text{e-}5 = 0.5 \mu\text{m}$	$7.9\text{e-}9$	$5.24\text{e-}13$	$1.07\text{e+}19$	$0.84\text{e+}11$

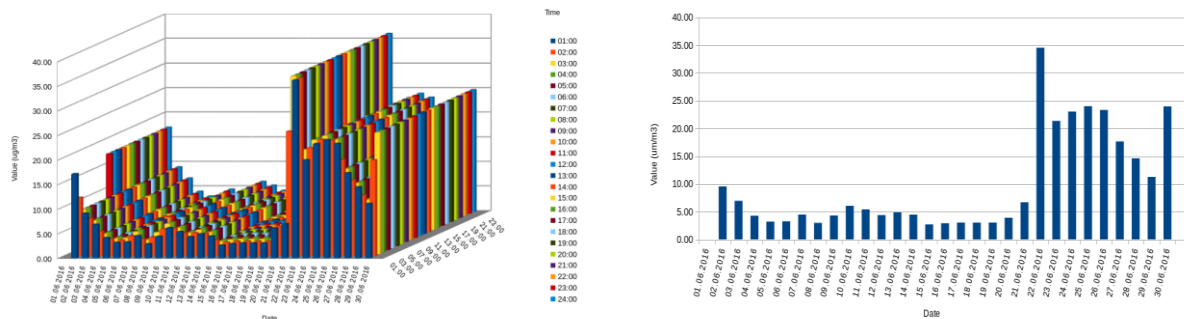
Таблица 1. Връзка между размер, разсейваща площ на една частица, тегло на една частица, брой частици с еднаква обща маса 5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  и обща разсейваща площ (сечение).

На 6 март 2016 г., фигура 12, ситуацията е обърната, коефициентът  $\alpha = -0.179$  сочи доминиращ принос на частици по-големи от 1  $\mu\text{m}$ . Не е възможно да се каже къде е горната граница на размера на тези частици, тъй като липсват наблюдения на екстинкцията в инфрачервения. В същото време данните от КФС „Рожен“, представени на фигура 14, показват един локален минимум на концентрацията на прахови частици. Причина за тези разлики би могла да се търси в обилието на частици с размери по-малки, но близки до 10  $\mu\text{m}$ . Ако броят на тези частици, които са почти на три порядъка по-тежки от 1 микронните частици, е намалял след първите дни на м. март, когато се наблюдават високи концентрации, това може да обясни локалния минимум на 6 март, без това да влезе в противоречие на резултата от измерения принос на аерозолната

екстинкция. Ако в бъдеще има данни за концентрацията на частици с размери по-малки от  $2.5 \mu\text{m}$ , това ще даде възможност за по-категорични изводи.



Фигура 14. Концентрация на фините прахови частици през месец март 2016 г. Ляво: по дни и часове. Дясно: Средни стойности за съответните дни.

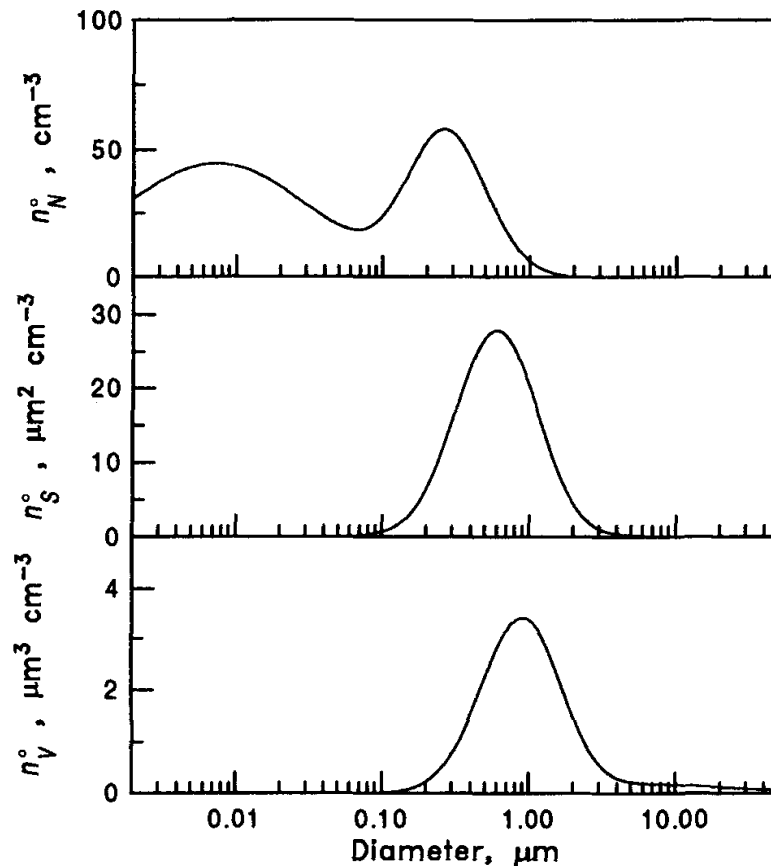


Фигура 15. Като фигура 14, но за месец юни 2016 г.

Ситуацията с измерванията на 28 май 2016 г., представени на фигура 13, е доста подобна 11 ноември 2015 г. Отново се наблюдава значителен принос на малките частици, степеният показател е  $= -4.147$ . Тъй като за м. май няма данни от КФС „Рожен“, направихме сравнение с данните от началото на м. юни, представени на фигура 15. В този период не се наблюдават особености в концентрацията на фините прахови частици в приземния слой. Това означава, че причината за доминиращия принос на прахови частици с размери по-малки от  $0.5 \mu\text{m}$  трябва да се търси на по-големи височини в атмосферата. Така например в средната и горната тропосфера, над облаците, съществен принос имат свободните аерозолни частици. На фигура 16 са показани броя, сечението и обема на тропосферните частици в единица обем. Въпреки че концентрацията на броя на тропосферните частици се характеризира с бимодално разпределение, с максимуми около  $0.01 \mu\text{m}$  и  $0.3 \mu\text{m}$ , разпределението на сеченията е с един максимум около  $0.6 \mu\text{m}$ , а на обемите (които имат пряка връзка с теглото) -  $0.9 \mu\text{m} - 1.0 \mu\text{m}$ . Тъй като поглъщането и разсейването на светлината са пропорционални на геометричното сечение на частиците и тъй като астрономическите детектори са най-



чувствителни в диапазона около  $0.6 \mu\text{m}$ , приносят на свободните аерозолни частици в този диапазон е съществен и се регистрира с висока точност.

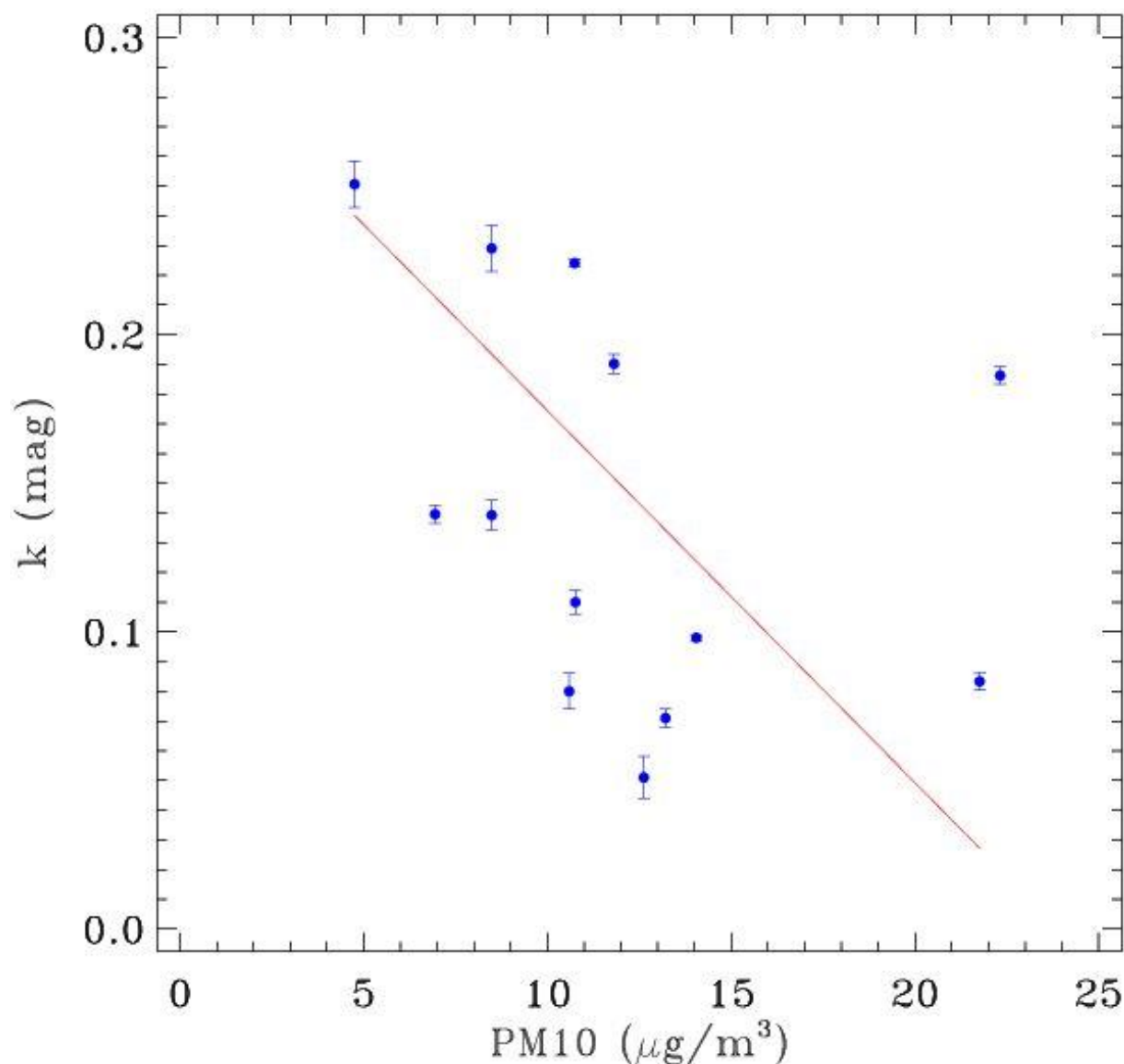


Фигура 16: Типична зависимост от размера на броя частици, тяхното геометрично сечение и обемно разпределение на тропосферни частици, съответно горе, в средата и долу. (по Atmospheric Chemistry and Physics, 2<sup>nd</sup> ed. – J. Seinfeld, S. Pandis, Wiley 2006).

Както видяхме от представените по-горе наши измервания, от тяхното сравнение с данните от КФС „Рожен и от данни за аерозолните частици, частиците с размери от порядъка на дължините на вълните, при които са направени астрономическите измервания, т.е. субмикронни частици, имат съществен принос към аерозолната екстинкция. Този принос е относително по-голям за късовълновата част на спектъра, когато в разпределението на частиците по размер доминират частици по-малки от  $0.5 \mu\text{m}$ . Наличието на такива частици е типично за праховата компонента на кометите, които са източник на метеорите. По най-груби оценки на специалисти в областта на метеорната астрономия системният приток на метеорна материя в земната атмосфера варира между 3 и 50 000 тона за денонощие! Метеорните частици са ключов фактор за баланса между загуба на маса на Земята (поради изпаренията на атоми и молекули от земната атмосфера) и приток на материя (постъпваща чрез попадащите върху нея метеорни частици). Това е само едно от многото доказателства, че екосистемата на Земята не може да се разглежда изолирано от околопланетното пространство и близкия Космос.

### Възможна антикорелация между концентрацията на фини прахови частици в приземния атмосферен слой и коефициента на екстинкция

За изследване на зависимостта на коефициента на екстинкция от концентрацията на фините прахови частици (с размер  $< 10 \mu m$ ,  $PM10$ ) в приземния атмосферен слой ние използвахме коефициентите на екстинкция,  $k$ , определени с телескопите на НАО Рожен във филтър  $R$  за 12, предимно летни нощи за периода юни 2012 – август 2013.



Фигура 17: Зависимост на екстинкцията от концентрацията на фини прахови частици.

Използваният наблюдателен материал е получен по програми за повърхностна фотометрия на Сийфъртови галактики и целonoщен фотометричен патрул на квазари. Използвани са стандартните методики за обработка и фотометрия на наблюденията и за определяне на  $k$ . Така получените коефициенти на екстинкция бяха корелирани със стойностите на  $PM10$ , взети за съответните дати от WWW архива на КФС Рожен. Резултатите са представени на фигура 17 и показват наличието на антикорелация между коефициента на екстинкция и величината  $PM10$ . Коефициентът на корелация е  $-0.6$ . При неговото изчисление, както и при изчислението на окончателната линейна апроксимация е използвана двустъпкова итерация. При първата стъпка е построена

линейна апроксимация на данните като точката с най-голямо отклонение от нея е премахната и не участва във втората итерация.

Така получената антикорелация може да се обясни като вземем предвид факта, че коефициентът на екстинкция е интегрална величина, т.е. той отразява взаимодействието на светлината с всички слоеве на атмосферата. Когато фините прахови частици са „разхвърляни“ из различните по височина слоеве на атмосферата (напр. от пренос на въздушни маси, турбуленция и др.) те дават по-голям принос към поглъщането на светлината в горните слоеве на атмосферата и имат ниска концентрация в приземния слой, достъпен за КФС. Когато атмосферата се успокои, частиците се „утаяват“, повишава се тяхната концентрация в приземния слой, а тяхното влияние върху разпространението на светлината в горните атмосферни слоеве намалява. Разбира се това е един груб модел, базиращ се на представената антикорелация. Значителното увеличаване броя ноци с определена екстинкция ще потвърди (или отхвърли) получената антикорелация. Би било полезно също така да се построят подобни корелации в различни филтри и за различни сезони, а също така да се свържат с атмосферната циркулация над региона. За задълбоченото изследване на физическите процеси, водещи до появата на подобна антикорелация трябва да получим отговори на следните въпроси: (1) Каква е типичната височина, на която фините частици идват над нас?; (2) Какъв е приносът на фините частици към екстинкцията?; (3) Колко време им е необходимо за да паднат до земната повърхност, където става измерването от КФС Рожен.

## Влияние на слънчевата активност върху концентрациите на азотни окиси в земната атмосфера

### Увод

Азотните окиси ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) и производните им съединения спадат към т.нар. “малки компоненти” в земната атмосфера. Поради тяхното токсичното действие, техните концентрации са сред основните параметри, които са обект на екологичен мониторинг на въздуха. От друга страна азотните окиси играят важна роля в химическия баланс на стратосферата и мезосферата. Увеличеното присъствие на азотни окиси и техните производни води до редукция на съдържанието на озон в стратосферата и мезосферата. Поради това, техните концентрации са от решаващо значение за процесите, свързани с изтъняването и възстановяването на озоновия слой, което е тясно свързано с човешкото здраве и екологичните ефекти (Vitousek et al., 1997; U.S. EPA, 1993).

Основните източници на формиране на азотни окиси в земната атмосфера са два: естествени (природни) и антропогенни. Антропогенни източници на азотните окиси са автомобилният и въздушният транспорт, горивно- и взривно-свързаните технологии и други браншове на индустрията (Vitousek et al., 1997; U.S. EPA, 2003).

Естествените източници на азотни окиси се делят на два основни класа: биогеосферни и космически. Геосферните източници, отговорни за формирането на азотни окиси в ниската атмосфера, са различни процеси на изветряне и изпарение, както и гръмотевичната активност в атмосферата. Азотните окиси се формират по време на гръмотевични бури в резултат на екстремалното нагряване причинено от светкавиците, което води до разцепване на азотните молекули (Legrand et al., 1989). Освен това, стратосферният азотен окис ( $\text{NO}$ ) се формира главно чрез дисоциацията на азотния диоксид ( $\text{NO}_2$ ), който е страничен продукт от азотния биологичен цикъл (Levine et al., 1984). Биологичният произход на  $\text{NO}_2$ , в този случай, обезпечава обширен и относително постоянен източник на азотни окиси в атмосферата (Jackman et al. 1980).

Основните космически фактори, водещи до образуването на азотни окиси в мезосферата и стратосферата са галактичните космически лъчи (ГКЛ) и слънчевата активност (СА). Галактични космически лъчи, идващи от далечния космос са съставено основно от протони с енергии от няколко 100 MeV и достигайко почти до 1 EeV ( $10^{18}$ ) Енергията на частиците в ГКЛ е толкова голяма, че те проникват в атмосферата на всички географски ширини, достигайки до стратосферата и тропосферата, а понякога и до земната повърхност. Областта на мезосферата и долната термосфера не се повлиява от ГКЛ, тъй като енергията на потока на ГКЛ е прекалено малка ( $\sim 10-9$  W/cm<sup>2</sup>) и само вторичните частици, предизвикани от ГКЛ, чиято енергия на потока е доста голяма, продължават надолу към повърхността. Впреки това, ГКЛ определено имат важен принос към атмосферната йонизация. Отчасти, ГКЛ са в състояние да проникнат много по-дълбоко в атмосферата, отколкото слънчевото йонизиращо лъчение, поради което те са доминиращия йонизационен процес във височините под 60 км (e.g. Calisto et al., 2011). Важно е да се отбележи, че изменението на потока на ГКЛ антикорелира с нивото на слънчевата активност.

Проявите на СА, които са от решаващо значение за формирането на азотни окиси в земната атмосфера са повишените слънчеви ултравиолетови и рентгенови излъчвания, както и изхвърлянето на слънчеви енергетични частици (СЕЧ), такива като протони, електрони и тежки йони (Sinnhuber et al., 2012). Източници на гореспоменатите слънчеви фактори са рентгеновите и особено протонните слънчеви избухвания. В процеса на мощните слънчеви избухвания с рентгенов клас M5 или по-висок (Komitov et al., 2016) се генерират не само голямо количество рентгенова и ултравиолетова радиация, както и слънчеви протони с висока енергия ( $E > 10$  MeV). Изхвърлянето на високо енергетични протони от Слънцето се наричат “слънчеви протонни събития” (СПС), които продължават до няколко дни. Тези събития възникват, когато

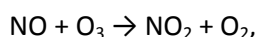
протони в слънчевата плазма се ускоряват до високи енергии (до 500 MeV), или близо до Слънцето по време на мощни рентгенови избухвания или в междупланетното пространство чрез ударна вълна асоциирана с изхвърляне на коронална маса (ИКМ). Ако едно рентгеново избухване е изключително силно, то може да причини ИКМ. Честотата на възникване на рентгеновите избухвания може да се изменя от няколко на ден, когато СА е в максималната фаза до по-малко от едно на седмица, когато СА е в минимална фаза (Gosling, 1993).

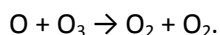
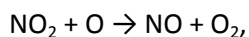
При мощните слънчеви избухвания, наричани често протонни избухвания или още “свръхизбухвания”, ускорените протони могат да придобият високи енергии, при които те могат да проникнат по-дълбоко в земната атмосфера (Jackman et al., 2000, 2008). По време на свръхизбухванията СПС са особено мощни. За тях е характерно нарастването на потока на частиците с особено висока енергия ( $E > 500$  MeV), които са в състояние да достигат до земната повърхност. В резултат на това възниква естествено покачване на приземния радиационен фон (GLE- Ground Level Enhancement). От 28 февруари 1942 г., когато е регистрирано първото подобно събитие, до края на месец май 2013 г. общия брой GLE- явления е 68. При най мощните СПС сумарната енергия на навлизащите в земната атмосфера частици е съпоставима със съответната енергия на ГКЛ, но в рамките на цял един 11-годишен слънчев цикъл (Smart and Shea, 2009).

Много изследвания са посветени на въздействието на СПС върху земната атмосфера и нарастването на концентрациите на азотни окиси в стратосферата и мезосферата на Земята, особено над полярните райони в продължение на няколко седмици след силни слънчеви изригвания, съпроводени с протонни ерупции в периода 2003-2005 година съобщават много автори (Rinsland et al. 2005, Serrala et al. 2007, Jackman et al. 2011). Увеличението на NO<sub>2</sub> след СЕЧ-избухвания достига до няколко десетки пъти спрямо средностатистическите съдържания на тази компонента в земната атмосфера (Jackman et al. 2011). В своята работа авторите са изследвали ефекта от двете силни слънчеви избухвания на 16 и 20 януари 2005 г. въз основа както на преки наблюдателни данни, така и на числени модели. Авторите показват също, че процесът на интензивно взаимодействие на СЕЧ-потока с атмосферата е обхванал областта над 20-25 км височина над земната повърхност, а максимумът на образуване на азотни окиси и по-специално на NO<sub>2</sub> е на около 70 км. Освен това е показано, че главна роля играят слънчевите протони в енергетичния интервал между 10 и 300 MeV. Ролята на протоните с енергия  $> 300$  MeV, т.е. тези които причиняват GLE-събитията е незначителна за образуването на азотни окиси. Увеличението на концентрациите на азотните окиси е съпроводено с разрушаване на озона в полярната стратосфера и мезосфера.

Прониквайки в земната атмосфера, слънчевите енергетични протони (СЕП) водят до промени в нейния химически състав чрез процеси на йонизация, дисоциация, дисициативна йонизация и възбуждане. Някои от големите СПС причиняват значими промени в химическите съставки, такива като NO<sub>x</sub> (остатъчни хидрооксиди), NO<sub>x</sub> (остатъчни нитрооксиди) и озон (Jackman et al., 2009). От решаващо значение за ендотермичните реакции, отговорни за продукцията на NO<sub>x</sub> в атмосферата, са СПС, чийто източници са рентгеновите избухвания от клас  $\geq M5$  (Jackman and McPeters 1985). Тъй като, СПС въздействат радиационно на активния озон, чрез изчисления бе показано, че те причиняват температурни и някои динамични промени в средната атмосфера (Jackman et al., 1995; Krivolutsky et al., 2006; Jackman et al., 2007). В зависимост от енергийния спектър на слънчевите протони, тяхната най-голяма степен на йонизация може да бъде установена в мезосферата, в диапазона 50-80 км (Calisto, 2011).

СПС индуцираните NO<sub>x</sub> съставки са относително късоживущи (приблизителни дни), които водят до разрушаването на озона в горната стратосфера и мезосферата, където налягането е под 2 hPa. И късоживущото и дългоживущото каталитично разрушаване на озона се предизвиква от СПС индуциран NO<sub>x</sub> в ниската мезосфера и стратосферата чрез добре познатия цикъл на озонови загуби (Jackman et al., 2008):





Крайният резултат е “остатъчен азот”, който представлява комплекс от нитрооксидни радикали означаван с  $\text{NO}_y$ , а в частният случай на  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_2$  като  $\text{NO}_x$  ( $\text{NO} + \text{NO}_2$ ). Част от  $\text{NO}_x$  се транспортира надолу в тропосферата, след което тя се извалява към земната повърхност за около 6 седмици.

Предмет на настоящото ни изследване е връзката между слънчевите избухвания, като източници на високоенергетични протони и концентрациите на  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_x$  по данни от фоновата автоматична станция в НАО-Рожен за периода от началото на 2013 г. до средата на 2016 г. Целите на изследването са няколко, отнасящи се до най-важните аспекти на връзката между СЕП и повишените нива на азотните окиси.

1. Определяне на статистическата достоверност на връзката между потоците на СЕП, проникващи в земната атмосфера и концентрациите на азотните окиси регистрирани във фоновата станция. Важна предпоставка за достоверност на оценката е, че фоновата станция в НАО-Рожен е достатъчно отдалечена от източниците на антропогенно замърсяване.

2. Определяне на времето на закъснение между формирането на азотните окиси в средната атмосфера и регистрирането на техните концентрации във фоновата станция, при установена достоверна връзка между СЕП и фоновите концентрации на азотните окиси.

3. Определяне на процесите на пренос на азотните окиси между средната атмосфера и земната повърхност, където се регистрират. При решаването на тази задача трябва да се направи оценка на тази част от  $\text{NO}_x$  достигащи до земната повърхност, които се формират в средната атмосфера приблизително над пункта за регистриране, както и каква част са резултат от пренос на  $\text{NO}_x$  формиране над други райони на Земята. За последните се има предвид полярните области, където интензивността на тяхното образуване по време на СЕП е най-голяма.

4. Статистическо потвърждаване на достатъчно силна установена връзка, която би могла да се използват за моделиране на процесите и съответно за прогнози. С други думи, доколко е възможно по информацията за дадено слънчево протонно избухване да се направи прогноза за очаквано покачване на фоновите концентрации на  $\text{NO}_x$ , обект на регистриране в дадена фонова станция.

В изследването бяха взети под внимание предхождащите данни за азотните окиси (2004-2012 г.), както и резултатите от тяхното изследване (Komitov et al., 2016).

### **Данни и методи на анализ**

За решаването на описаните по-горе изследователски задачи бяха използвани среднодневните стойности на концентрациите [ $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ] на азотни окиси ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ) от автоматичната станция за регистриране на фоновите съдържание на атмосферните замърсители, разположена в Националната астрономическа обсерватория “Рожен” (Фиг. 1, в уводната част) за периода от началото на 2013 г. до средата на 2016 г. Станцията се намира на надморска височина приблизително 1760 метра. В близките 60-70 км около нея няма източници на силно индустриално замърсяване.

Времевият ред на данните обхваща 1297 дена. За съжаление, както и в предишния ред на данни (2004-2012 г.), в реда има много “прозорци“ с липсващи данни. Общата дължина на всички “прозорци“ възлиза на 346 дена, т.е. 27% от изследвания 3.5 годишен период. За сравнение, в реда на предишните данни, покриващ 9 години, общата дължина на прозорците е 302 дена или 16% от дължината на времевия ред, който при това е почти три пъти по-дълъг от сегашния ред. Най-големият прозорец е половин година, между 25 юни и 22 декември 2014 г. Има два случая на почти двумесечни прозорци – 57 дена между 21 май и 16 юли 2013 г. и 56 дена между

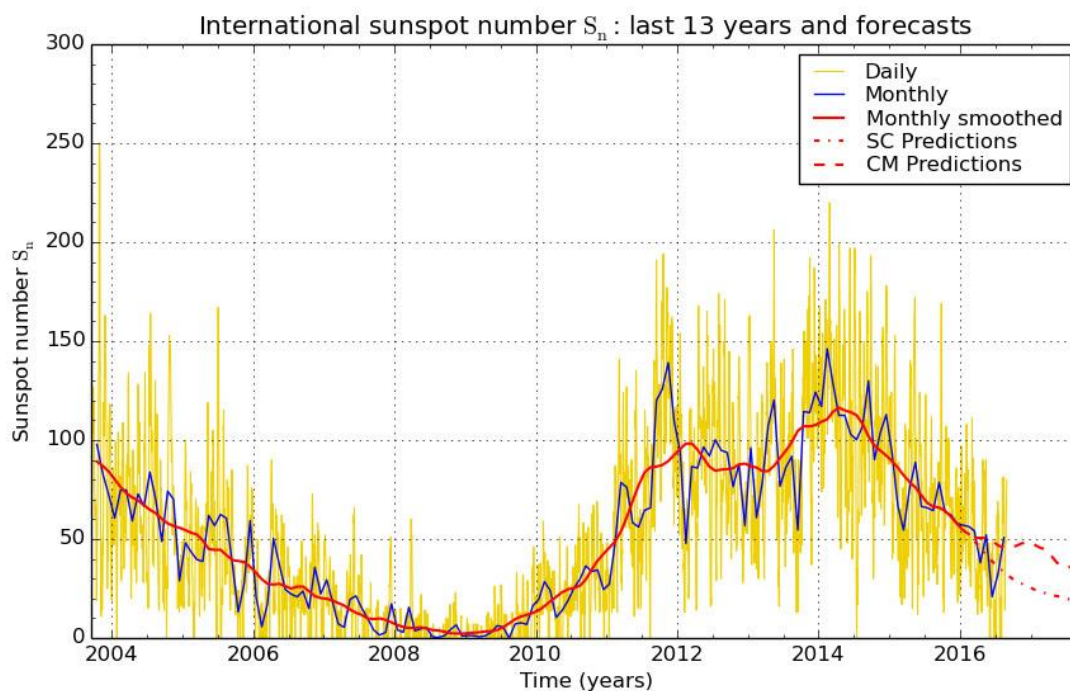
12 септември и 6 ноември 2015 г. Един прозорец от 37 дена има между 26 април и 1 юни 2016 г. Има 9 случая на малки прозорци от 1 до 3 дена, но те не са проблем за съвременните статистически инструменти. Поради наличието на тези пропуски на данни, пълноценният статистически анализ е значително затруднен. Това особено силно важи за анализа на времевите редове на среднодневните стойности на концентрациите на азотните окиси ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ), които са с постоянна стъпка от 1 денонощие. Изпълнението на целите на това изследване е силно затруднено, тъй като за изпълнението на отделните задачи е необходимо прилагане на серия статистически методи за прецизен анализ – изследване на времевите редове за трендове и цикли, търсене на връзки със слънчеви, геофизични и метеорологични фактори, включително, както и изследване на отместени във времето връзки с крос-корелационен анализ, което, всъщност е една от най-важните задачи в нашето изследване. Методите на статистически анализ са подробно описани в предишното ни изследване (Komitov et al., 2016).

За частично решаване на описания по-горе проблем, новите данни бяха добавени към предишните (2004-2012 г.), резултатите от изследванията на които са публикувани в *Bulgarian Astronomical Journal* (Komitov et al., 2016). Анализът на предишните редове на азотните окиси показва, че втората половина на редовете (2009-2012 г.) се характеризира с по-голяма хомогенност, т.е. по-малко пропуски на данни и по-малки прозорци. По тази причина само тази част от предишните данни бе прибавена към новите. По този начин, времевите редове на азотните окиси станаха съизмерими с дължината на 11-годишния слънчев цикъл, което е предпоставка за прилагането на някои от статистическите методи.

За същия период от време бяха привлечени и данни за рентгеновите избухвания и протонните избухвания. Данните за потока на слънчевите протони с висока енергия ( $E \geq 10 \text{ MeV}$ ), измервани от геостационарните спътници GOES-11, GOES-13S, и GOES-15 имат свободен достъп от архива на Центъра за прогнози на космическото време в Боулдър (Колорадо, САЩ) (<http://www.swpc.noaa.gov/Data/index.html#indices>). За целите на изследването, стойностите на сумарните дневни потоци са дадени за два енергийни диапазона ( $E \geq 10 \text{ MeV}$  и  $E \geq 100 \text{ MeV}$ ). Тъй като потоците на СЕЧ се качват с до няколко порядъка по време на слънчевите протонни ерупции, ние използваме на всички етапи в това изследване не самите тях, а техните десетични логаритми.

## Резултати

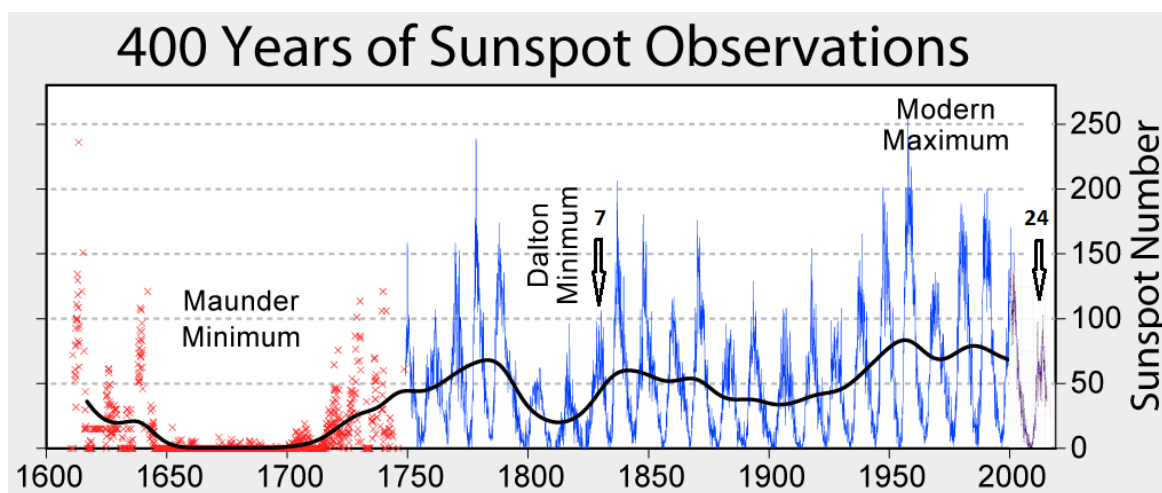
Времевите редове на азотните окиси ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_x$ ), използвани в изследването започват на 15 октомври 2004 г. и завършват на 20 юли 2016 г. Тяхната продължителност е 12 години и 7 месеца. Следователно, времевите редове на азотните окиси са малко по-дълги от среднестатистическата продължителност (11.1 г.) на 11-годишния цикъл на петнообразователната дейност на Слънцето. Във Фиг. 2 е представено цикличното изменение на дневните, месечните и изгладените месечни брой на слънчевите петна. Представен е също и прогнозирания брой на петната за 12 месеца напред.



Фиг. 2 Международният брой на слънчевите петна през последните 13 години и прогнозираните им стойности 12 месеца напред. Източник: *WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels*

Цикличното поведение на петната, т.е. нивото на слънчева активност обхваща период от средата на низходящата фаза на 23-я цикъл и почти целия 24-ти цикъл. Удължените редове на азотните окиси почти покрива 24-я слънчев цикъл, започвайки от минимума на СА между 23-я и 24-я цикъл и достигайки до прогнозираните стойности на 24-я цикъл към края на низходящата му фаза. 24-я цикъл е двувърхов, т.е. в епохата на максимума има два високи пика, разделени с т.нар. „яма“ на Гневишев. Новите данни за азотните окиси започват приблизителни от средата на „ямата“ на Гневишев. Такова препокриване прави изследователската задача изключително интересна. Причините за това са две. От една страна, 24-ят цикъл е изцяло обхванат, а от друга страна тази епоха на максимума му съвпада с дълбок минимум на вековото изменение на СА с 200-годишна цикличност. Поради това съвпадение максимумът на 24-я цикъл е изключително нисък, т.е. беден на мощни слънчеви избухвания. В това отношение, цикъл 24 доста подобен на последния от трите ниски цикли, означен с номер 7, попадащи в епохата на предишния подобен векови минимум (1790-1830 г.), наричан минимум на Далтон (Фиг. 3).

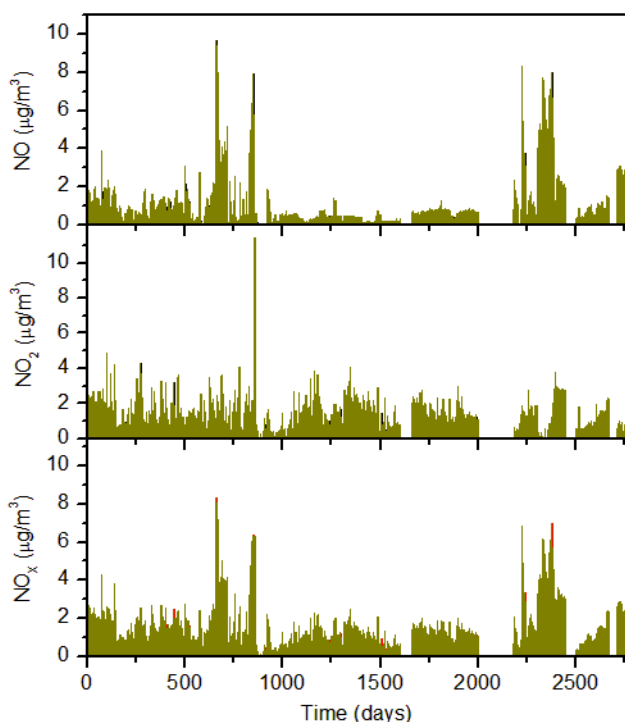




Фиг. 3 Дълговременно изменение на 11-годишната цикличност на броя на слънчевите петна

Тъй като измененията на нивото на СА и тези на ГКЛ антикорелират, т.е. на висока слънчева активност съответства слаб поток на ГКЛ и обратно, описаната по-горе ситуация предоставя безпрецедентната възможност за статистическо определяне на баланса между двата основни космически фактори при образуването на азотни окиси в земната атмосфера. От друга страна, ситуацията дава добра възможност приносът на ГКЛ за формирането на азотни окиси в атмосферата и техния пренос до повърхността на Земята да бъде изследван в детайли.

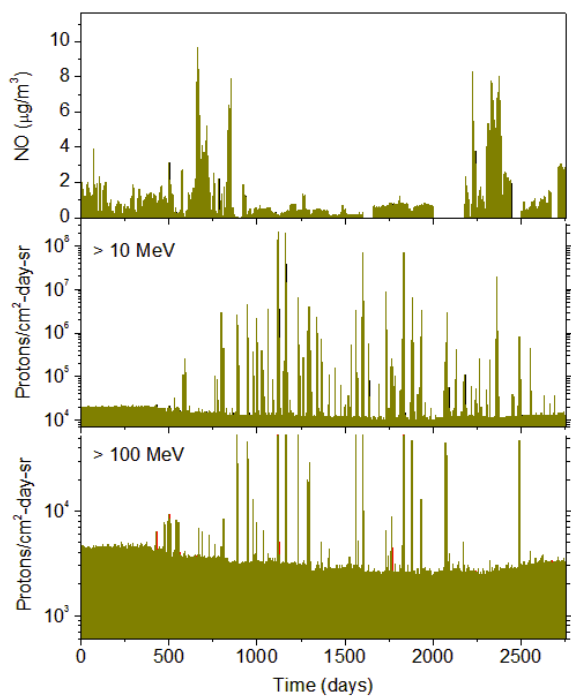
Изменението на концентрациите на азотните окиси ( $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_x$ ) са показани във Фиг. 4. В поведението на азотните окиси могат да се отделят две компоненти – ниска компонента с квази-природични повишавания на азотните окиси на фона на която се наблюдават пиковите компоненти. Квази-периодичните повишавания на ниската компонента се характеризират с бавно и постепенно повишаване на концентрациите до нисък локален максимум, след което концентрациите падат бавно почто до нулеви стойности. И трите времеви реда подсказват локален максимум в самото начало, т.е. в началото на 2009 г. Втори локален максимум се наблюдава между 120-я и 600-я ден (1 май 2009 г. – 23 август 2010 г.). Този локален максимум е по-добре изразен в редовете на  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_x$ , докато за  $\text{NO}_2$  той е по-неуверен, но за сметка на по-високата пикова активност, наложена върху него. Третият локален максимум е между 900-я и 1600-я ден (18 юни 2011 г. – 20 май 2013 г.). Този максимум добре се вижда в редовете на  $\text{NO}_2$  и  $\text{NO}_x$ , като и двата реда подсказват двувърховост на максимума, която е най-добре изразена в реда на  $\text{NO}_2$ . В реда на  $\text{NO}$  този максимум не се наблюдава. Много е вероятно между 1600-я и 2100-я ден (10 март 2011 г. – 1 октомври 2014 г.) да има трети максимум на азотните окиси, но поради двумесечния пропуск на данни след 1600-я ден и и особено поради половин годишния прозорец след 2000-я ден максимума е само загатнат. В края на редовете, особено тези на  $\text{NO}$  и  $\text{NO}_x$ , уверено е загатнат четвърти локален максимум.



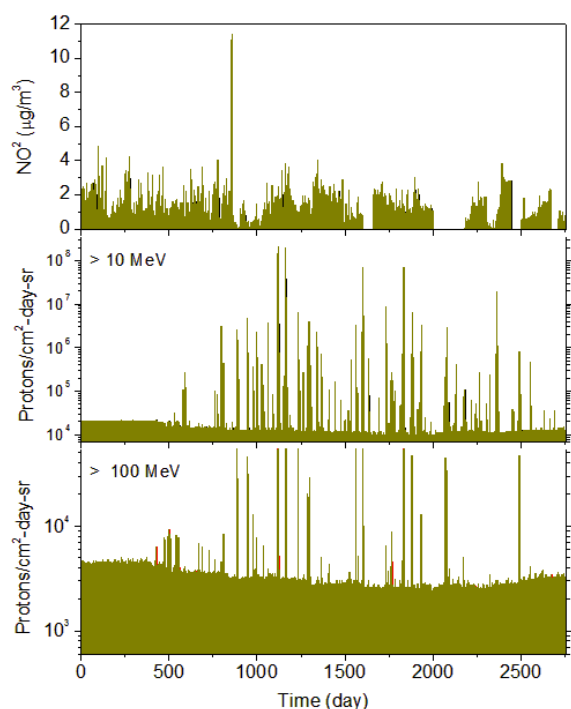
Фиг. 4 Поведение на концентрациите на NO, NO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> в периода от 2009 г. и 20 юли 2016 г. Началото на оста X е 1 януари 2009 г.

Ниската компонента в поведението на концентрациите на азотните окиси се изменя основно в диапазона 0-2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , докато пиковите компоненти достигат значимо по-високи стойности, т.е. значими повишавания на концентрациите. Редовете на NO и NO<sub>x</sub> показват по 4 доста сходни за двата реа пика. Първият от тях е около 700-я ден (1 декември 2010 г.). Пикът на NO (почти 10  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) е по-висок от този на NO<sub>x</sub>, който е малко над 8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . Вторият пик е около 830-я ден (10 април 2011г.) като отново пикът на NO е по-висок от този на NO<sub>x</sub>. Третият пик е около 2250-я ден (28 февруари 2015 г.). Четвъртият пик, около 2350-я ден (8 юни 2015г.), е по-широк спрямо предишните три пика и двувърхов, подсказвайки по-моцнен и продължителен процес на формиране на азотни окиси. При последните два пика отново е спазена тенденцията концентрациите на NO да са по-високи от тези на NO<sub>x</sub>.

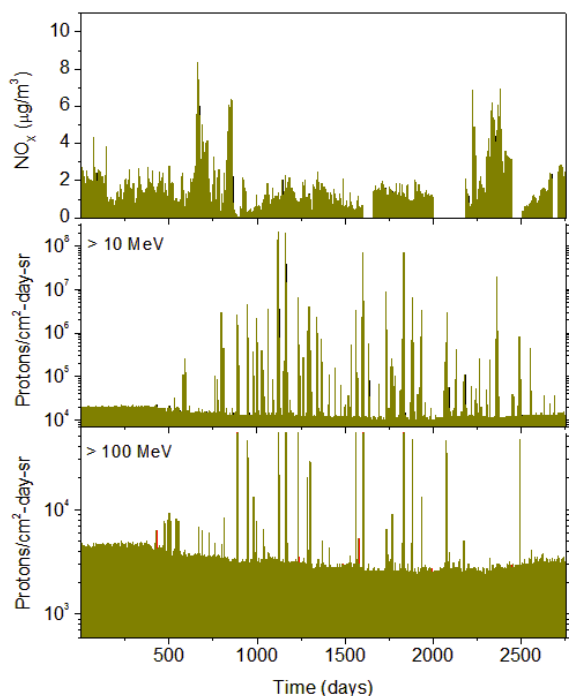
За изследване на връзката между концентрациите на NO, NO<sub>2</sub> и NO<sub>x</sub> и слънчевите енергетични протони с енергии по-големи от 10 MeV и 100 MeV ние анализирахме редовете на всеки един от азотните окиси съвместно с тези на СЕП (Фиг. 5, 6, и 7). Вземайки предвид опита на редица автори, както и нашия опит от изследването на предишните данни, ние фокусирахме вниманието си върху протонните събития предхождащи пиковите нараствания на азотните окиси. Двата първи пика в реда на NO се прехождат от група сравнително ниски, но тясно разположени около 500-я ден (15 май 2010 г.) на протоните с енергия над 100 MeV (Фиг. 5). Тези пикове предхождат първия пик на NO с 200 дена (около 7 месеца), докато втория пик се предхожда с 330 дена (почти 10 месеца).



Фиг. 5 Поведение на концентрациите на NO (горен панел) и интензивността на протонния поток с енергии над 10 MeV (среден панел) и 100 MeV (долен панел). Началото на оста X е 1 януари 2009 г.



Фиг. 6 Поведение на концентрациите на NO<sub>2</sub> (горен панел) и интензивността на протонния поток с енергии над 10 MeV (среден панел) и 100 MeV (долен панел). Началото на оста X е 1 януари 2009 г.



Фиг. 7 Поведение на концентрациите на NO<sub>x</sub> (горен панел) и интензивността на протонния поток с енергии над 10 MeV (среден панел) и 100 MeV (долен панел). Началото на оста X е 1 януари 2009 г.

Потокът на протоните с енергии над 10 MeV показва широк спектър от тесни, т.е. краткотрайни пикове. Многобройните пикове в реда на ниско енергетичните протони, за разлика от сравнително по-редките такива на протоните с енергия над 100 MeV, е логичен като се има предвид, че тези събития протичат в рамките на 24-я цикъл, който е един от най-ниските в наблюдателната история на слънчевата активност.

Первият пик в реда на NO се предхожда от нисък пик на протонния поток, отстоящ от него на около 100 дена (около 3 месеца), което подсказва възможен принос за повишаването на концентрацията на NO. Непосредствено преди втория пик на NO, на около 30 дена, се намира първият от значимите пикове на протонния поток. Най-вероятно той има принос при формирането на втория пик на NO. Интересно е да се отбележи, че пиковите стойности в потока на ниско енергетичните протони показват квази циклично поведение, което подсказва, че те по-скоро са тясно свързани с поведението на ниската компонента в реда на NO.

В поведението на концентрациите на NO<sub>2</sub> има един единствен пик (Фиг.6). Това е втория пик, наблюдаван в редовете на NO и NO<sub>x</sub>. Както в случая на NO, най-вероятно този пик е тясно свързан с първият значим пик на ниско енергетичния протонен поток. Освен това, както се вижда във Фиг. 6, връзката между квази цикличното поведение на пиковите стойности на ниско енергетичните протони и поведението на ниската компонента в реда NO<sub>2</sub> е по-убедително подсказана.

Поведението на концентрациите на NO<sub>x</sub> спрямо това на ниско- и високо енергетичните протонни потоци е показано във Фиг.7. Предвид силното сходство поведението на NO<sub>x</sub> с това на NO (Фиг.4), особено по отношение на пиковите компоненти, най-вероятно поведението на е модулирано от това на NO. По тази

причина, относно връзките между реда на NOx и редовете на протоните с енергии над 10 MeV и 100 MeV важат същите коментари, които бяха направени за реда на NO.

### **Дискусия и заключения**

Няколко са резултатите, които трябва да се подчертаят и коментират. Сходството между поведението на редовете на NO и NOx подсказва, че NO е преобладаващата сумарна част в NOx. Освен това, както бе показано по-горе, пиковите стойности на NO, т.е. завишените им концентрации, се асимицират с предхождащи пикове на протонния поток с енергии над 100 MeV. Вземайки предвид и фактът, че това протича по време на изключително ниският по активност 24-ти цикъл, може да се извода, че високо енергетичните слънчеви протони играят важна и основна роля за формирането на завишени нива на NO и съответно на NOx.

Поведението на концентрациите на NO<sub>2</sub> показват само един силнозначим пик, който се асоциира с пик на протоните с енергии над 10 MeV. Нискоенергетичните протони явно играят важна роля за ниската компонента в поведението на азотните окиси. Най-вероятно протоните с енергии над 10 MeV са източника на слабите повишавания на концентрациите на азотните окиси. Тези протонни потоци, от друга страна действат почти непрекъснато в целия изследван период от време (Фиг. 4, 5,6, 7).

Важен въпрос, свързан с ниското ниво на слънчевата активност по време на 24-я цикъл е важната роля на галактическите космически лъчи за промяната на атмосферната химия и в частност за формирането на азотни окиси. Потокът на ГКЛ антикорелира с нивото на СА и най-вероятно има съществен принос за образуването на азотни окиси по време на 24-я цикъл. Решаването на този въпрос ще бъде предмет на престоящите ни изследвания.

Важен аспект на изследването на редовете на азотните окиси е определянето на времето между формирането на азотните окиси в средната атмосфера и тяхното регистриране от фоновата автоматична станция на земната повърхност. Този аспект на изследването засега остава под въпрос, поради големите пропуски в редиците от данни. Тази причина използването на природограмен анализ ще дава резултати с ниска достоверност, а крос-корелационния анализ е просто неприложим. Възможност за решаването на този проблем или поне намаляването на прозорците до онзи размер, при който използването на рутинни интерполационни процедури няма да повлияе върху реалните тенденции в редовете. Това може да бъде направено чрез използването на данни от поне още една автоматична станция разположена на надморска височина 1000 м или повече. Предполагайки, че калибровката на датчиците за азотните окиси е стандартна за всички автоматични станции, надморската височина е единственото изискване.

Резултатите от тези изследвания могат да бъдат основа за правилната интерпретация на случаите с повишени концентрации на азотни окиси, давайки възможност за по-ясното и прецизно разграничаване на приносите както между двата естествените източника слънчевите избухвания или ГКЛ, така и между естествените източници и антропогенния фактор. Предвид късия период на непрекъснати редове на данните за азотните окиси, за да дадем категоричен отговор на въпроса как точно влияят слънчевите избухвания върху фоновите концентрации на азотните окиси са необходими устойчиви във времето изследвания на колкото се може по-хомогенни времеви редове от данни. Целта на такива изследвания е да се обхваща все по-голям период от време, който да покрива поне един цял 11-годишен слънчев

цикъл, например, до края на настоящия 24-ти слънчев цикъл, който ще бъде през 2018-2019 г.

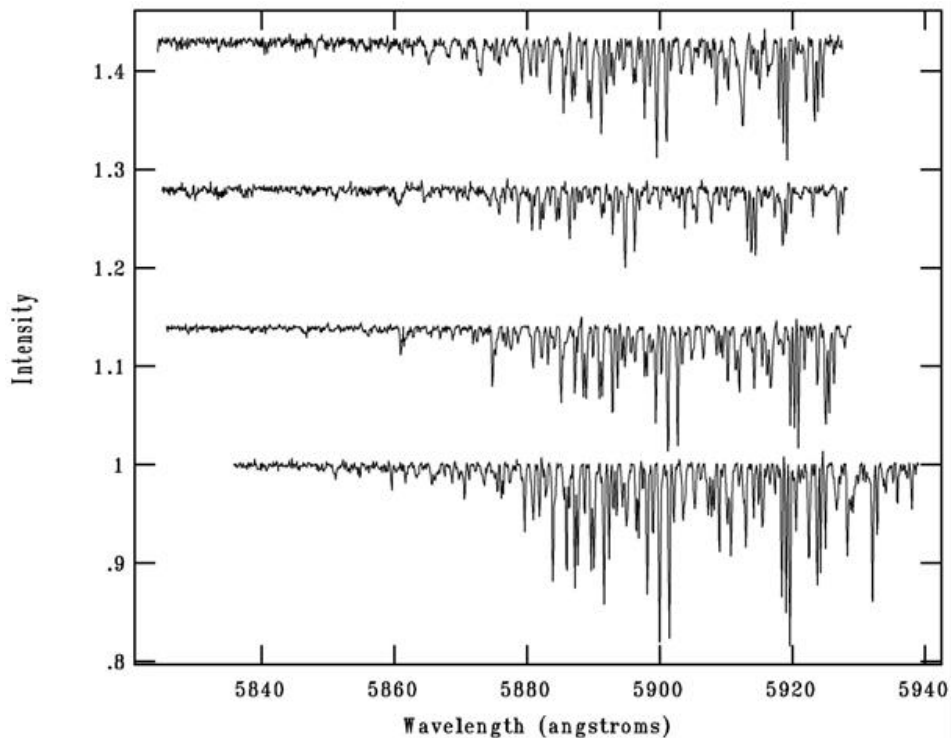
## Литература

- Jackman, C. H. and McPeters, R. D., 1985, The response of ozone to solar proton events during solar cycle 21: a theoretical interpretation, *J. Geophys. Res.*, **90**, 7955.
- Jackman, C. H., Cerniglia, M. C., Nielsen, J. E., Allen, D. J., Zawodny, J. M., McPeters, R. D., Douglass, A. R., Rosenfield, J. E., & Rood, R. B., 1995, Two-dimensional and three-dimensional model simulations, measurements, and interpretation of the influence of the October 1989 solar proton events on the middle atmosphere, *J. Geophys. Res.*, **100**, 11641.
- Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Garcia, R. R., Fleming, E. L., Labow, G. J., Randall, C. E., Loópez-Puertas, M., Funke, B., von Clarmann, T., & Stiller, G. P., 2008, Short- and medium-term atmospheric constituent effects of very large solar proton events, *Atmos. Chem. Phys.* **8**, 765.
- Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Garcia, R. R., Randall, C. E., Fleming, E. L., & Frith, S. M., 2009, Long-term middle atmospheric influence of very large solar proton events, *J. Geophys. Res.* **114**, 11304.
- Jackman, C. H., Marsh, D. R., Vitt, F. M., Roble, R. G., Randall, C. E.; Bernath, P. F.; Funke, B., López-Puertas, M., Versick, S., Stiller, G. P., Tylka, A. J., & Fleming, E. L., 2011, "Northern Hemisphere atmospheric influence of the solar proton events and ground level enhancement in January 2005", *Atmos. Chem. Phys.* **11**, 6153.
- Jackman, C. H., Roble R. G., & Fleming, E. L., 2007, Mesospheric dynamical changes induced by the solar proton events in October – November 2003, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L04812.
- Jackman, C.H., Fleming, E.L., & Vitt, F.M., 2000, Influence of extremely large solar proton events in a changing stratosphere, *J. Geophys. Res.*, **105**, 11659
- Jackman, C.H., Frederick J.E. & Stolarski R.S., 1980, Production of odd nitrogen in the stratosphere and mesosphere - An intercomparison of source strengths, , *J. Geophys. Res.*, **85**, 7495.
- Komitov, B., Dechev, M., Duchlev, P., 2016, Formation of nitrogen oxides in the Earth's atmosphere by solar proton flares, *BulgAJ*, **24**, 22.
- Krivolutsky, A. A., Klyuchnikova, A. V., Zakharov, G. R., Byushkova, T. Y., & Kuminov, A. A., 2006, Dynamical response of the middle atmosphere to solar proton event of July 2000: Three-dimensional model simulations, *Adv. Space Res.*, **37**, 1602.
- Legrand, M.R., Stordal, F., Isaksen I.S.A. & Rognerud, B., 1989, A model study of the stratospheric budget of odd nitrogen, including the effects of solar cycle variations, *Tellus*, **41B**, 413.
- Levine, J. S., Augustsson, T. R., Andersont, I. C., Hoell Jr. J. M., & Brewer, D. A., 1984, Tropospheric sources of NOx: Lightning and biology, *Atmospheric Environment* **18**, 1797.
- Rinsland, C. P., Boone, C., Nassar, R., Walker, K., Bernath, P., McConnell, J. C., Chiou, L., 2005, Atmospheric Chemistry Experiment (ACE) Arctic stratospheric measurements of NOx during February and March 2004: Impact of intense solar flares, *Geophys. Res. Lett.* **32**, L16S05.
- Seppala, A., Verronen, P. T., Clilverd, M. A., Randall, C. E., Tamminen, J., Sofieva, V., Backman, L., & Kyrölä, E., 2007, Arctic and Antarctic polar winter NOx and energetic particle precipitation in 2002–2006, *Geophys. Res. Lett.* **34**, L12810.
- Sinnhuber, M., Nieder, H., & Wieters, N., 2012, Energetic Particle Precipitation and the Chemistry of the Mesosphere/Lower Thermosphere, *Surv. Geophys.* **33**, 1281.
- Smart D.F & Shea M.A, 2009, Impulsive Nitrate Deposition Events in Polar Ice. The results of Solar Proton Events, Second International HEPPA Workshop on 6-8 October 2009, (<http://www.acd.ucar.edu/Events/Meetings/HEPPA/>)
- U.S. EPA. 2003, National air quality and emissions trends report-2003 special studies edition, EPA/454/R-03/005. Research Triangle Park, NC. <http://www.epa.gov/air/airtrends/aqtrnd03/>
- Vitousek, P. M., Aber, J. D., Howarth, R. W., Likens, G. E., Matson, P. A., Schindler, D. W., Schlesinger, W. H., & Tilman, D. G., 1997, Human Alteration of the Global Nitrogen Cycle: Sources and Consequences, *Ecological Applications* **7**, 737.

## Телуричните линии:

### източник на информация за състоянието на Земята атмосфера и въздуха

Алтернативен метод за изследване на състава на атмосферата предоставят спектрите на небесните тела, получавани с 2-метровия телескоп на НАО „Рожен“. Освен спектралните характеристики на изследвания обект те съдържат и така наречените телурични линии. Това са тесни абсорбционни линии, които се появяват в спектрите на небесните тела – звезди и галактики, в резултат от преминаването на светлината от тях през земната атмосфера. Телуричните линии по своята природа са преди всичко молекулни, защото главните компоненти на земната атмосфера, които са отговорни за тяхното образуване са преди всичко молекулите на водата, хидроксила (ОН-), въглеродния двуокис, кислорода, озона и азота. Изучаването на телуричните линии дава възможност да се получат данни за състава и моментното състояние на земната атмосфера, защото се образуват в най-плътните и слоеве. Известно е, че почти 99.9 процента от масата на атмосферата е съсредоточена на височина до 100 километра. Понеже земната атмосфера е сложна смес от няколко газа и аерозоли, изучаването на поведението на телуричните линии в различни периоди от време позволява да се съберат и анализират данни за наличните връзки между физическите характеристики на отделните компоненти на атмосферата, в частност и тези измервани от КФС „Рожен“. Направените от нас първи изследвания показаха, че поведението на телуричните линии, получени в спектри на звезди с 2-м телескоп на НАО Рожен, е изключително сложно и не се поддава на моделиране с прости математически модели. Със скорошното въвеждане на новия ешелен спектрограф, захранван от 2-м телескоп, броят на телуричните линии достъпни за анализ в единичен звезден спектър ще нарастна няколко пъти. Това даде възможност да се получат нови, по-достоверни данни за състоянието на атмосферата през последните няколко години.

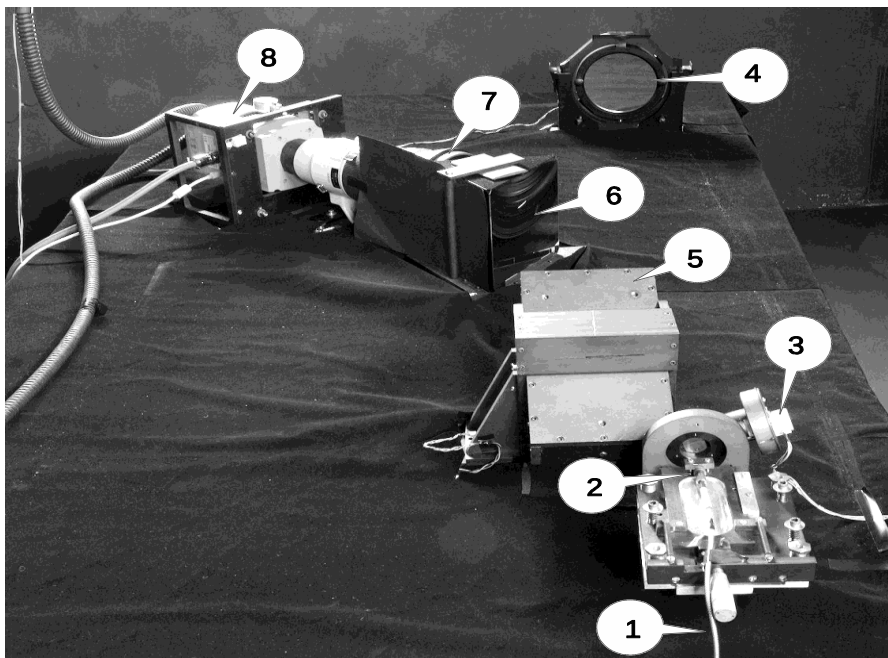


Фигура 1: Телурични линии в диапазона 5820 – 5940 Ангстрьом.

В частност високата разделителна способност и високата точност на измерване са валидни и за телуричните линии, които се наблюдават в червения и инфрачервения

диапазон на звездните спектри. Тези линии съдържат богата информация за съдържанието на различни молекули и радикали в атмосферата. Примери на такива линии за диапазона 5820 – 5940 Ангстрьом са представени на фигура 1. На тази фигура са показани телуричните линии около натриевия дублет при 5889.950 и 5895.924. Тези спектри са получени с куде-спектрографа на 2-метровия телескоп и са нормирани към 1.0. Горните три спектъра са отместени по интензитет за да може да се прави сравнение между спектрите, получени в различни моменти. При възможност за получаване на спектри в по-голям спектрален диапазон броят на телуричните абсорбционни линии става достатъчно голям за получаване на статистически достоверни резултати за състоянието на атмосферата.

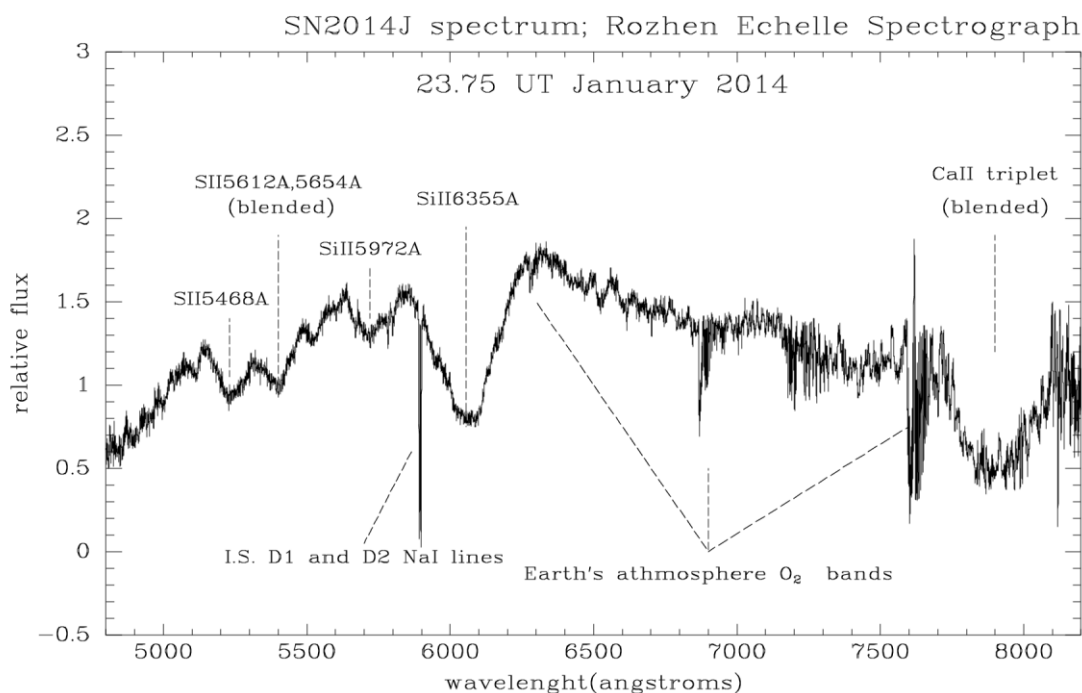
Новият, високоефективен, спектрограф, тип ешеле (фигура 2) бе проектиран и изграден в НАО Рожен в края на 2013 г. Въвеждането му в редовна експлоатация изискваше редица тестове и юстировки, които продължиха през следващите 2+ години. Днес спектрографът се използва интензивно за изследване на многообразие от астрономически обекти. Този инструмент се характеризира с висока разделителна способност (40000), което гарантира висока точност на измерените параметри на спектралните линии. Високата точност на спектрографа е постигната чрез няколко важни мерки, заложи в неговия дизайн. Първо, спектрографът е монтиран върху оптическа маса, лежаща върху активни крака, които са под постоянно стабилизирано налягане и „гасят“ всички вибрации. Второ, той е монтиран в термостабилизирано помещение, и е покрит с допълнителен термоизолиран корпус, с което е гарантирана висока температурна стабилност (температурният мониторинг показва, че флукуациите са по-малки от 0.9°C. Трето, спектрографът се захранва със светлина от фокуса на 2-метровия телескоп чрез световод с дължина 30 метра и ядро 50 µm. По този начин спектрографът е напълно изолиран от движещите се телескоп и купол по време на получаване на спектрите.



Фигура 2. Ешелният спектрограф на 2-метровия телескоп на НАО „Рожен“. (1) изход на световода, който идва от фокуса на телескопа, (2) съгласуваща оптика, (3) процеп (дава възможност за по-висока разделителна способност, (4) колиматор, (5) ешелна решетка, (6) призма (крос-дисперсер), (7) обектив, (8) детектор – 2-мерна CCD матрица.



Възможност за регистриране на повече спектрални линии едновременно бе предоставена с въведения в експлоатация в края на 2013 г. спектрограф от тип ешеле, който регистрира в един кадър целия видим диапазон на електромагнитния спектър, от 3900 до 9200 Ангстрьом. Илюстрация за тези възможности дава представения на фиг. 3 спектър на свръхновата звезда SN2004J, която избухна през януари 2014 г. В спектъра са отбелязани характерните телурични абсорбции на молекулата на кислорода, виждат се и голям брой абсорбции от водни молекули и производни на водата, като например хидроксил, ОН. Параметрите на всички тези линии могат да се използва за анализ на състоянието на атмосферата.

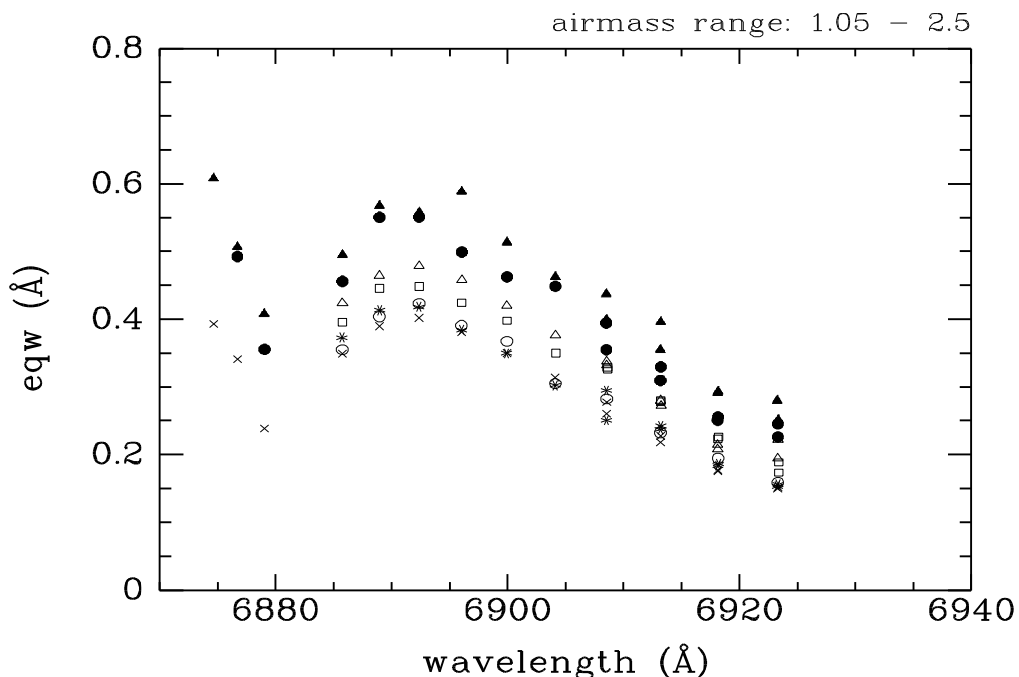


Фигура 3: Спектър на свръхновата звезда SN2014J, регистриран с новия спектрограф от тип ешеле на 2-метровия телескоп на НАО „Рожен“. Спектърът съдържа голям брой телурични линии - индикатори за състоянието на атмосферата.

Една възможност за количествена оценка на съдържанието на кислород в атмосферата предоставят линиите, образуващи Фраунхоферовите ивици, А и В, на кислородната молекула, O<sub>2</sub>, разпространяващи се в интервалите 758 – 770 nm и 687 – 693 nm. Измерванията на еквивалентните ширини на тези линии дават възможност да се определи съдържанието на кислород в атмосферния въздух. Теоретичните модели, които описват и предсказват глобални изменения в климата зависят силно от измерените съдържания на O<sub>2</sub> в различните екосистеми на Земята. В много от случаите на такива локални измервания се наблюдават силни флукутации в концентрацията на O<sub>2</sub>, което се дължи най-вероятно на малките пространствени размери, за които се отнася съответното измерване. Едно измерване в глобален мащаб би дало по реалистична картина за обилието на кислород в атмосферата. Уникална възможност за това дава измерването на еквивалентните ширини на линиите,

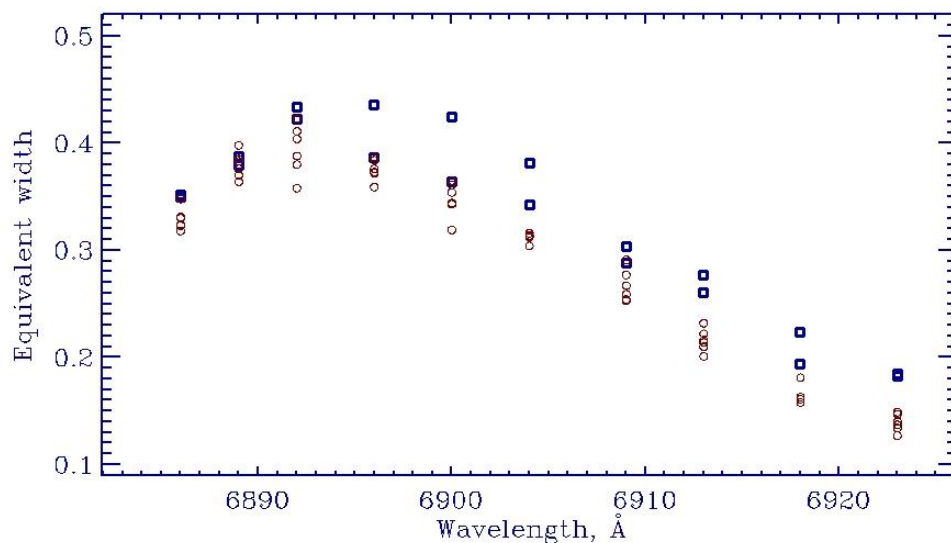
принадлежащи към ивицата В на кислорода (средната от трите показани на фигура 3). Съществува зависимост между измерените еквивалентни ширини от една страна и обилието на кислород в атмосферата. Разбира се, влияние върху еквивалентните ширини оказват и физическите условия в мястото на формиране на линиите, температура, налягане, турбулентни движения, особено във вертикална посока, но доминиращият принос е на обилието на  $O_2$ . Използвайки тази зависимост бе показано, че в продължение на десетилетия глобалното обилие на кислорода не се променя, в рамките на грешка в измерванията от около  $\pm 5\%$ . В същото време, измервания на съдържанието на  $CO_2$ , при използването на неговата линия при 2070 nm показват, че за 20 години неговото съдържание в атмосферата се е увеличило с 48%. (Grieco, A.; Candeo, G.; Marziani, P., 2009, Atmospheric  $O_2$  from astronomical data, 2009arXiv0901.2435G).

Какво показват резултатите, получени за  $O_2$  молекулата със спектрографа ЕСпеРо (Ешелен Спектрограф Рожен), работещ на 2-метровия телескоп? На фигура 4 са представени измерените еквивалентни ширини на ротационните линии от вибрационната ивица В на кислородната молекула, получени през четири нощи в периода от юни 2015 г. до края на януари 2016 година. Отместването по височина, на стойностите, съответстващи на един символ, е причинено от различната въздушна маса, на която е получен съответния спектър. Като изключим това отместване виждаме, че еквивалентните ширини на отделните линии (а те са пропорционални на колонката на плътността, т.е. на общия брой на молекулите на единица площ, по посока на наблюдавания обект), не променят своята стойност, което е индикация за приблизително постоянно съдържание на кислород в атмосферата.



Фигура 4. Еквивалентни ширини на телуричните линии от ивицата В на кислородната молекула, измерени в звезден спектър с ешелния спектрограф на 2 юни, 20 ное и 27 дек 2015 г. и на 28 яну 2016 г. Различните символи съответстват на различна въздушна маса, от 1.05 до 2.5.

На фигура 5 са представени еквивалентните ширини на същите линии за 28 и 29 октомври 2015 г. и за 6 дни в периода 18 – 27 декември 2015 г. Тези данни са получени близо до зенита, което обяснява тяхното по-малко разсейване. Удивително е запазването на почти постоянни стойности на еквивалентните ширини за отделните ротационни линии, вземайки предвид флукуациите на обилието, които се наблюдават в малки, изолирани екосистеми. Получените от астрономическите данни константни стойности за обилието на кислорода показват, че в глобален мащаб неговата средна концентрация не се променя, въпреки комплексните химически и фотолитични взаимодействия. Очевидно балансът между процесите, които разрушават и генерират  $O_2$  е перфектен.



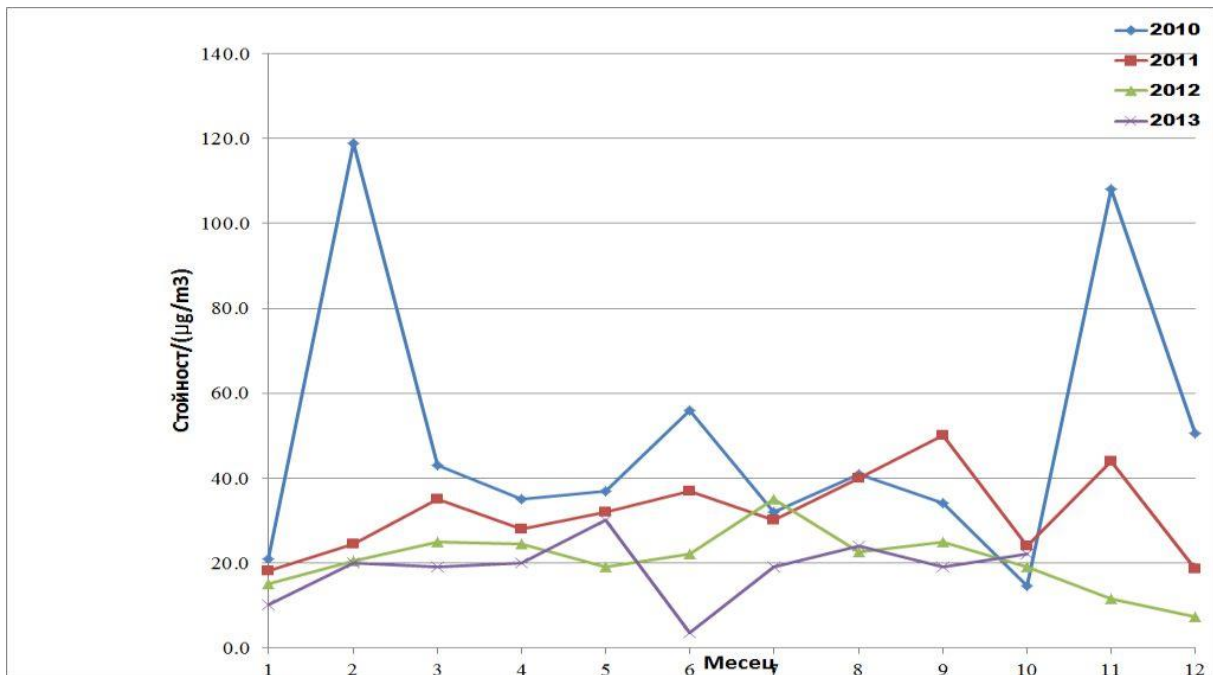
Фигура 5: Еквивалентни ширини на линиите от ивицата В на  $O_2$ , измерени на 28 и 29 октомври (квадрати) и на 18, 19, 20, 23, 24 и 27 декември 2015 г. (кръгчета).

## **Мрежа от камери за наблюдение на цялото небе и възможности за автоматизиран мониторинг на метеорната активност**

Една от целите на проекта бе да се създаде мрежа за мониторинг на метеорната активност, състоящата се от 3 камери. Първата камера, с такава цел, бе въведена в експлоатация през 2013 г. на територията на НАО Рожен. С финансиране от настоящия договор бяха доставени още две камери. Новите две камери бяха монтирани на териториите на Народната астрономическа обсерватория с планетариум (НАОП) „Джордано Бруно“, Димитровград и на Народната астрономическа обсерватория (НАО) „Славей Златев“, Кърджали. В тази глава са представени параметрите на камерите, данни за местата, на които те са монтирани, алгоритъма за управление на камерите, включително и за синхронизираното получаване на кадри. Показани са първи резултати от анализа на регистрирания през нощта на 9 срещу 10 август болид. Демонстрираме и възможностите на изградената база данни с отворен достъп, за избиране и разглеждане на получените до момента кадри. Няколко анимации в сайта, който поддържа тази база данни показват как е изглеждало небето през месеците август и септември над Рожен, Димитровград и Кърджали.

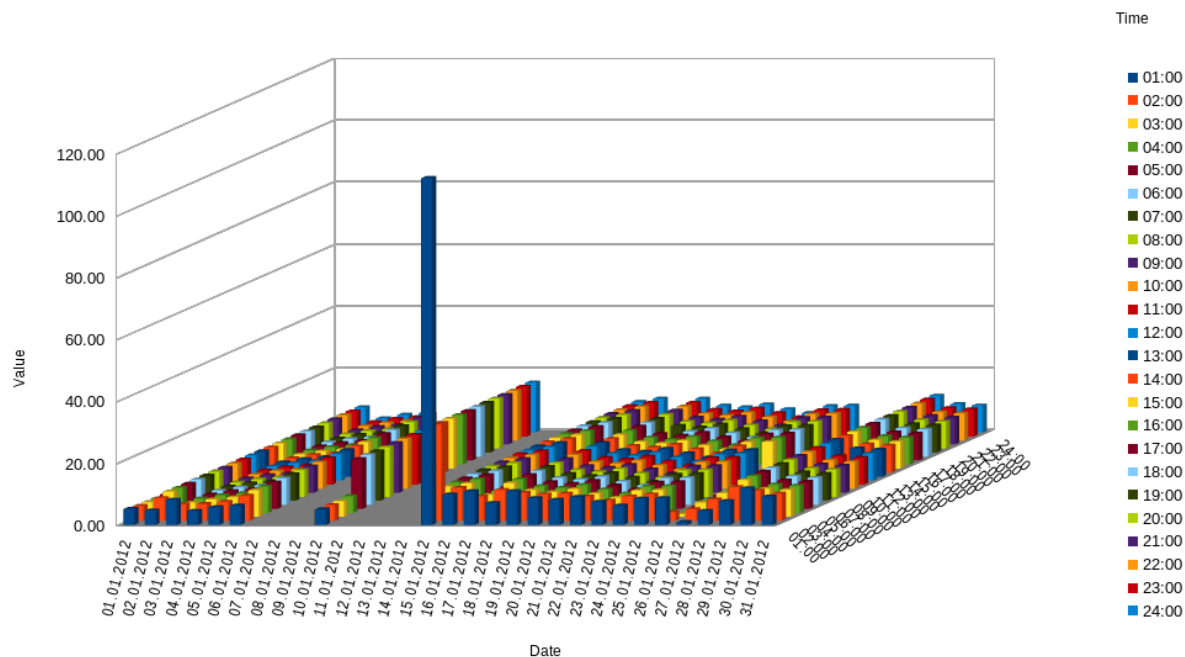
### Мотивация за изграждането на мрежа за мониторинг на метеорната активност

За да направим оценка на възможно влияние на метеорната активност върху флукуациите на концентрациите на фините прахови части, измервани от КФС „Рожен“ ще разгледаме характеристиките на тези флукуации за период от четири години, 2010г. -2013 г. Горната граница на средните месечни стойности на концентрациите за този период са представени на фиг. 1. През по-голямата част от периода горните граници на концентрациите не надвишават  $40\mu\text{g}/\text{m}^3$ , с две изключения достигащи до  $50\mu\text{g}/\text{m}^3$  през 2011 година, а през 2010 година се наблюдават три пикови стойности от 120, 58 и  $114\mu\text{g}/\text{m}^3$ , съответно през месеците февруари, юни и ноември.



Фигура 1: Горна граница на средномесечните концентрации на фини прахови части, измерени от КФС „Рожен“, за периода 2010 – 2013 година.

Въпреки че данните на фиг. 1 представляват средни месечни стойности за горните граници на концентрациите, те дават добра представа и за средно денонощните стойности, тъй като промените в рамките на едно денонощие са пренебрежимо малки. Това може бързо да се провери на Интернет страницата на проекта, по който се работеше през 2013 година (<http://eco.astro.bas.bg/>). Сред представените там данни се откроява едно интересно изключение – на 15.01.2012 г., в 1:00 измерената концентрация е „скочила“ над  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , след което, рязко спада до стойности около  $10\mu\text{g}/\text{m}^3$  и остава на това ниво през следващите часове на цялото денонощие (виж фиг. 2). Възможно е това силно отклонение да е причинено от обстоятелството, че за четирите дни предхождащи събитието няма данни, което най-вероятно е свързано с инструментални проблеми, но след като данните са верифицирани, няма причини да не ги разглеждаме като реални.



Фигура 2: Концентрации на фините прахови частици през м. януари 2012 г. На 15.01, в 1:00 се вижда единственият случай на силно отклонение в рамките на един час, регистриран за целия период 2010 -2013 г.

От казаното до тук следва, че горна граница за измерените концентрации на фини прахови частици с размери  $< 40\mu\text{g}/\text{m}^3$  биха могли да се разглеждат като нормални фоновы стойности. Ето защо по-нататък ще акцентираме върху концентрациите по-големи от  $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ , търсейки отговор на въпроса могат ли тези концентрации да бъдат свързани с повишена метеорна активност.

За да направим сравнението възможно, след като разгледахме измерените на повърхността на Земята концентрации на фини прахови частици, нека направим оценка на количеството прах, което всеки ден навлиза в атмосферата от Космоса. Резултатите от измервания на зодиакалната светлина и данните от космически апарати дават средно от 100 до 300 тона/денонощие. Нека вземем средната стойност от 200 тона/денонощие за нашия анализ. Космическите пращинки навлизат в атмосферата със скорости между 11 и 74 км/с, нагряват се до температури над 1500 градуса и по-големите от тях йонизират атмосферата около себе си и се наблюдават като метеори. По своя път през атмосферата те се разрушават, частично се изпаряват, и само около 1% от тяхната маса (преди навлизането им в атмосферата) достигат Земята повърхност. Ако разпределим тези 2 тона върху цялата земна повърхност и отчитайки, че тяхната средна скорост над повърхността е намалена до около 100 м/сек, получаваме следната оценка за плътността (Площ на земната повърхност =  $5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2$ , едно денонощие има 86400 сек):

$$\text{Маса}/(\text{Площ} \cdot \text{Скорост} \cdot \text{Време}) = 2 \cdot 10^6 \text{ г}/(5.1 \times 10^{14} \text{ m}^2 \cdot 100 \text{ м/сек} \cdot 86400 \text{ сек}) =$$

$$\text{Средна плътност} = 4.5 \times 10^{-16} \text{ г}/\text{m}^3$$

Оценката за приноса на пращинки от Космоса към средната плътност (концентрация) на пращинките, измервани на земната повърхност показва, че тя е не само пренебрежимо малка, тя е на 13 порядъка по-ниска от измерваните фонове стойности от КФС „Рожен“. На пръв поглед тази огромна разлика прави търсенето на връзка между метеорната активност и флукуациите в наземната концентрация на пращинките безпредметна. Но има няколко обстоятелства, които говорят в полза на търсенето на такава корелация. Ето само три от тях. Първо, за разлика от средното количество прах постъпващо от Космоса непрекъснато, метеорната активност е концентрирана в сравнително кратки интервали от време. Второ, максимумът на метеорната активност се реализира над сравнително малки области от земната повърхност. И трето, в много случаи метеорните тела претърпяват каскадна фрагментация, което води до достигане до земната повърхност на частици по-малки от техните родителски тела, навлезли в горните слоеве на атмосферата. Резултатът от това раздробяване на по-едри частици води до появата на огромен брой пращинки, част от които имат размери  $< 10$  микрона. Тук ще направим оценка на изредените три обстоятелства.

Нека започнем с обстоятелство (1). С предлаганата мрежа от 3 камери за мониторинг на цялото небе (2 нови + една, въведена в експлоатация през 2013 г., по време на първия проект финансиран от ПУДООС с бенефициент ИА с НАО) ще можем да регистрираме метеорна активност на площ около един ъглов градус. Освен броя на метеорите, и оценката на масата на телата, които са ги породили, ще можем да определим точните координати на навлизане в атмосферата на тези тела и тяхната скорост – важни параметри за по-нататъшния количествен анализ. Цялата земна повърхност съответства на 41253 ъглови градуса, т.е. отношението на наблюдаваната от нашата мрежа ъглова площ към тази на цялата земна повърхност е около  $2.4 \cdot 10^{-5}$ . Ако предположим, че цялата маса на регистрираните метеорни тела, породили наблюдаваните метеори, достигне земната повърхност в тази площ, то средната концентрация на метеорната материя нараства от  $4.5 \cdot 10^{-16} \text{ г/м}^3$  на  $1.9 \cdot 10^{-11} \text{ г/м}^3$ . Тази стойност все още е много малка, в сравнение с измерваните от КФС „Рожен“ фонове стойности. Ако добавим второто обстоятелство, че максимумът на активност по време на метеорен поток продължава не цяло денонощие а само 2-3 часа, това ще увеличи средната очаквана плътност с още около един порядък, т.е. тя ще достигне около  $2 \cdot 10^{-10} \text{ г/м}^3$ , или  $2 \cdot 10^{-7} \text{ }\mu\text{г/м}^3$ , което все още е далеч под нивата на измерваните фонове стойности. За да направим оценка на третото обстоятелство, каскадната фрагментация, трябва да имаме представа за размера и масата на метеорните тела (метеороидите), които предизвикват наблюдаваните метеорни явления. Обобщена информация за тези тела е дадена на фиг. 3. Най-малките метеори, които ние можем регистрираме с камерите за наблюдение на цялото небе, са по-ярки от 5 звездна величина, т.е. те са с маси по-големи от  $10^{-5}$  грама. Такива са например метеорите от метеорния поток Геминиди, чийто максимум е на 14 декември и се характеризира с часово число (брой метеори, регистрирани в рамките на един час) около 120. Това са бързи метеори, като част от тях са ярки метеори и болиди, т.е. по-ярки от нулева звездна величина и по-масивни от  $10^{-2}$  г (много по-големи от 10 микрона). Някои от тези частици биха могли да обяснят повишената концентрация на фини прахови частици, регистрирана през февруари 2010 г, както и пиковата стойност

на концентрацията, измерена на 15.01.2012 г., в 1:00. Но много по-вероятно е тези измерени стойности да са резултат от каскадната фрагментация на ярки болиди, които се разпадат на малки прахови частици, в резултат на силния температурен градиент между тяхната повърхност и ядрата им, който се получава при тяхното взаимодействие с атмосферата.



Фигура 3: Връзка между масата на метеорното тяло, абсолютна звездна величина на метеора и височината на която той става видим.

Интерес за нас представляват болидите с маса около 100 г. Ако такъв болид се разпадне каскадно по време на своя полет през атмосферата той ще създаде рой от частици, с маси разпределени по следния степенен закон:  $n(m) = Am^{-\alpha}$ , където  $n(m)$  е броят на частиците с маса  $m$ , а  $\alpha$  е степенен показател, характеризиращ зависимостта на разпределение на частиците по маса след фрагментацията на родителския болид. Оценките на този степенен показател, давани от различни изследователи са около 2. И така, ако регистрираме болид от нулева абсолютна звездна величина, т.е. с маса около 1 г, има вероятност той да се разпадне на огромен брой частици, които населяват областта под 10 микрона. При типична плътност на тези частици около  $\rho = 3 \text{ г/см}^3$ , една 10 микронна частица би имала тегло  $(4 \cdot \pi \cdot r^3 / 3) \cdot \rho \approx 10^{-8} \text{ г}$ . Това означава, че един регистриран ярък метеор с маса 1 грам, ще се разпадне на повече от 100 милиарда прахови частици с размери около 10 микрона, които могат да бъдат регистрирани от станциите на Земята повърхност няколко десетки дни след наблюдението на метеора и определяне на неговите параметри. Колкото по-близо до земната повърхност протекат



процесите на фрагментация, толкова по-кратък ще бъде периодът между регистрираната метеорна активност и измерената концентрация на фини прахови частици. Така например, високите концентрации на прахови частици, измерени през февруари и ноември 2010 г., биха могли да бъдат причинени от активността на метеорния поток Геминиди през декември 2009 г. и Леониди през ноември 2010 г. Следвайки горното изложение, фрагментацията от Леонидите протича по-близо до повърхността на Земята, затова резултатите от нея се наблюдават почти непосредствено след регистрацията на максимума на метеорния поток. При Геминидите напротив, фрагментацията протича на няколко километра (до десетки километра) над повърхността на Земята, малките частици имат много по-малки скорости от скоростта на родителския ярък метеор или болид, съответно те бавно се „утаяват“ в атмосферата за да достигнат земната повърхност след няколко десетки дни. Това задържане на фините прахови частици в атмосферата за известно време, преди тяхната регистрация от КФС „Рожен“ добре се съгласува и с регистрираното фазово отместване (предварение) на повишена екстинкция в целия спектрален диапазон. Тази зависимост бе описана в детайли в отчетния доклад за изпълнение на дейностите по проекта между ПУДООС и ИА с НАО, по който бе работено през 2013 и началото на 2014 година.

В заключение нека обобщим, че е възможно съществуването на корелация между метеорната активност и флукуациите на концентрацията на праховите частици, измервана в приземния слой на атмосферата. Най-вероятният механизъм свързващ двете явления е каскадната фрагментация на ярки метеори и болиди, които могат да бъдат регистрирани и анализирани чрез синхронизирана мрежа от станции за наблюдения на цялото небе. По-категорични заключения за тези зависимости биха били възможни при по-продължителен мониторинг на метеорната активност, комбиниран с анализ на данните за концентрациите на малки прахови частици, измервани на земната повърхност.

#### **Характеристики на камерите за наблюдаване на цялото небе**

На трите места от мрежата (Рожен, Димитровград, Кърджали) са монтирани еднакви камери - CCD (Charge Coupled Device) AllSky-340. Тези камери са производство на американската фирма Santa Barbara Instrument Group (SBIG). Основното им предназначение е за мониторинг на цялото небе за наличие на облаци, което е от решаващо значение за планиране и реализиране на астрономически наблюдения. Като допълнителна задача подобни камери често се използват за регистриране и изследване на метеорни следи в атмосферата.

Известно е, че камери за наблюдение на цялото небе се използват и за наблюдение на слънчевото греене от дневното небе (Roman et al. 2012). Нашата цел ще е проучване на възможността за използване на AllSky камерите за мониторинг на метеорната активност.

### Камерата SBIG AllSky-340

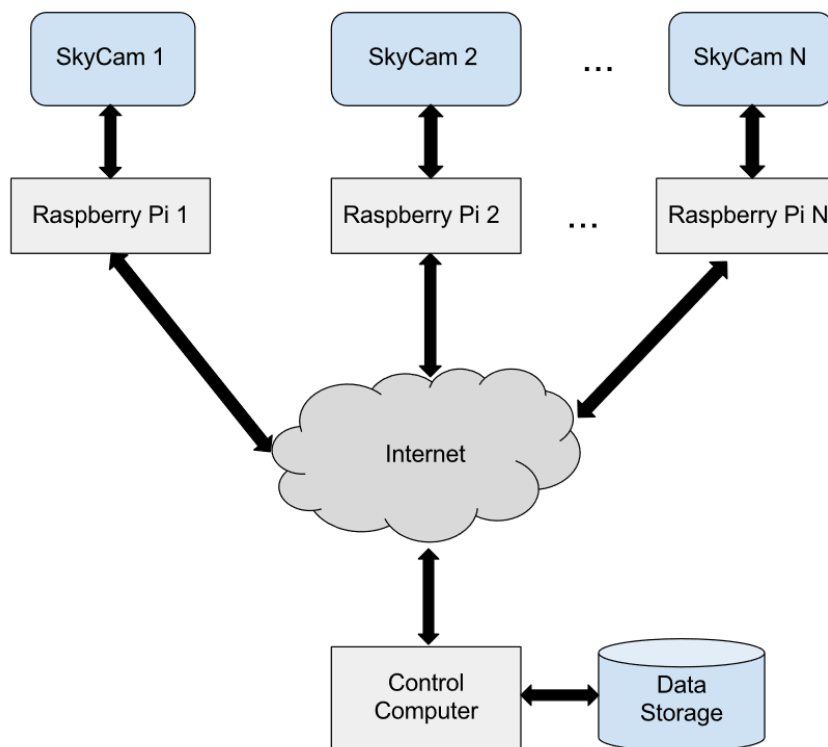
Техническите параметри на камерата (Фигура 1) са следните:



Фигура 4. Външен вид на ССД камерата

- цветен светочувствителен сензор от тип Kodak KAI-340 CCD;
- размер на полето 640 x 480 пиксела;
- размер на пикселите 7.4 к 7.4  $\mu\text{m}$ ;
- шум на четене < 15 електрона rms;
- работен температурен интервал от -10 C до +45 C;
- интервал на експозиции от 0.0001 сек. до 10 минути;
- камерен обектив от тип „рибешко око“ е Fujinon FE185C046HA-1;
- фокусно разстояние на обектива 1.4 mm, при отношение F/1.4;
- компютърно управление чрез RS-232 порт;
- скорост на трансфер на данни от 9600 до 460800 Baud Rate;
- механичен затвор за автоматично получаване на кадри с „ток на тъмно“;
- нагревател против кондензация на атмосферната влага;
- софтуер за управление „SBIG All Sky Camera“;
- запис на данните в стандартен за астрономията FITS формат;
- възможност за запис на кадрите в JPG формат;
- възможност за запис на анимация;
- възможност за запис на данните на отдалечен ftp сървър.

Комуникацията на доставените камери с управляващите ги компютри оригинално е предвидена да става през сериен порт RS232. Това налага силни ограничения както върху скоростта на изчитане на данните, така и върху разстоянието между камерата и компютъра (камерата е на открито, а компютърът е в затворено помещение, което не винаги е възможно да бъде близо до мястото на камерата. Освен това оригиналният софтуер, с който са доставени камерите функционира само под Windows и е с доста ограничени възможности. За целта се наложи разработка, както на коренно различен хардуер за управление и комуникация с камерите, така и на нов софтуер, работещ под Linux. Структурата на мрежата е представена на фигура 5.



Фигура 5. Структура на мрежата от камери за наблюдения на цялото небе.

В новия хардуер непосредствено до всяка камера се намира един single board computer (SBC), който е свързан към порта на компютъра чрез кабел RS 232/USB адаптер. Връзката между всеки SBC и управляващия сървър става през интернет. По този начин са елиминирани двата недостатъка на оригиналния софтуер – ограниченията върху скоростта на трансфер и отдалечения достъп. Новият софтуер на камерите позволява със заснетите кадри да се извършват някои първични обработки като изваждане на ток на тъмно, оптимизиране на диапазона за запис във jpg-формат за визуализация на кадрите и др. Той адаптивно регулира експозицията, анализирайки всеки получен кадър, така че да се постигне оптимално ниво на сигнала, около средата на динамичния диапазон. Типичните експозиции за тъмни нощи (без Луна) са 300 секунди, а достигнатото ниво на сигнала е около 30000 единици, което е около средата на 16-битовия динамичен диапазон. Друга важна функция на разработения за управление на мрежата софтуер е всички камери да започват едновременно експозициите, с висока степен на синхронизация. Както ще видим по-нататък това е много важно условие, без изпълнението на което не бихме могли да сравняваме кадрите между камерите и да

извършим прецизна триангулация на регистрираните събития. За анализ на кадрите те се записват във FITS-формат (стандарт за астрономически изображения, който запазва 100% от регистрираната информация), а паралелният запис в jpg-формат служи само за бърза визуализация, в случай че управляващият камерите иска да добие представа за качеството на получаваните данни. Но натрупаният опит показва, че системата работи надеждно автономно, камерите могат да се пускат вечер, без надзор да трупат кадри през цялата нощ и да бъдат смъкнати на следващия ден за обработка и анализ. Всяка от камерите е свързана с компютър, на който е инсталиран софтуерът за управление и наблюденията на всички камери могат да бъдат стартирани от всеки един от тези компютри.

Записаните кадри във FITS-започват с хедер, който съдържа всички параметри на изображението. Съдържанието на хедера изглежда така:

```
SIMPLE      = T
BITPIX      = -32
NAXIS       = 3
NAXIS1      = 640
NAXIS2      = 480
NAXIS3      = 3
INSTRUME    = 'SBIG AllSky-340'
DATE-OBS    = '2013-06-19T19:20:32.761'
BSCALE      = 1.0000000000000000
BZERO       = 0.0000000000000000
EXPTIME     = +6.000000000000E+001
CBLACK      = 1024
CWHITE      = 6492
INPUTFMT    = 'FITS'  '/'      Format of file from which image was read
```

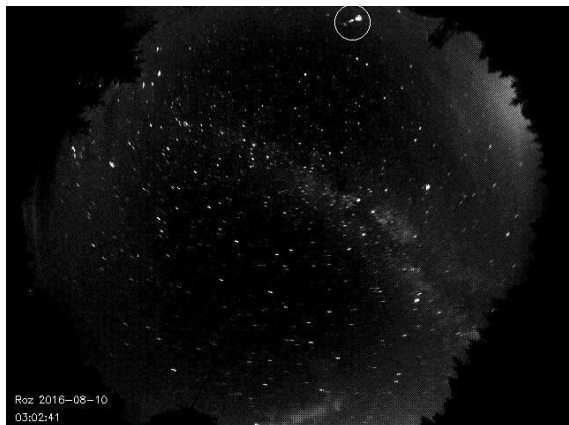
Въпреки че информацията в хедъра е малко, най-важната информация за времето на експозиция DATE-OBS и за продължителността на експозицията EXPTIME са налице. Както споменахме по-горе разработеният софтуер прави няколко помощни кадри и автоматично подбира необходимата експозиция в зависимост от осветеността на небето. Затова кадрите направени при ярко небе като по време на пълнолуние или по време на полумрака имат променливи експозиции. Това е ефект, който трябва да се отчита в процеса на обработка и фотометриране на кадрите.

Освен софтуера за управление на камерите, бе разработен и софтуер за комбинация на кадрите от всяка нощ в анимационен клип. Анимациите са изключително полезни при търсенето на регистрирани събития през периода, който обхващат.

Организирана е база данни от получените кадри, която е достъпна от създадения за целта сайт <http://allsky.moma.bg/>. Работата по базата данни продължава, увеличава се броя на критериите, по които може да става търсенето и се търси възможност за инсталиране на базата в облачна структура, която да поеме големия обем от данни и да осигури автоматичното генериране на базата.

## Първи резултати от мрежата за мониторинг на метеорната активност: Базисна метеорна фотография болид от Персеиди 2016, 10 август

През нощта на 9/10 август, два дни преди максимума на метеорния поток Персеиди, камерите в Кърджали и Рожен регистрираха края на следата на ярък болид. По същото време в Националната астрономическа обсерватория се провеждаше лятната лагер-школа на ОП Младежки център гр. Хасково. Виктория Мирчева от клуб „Хелиос“, Хасково направи снимката на болида, която е поставена на лицевата страница на този отчет.



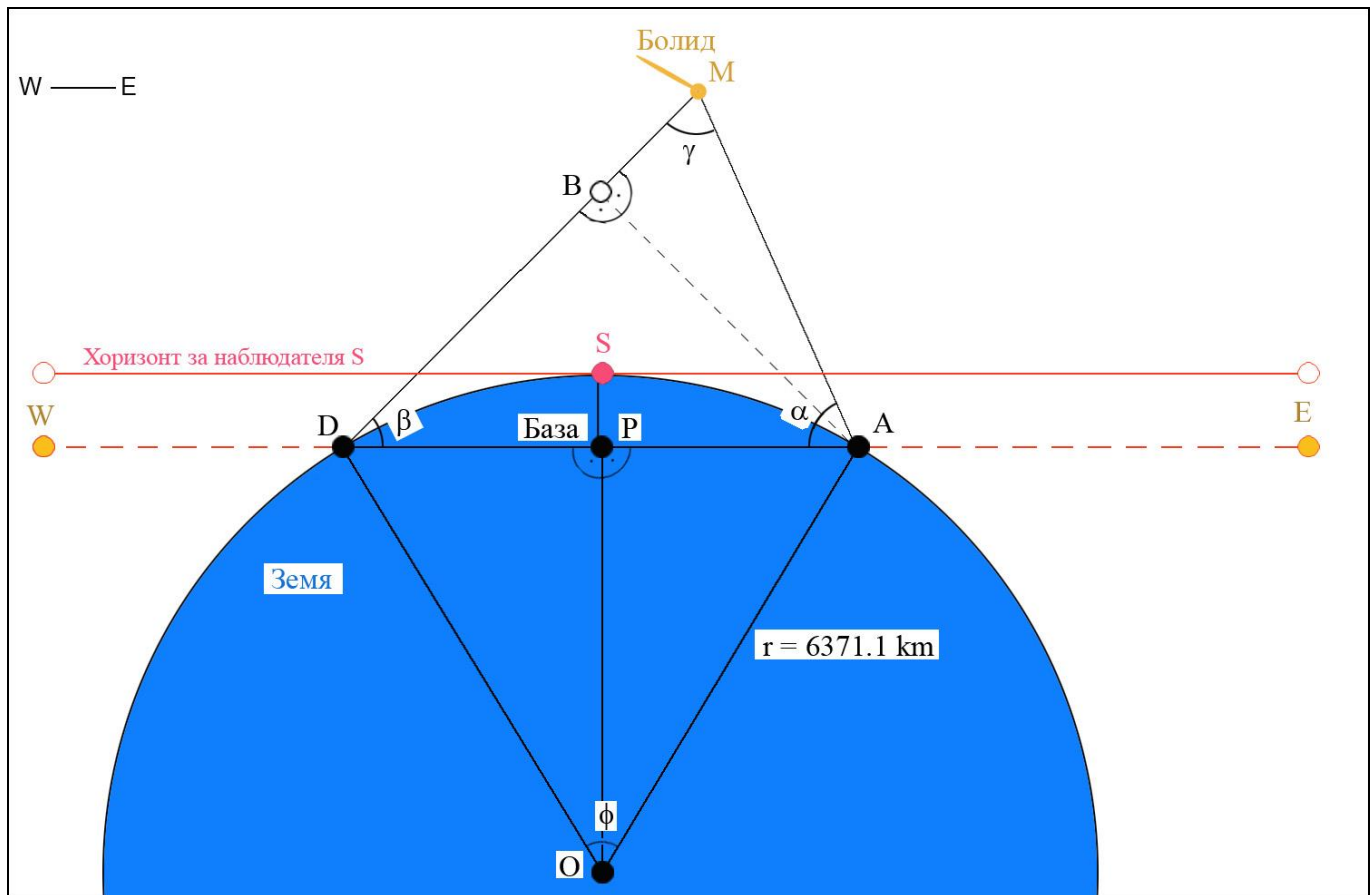
Кадри, получени с камерата в НАО Рожен (ляво) и Кърджали (дясно). В кръгчетата е оградено избухването на яркия болид на 10 август 2016 г., първото събитие, регистрирано с две от трите камери, участващи в мрежата за мониторинг на метеорната активност.

По-надолу представяме анализ на измерванията на положението и яркостта на болида и резултатите от този анализ.

### Методика на анализа.

Като знаем взаимните азимути на наблюдателните пунктове един спрямо друг, от гледната точка на всеки един от пунктовете, можем (хипотетично) да намерим звезда, намираща се точно по посока на другия пункт в момента на появата на метеора, но не е правилно ако тази звезда е видима на самия хоризонт - на съответния азимут. Поради извивката на Земята, от гледна точка на единия пункт, звездата, намираща се точно по посока на другия, не би била видима над хоризонта (и обратно – фиг 1). Ако обаче има наблюдател S, намиращ се точно между пунктовете A и D, в момента на появата на метеора той би виждал едновременно и двете звезди на своя хоризонт, на азимути, съответстващи на противоположните посоки към двата пункта (всъщност за нашите цели е достатъчна и само едната звезда – само E или W от фиг. 1). Затова можем да симулираме небето с виртуален планетариум, като за „Location” зададем усреднените географски координати на двата набл. пункта, т.е. от гледна точка на фиктивния наблюдател S. Така ще можем точно да определим кои са тези две звезди. При симулацията не вземаме предвид повдигането на образите от рефракцията, тъй като ни

интересуват реалните посоки. Тази процедура е първата стъпка към определянето на нужните ни триъгълници.



Фиг. 1. Методика на изчисленията

А и D са съответно НАОП-Кърджали и НАО-Рожен. В момента на заснемането на двете снимки, за наблюдател от пункта А, направлението на запад към пункт D съвпада с посоката към звездата W (фиктивна или реална), която обаче теоретично е под хоризонта поради извивката на Земята. Аналогично за наблюдател от пункт D, направлението на изток към пункт А съвпада с посоката към звездата E, която обаче за пункт D още не е изгряла. Наблюдателят S, намиращ се точно между двата пункта, вижда в момента на появата на метеора и двете звезди на своя хоризонт.

Като знаем ъгловото отстояние  $\varphi$  между пунктовете А и D при гецентъра O, както и средният земен радиус  $r = 6371.1 \text{ km}$ , можем да получим разстоянието AD (базата), при това не по извивката на Земята (като дължина на дъга), а по права линия – като сума от катетите AP и DP на двата правоъгълни тр. APO и DPO (фиг. 1).

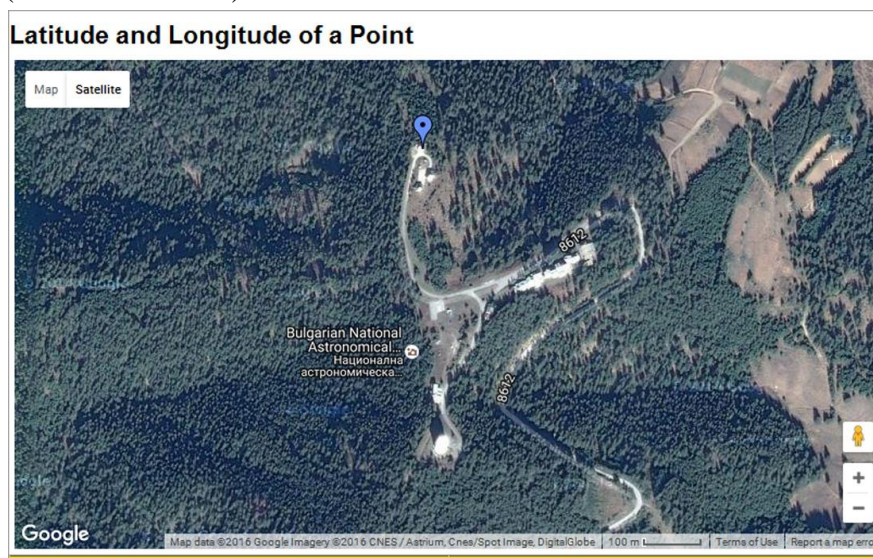
След като определихме кои са двете звезди W и E, чрез анализ на едновременно заснетите две снимки можем да определим за всеки набл. пункт ъгълът между метеора M и посоката към другия пункт. Така получаваме ъглите  $\alpha$  и  $\beta$  в триъгълника ADM. Ъгъл  $\gamma$  измерваме по разликата в положението на метеора на фона на звездите (паралакса), отчетена по двете снимки.

Като знаем дължината на базата  $AD$  и ъгълът  $\beta$ , можем да получим дължината на катетите  $AB$  и  $BD$  на един помощен правоъгълен тр.  $ABD$ . Имаме  $AB = AD \cdot \sin \beta$  и  $BD = AD \cdot \cos \beta$ . Но от измерванията по снимките вече знаем и ъгълът  $\gamma$  при метеора  $M$ , чрез който можем да получим търсените разстояния  $AM$  и  $DM$ , т.е. от наблюдателните пунктове до него. Имаме  $AM = AB / \sin \gamma$  и  $DM = AB / \tan \gamma + BD$ .

### Координати на наблюдателните пунктове, разстояния (бази) между тях и взаимни посоки

#### **НАО-Рожен:**

41.69769 N (41° 41' 51.6948"),  
19.06080 E (24° 44' 19.0608")



#### **НАОП-Кърджали:**

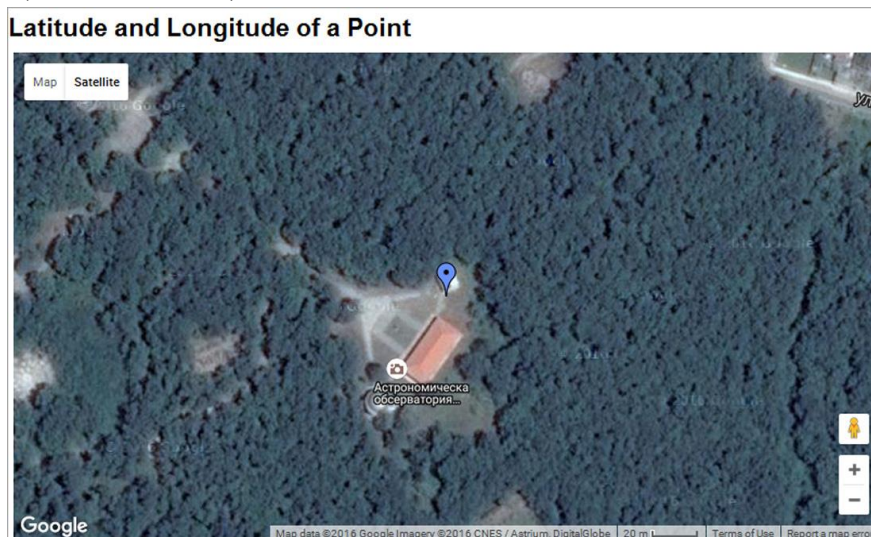
41.645405 N (41° 38' 43.458"),  
25.381096 E (25° 22' 51.946")



**НАОП-Димитровград:**

42.046150 N (42° 02' 46.140"),

25.578072 E (25° 34' 41.059").



**Разстояния между наблюдателните пунктове (бази), изчислени по три различни начина**

(1)

НАО-Рожен – НАОП-Кърджали: 53.688 km,

НАО-Рожен – НАОП-Димитровград: 79.589 km,

НАОП-Димитровград - НАОП-Кърджали: 47.445 km.

(2)

От Google maps на

<https://www.google.bg/maps/@42.0459103,25.5779288,135m/data=!3m1!1e3?hl=en> :

НАО-Рожен – НАОП-Кърджали: 53.68 km,

НАО-Рожен – НАОП-Димитровград: 79.57 km,

НАОП-Димитровград - НАОП-Кърджали: 47.45 km.

(3)

НАО-Рожен – НАОП-Кърджали: 53.739 km,

НАО-Рожен – НАОП-Димитровград: 79.666 km,

НАОП-Димитровград - НАОП-Кърджали: 47.508 km.

Относителните разлики между резултатите от трите изчисления са пренебрежимо малки, т.е. всяка от трите комбинации е подходяща за изчисляване на височината и азимута на регистрирания болид.

**Взаимни посоки (по геодез. азимут)**

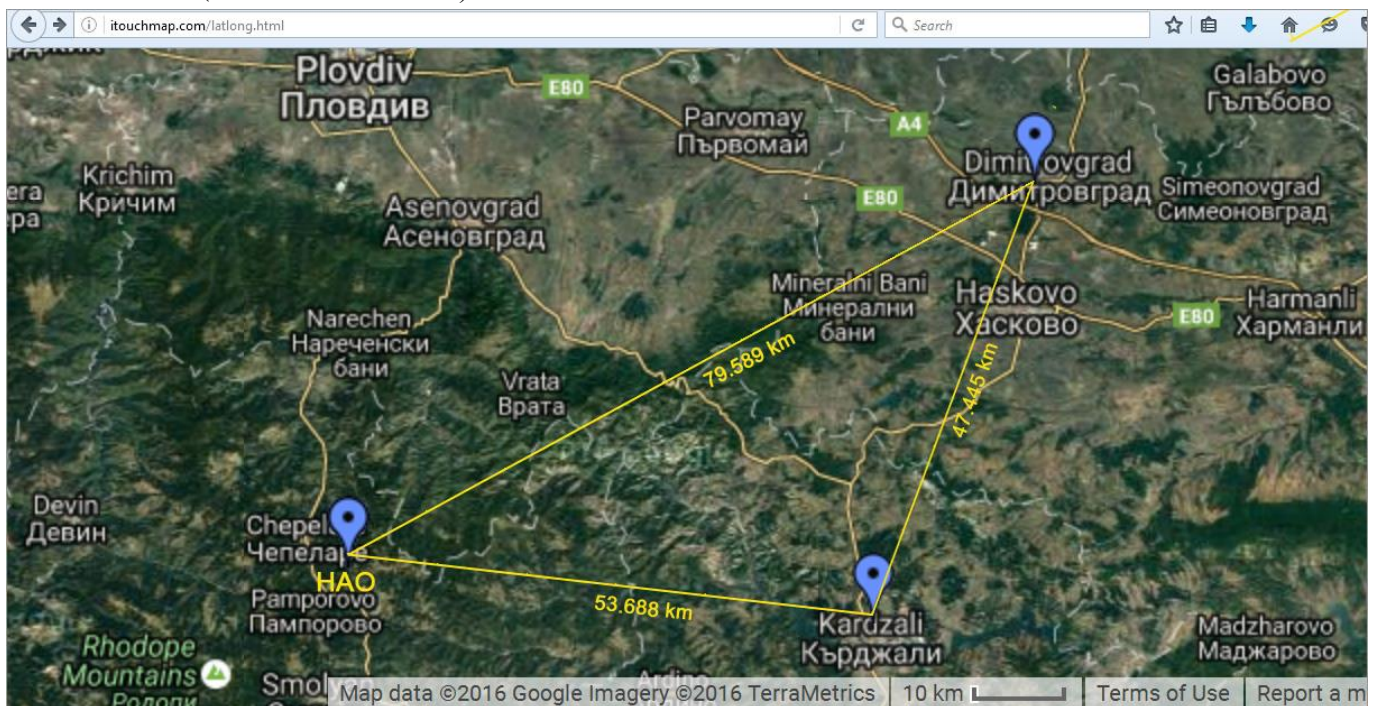
НАО - НАОП-Кърджали: 96.24268° (96° 14' 33.65" близо е NGC1659).

НАО - НАОП-Димитровград: 58.06003°,

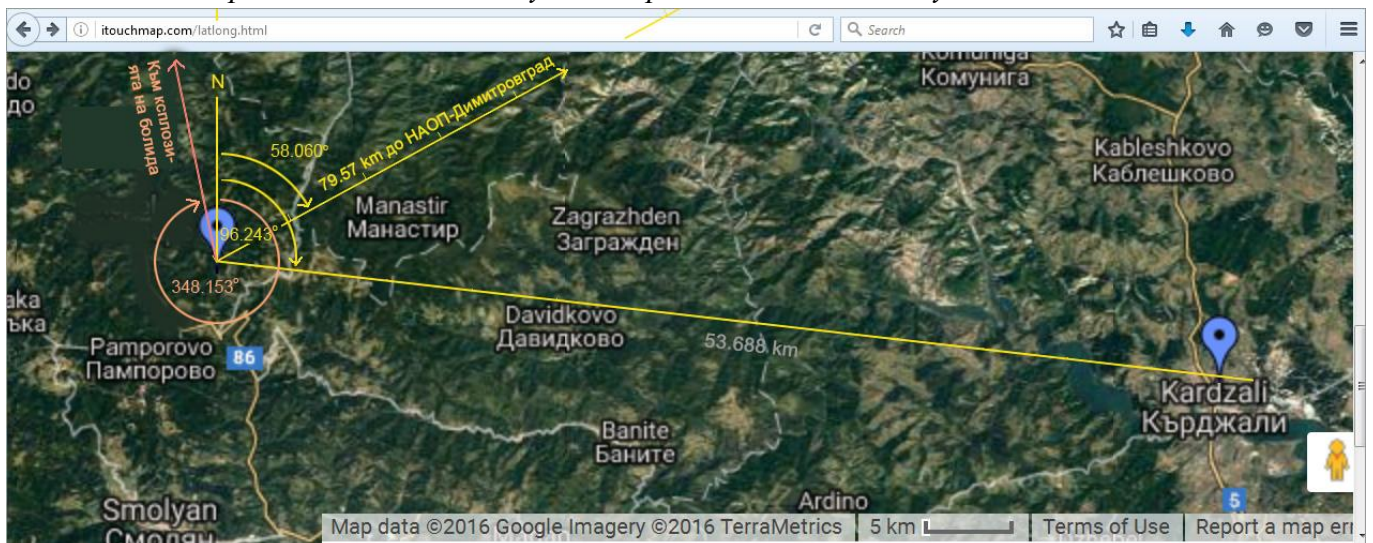
НАОП-Кърджали - НАОП-Димитровград: 25.69729°.



Средна точка на базата НАО – НАОП-Кърджали:  
 $41.671549^{\circ}$  N ( $41^{\circ} 40' 17.5764''$  N),  
 $25.059862^{\circ}$  E ( $25^{\circ} 03' 35.5032''$  E).



*Трите наблюдателни пункта и разстоянията между тях*



*Посоките от НАО към НАОП-Кърджали, от НАО към НАОП-Димитровград и от НАО по посока на експлозията на болида (по геодез. азимут)*

**Данни от експозициите и от симулациите**

За Fish-eye камерите SBIG Allsky340C в Кърджали и в НАО-Рожен:  
 Начало на експозицията: 03:02:41 LT (00:02:41 UT)  
 Експозиция 300 s (5 мин).

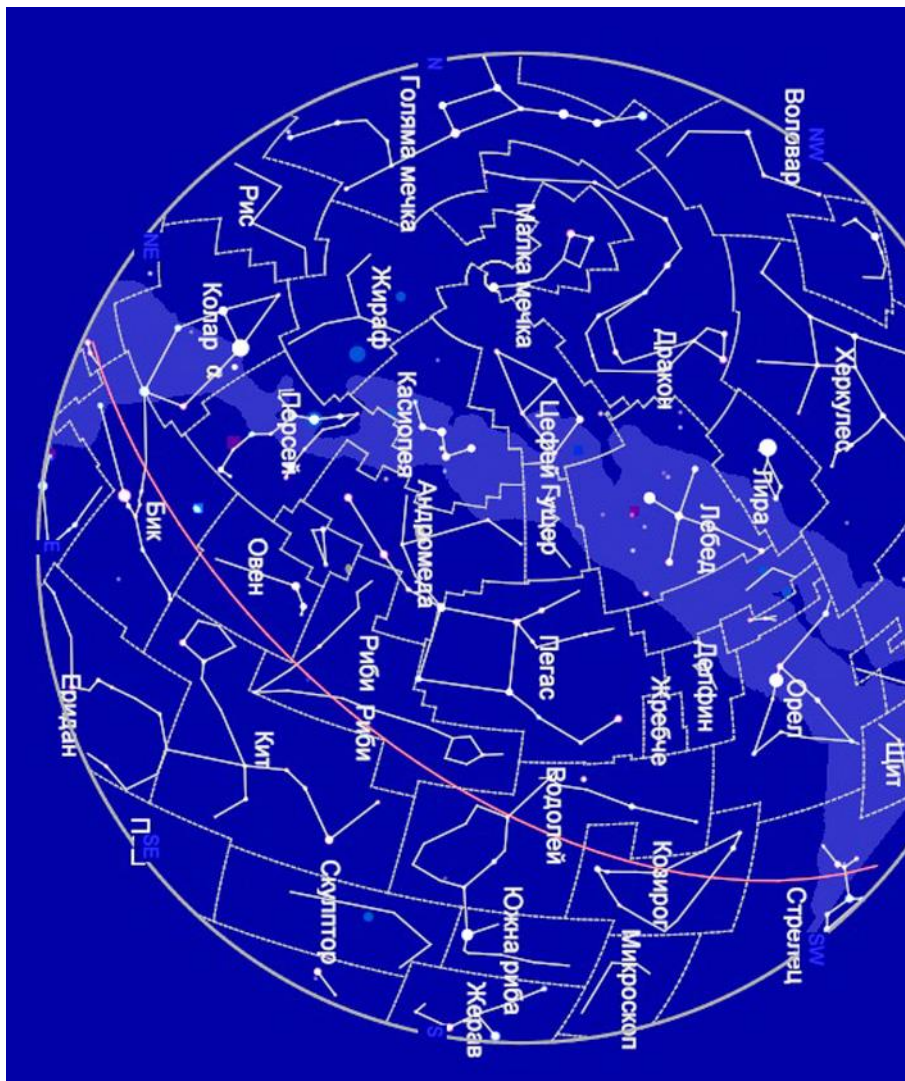
За снимката на Виктория Мирчева с Canon EOS 750D:

Начало на експозицията 03:06 LT (00:06 UT, по данни от EXIF-а на снимката – дадено с точност до минута, EXIF: стандарт за включване на метаданни в изображенията.)  
Експозиция 30 s.

(при фотоапаратите Canon EOS, за момент на заснемане на кадъра се записва началото на експозицията, както и при all-sky камерите.)

Поради това, че в EXIF-а на JPG-снимката момента на началото на експозицията е даден с точност до 1 минута, то интервалът, в който се е появил болидът е между 00:06:00 UT и 00:07:30 UT (предвид и продължителността на експозицията от 30 s). Този интервал изцяло се помества в интервала на 5 минутната експозиция на all-sky камерите (той е от 00:02:41 UT до 00:07:41 UT).

Симулациите на вида на небето са извършени за средния момент от този интервал – за 00:06:45 UT на 10 август 2016 г., със свободния програмен пакет Sky Charts v. 3.10.



Общ вид на небето в 00:06:45 UT на 10.08.2016 г. за наблюдател от НАО-Рожен

**За наблюдател от Рожен:**

Болидът се е появил над северния хоризонт, като началото на регистрираната с фотоапарата следа е видимо най-близо до звездата HD104986 от Дракон, която за същия наблюдател в 00:06:45 UT е била на височина над хоризонта  $25^{\circ} 35' 43.5''$  ( $25.595417^{\circ}$  геометрична алтитуда, без повдигането от рефракцията) и на геодезически азимут  $354^{\circ} 56' 7.5''$  ( $354.935417^{\circ}$ ).

Екваториални координати на същата звезда HD104986 за J2000:

RA: 12h 05m 12.103s, DE:  $+73^{\circ} 27' 16.85''$

Най-близо до средата на заснетата траектория се проектира звездата 4 Dra, която в указания момент е била на височина  $22^{\circ} 02' 37.5''$  ( $22.043750^{\circ}$ ) и на геод. азимут  $351^{\circ} 35' 16''$  ( $351.587778^{\circ}$ , или  $8.41222^{\circ}$  вляво от посоката север).

Екваториални координати на 4 Dra за J2000:

RA: 12h 30m 06.471s, DE:  $+69^{\circ} 12' 03.14''$

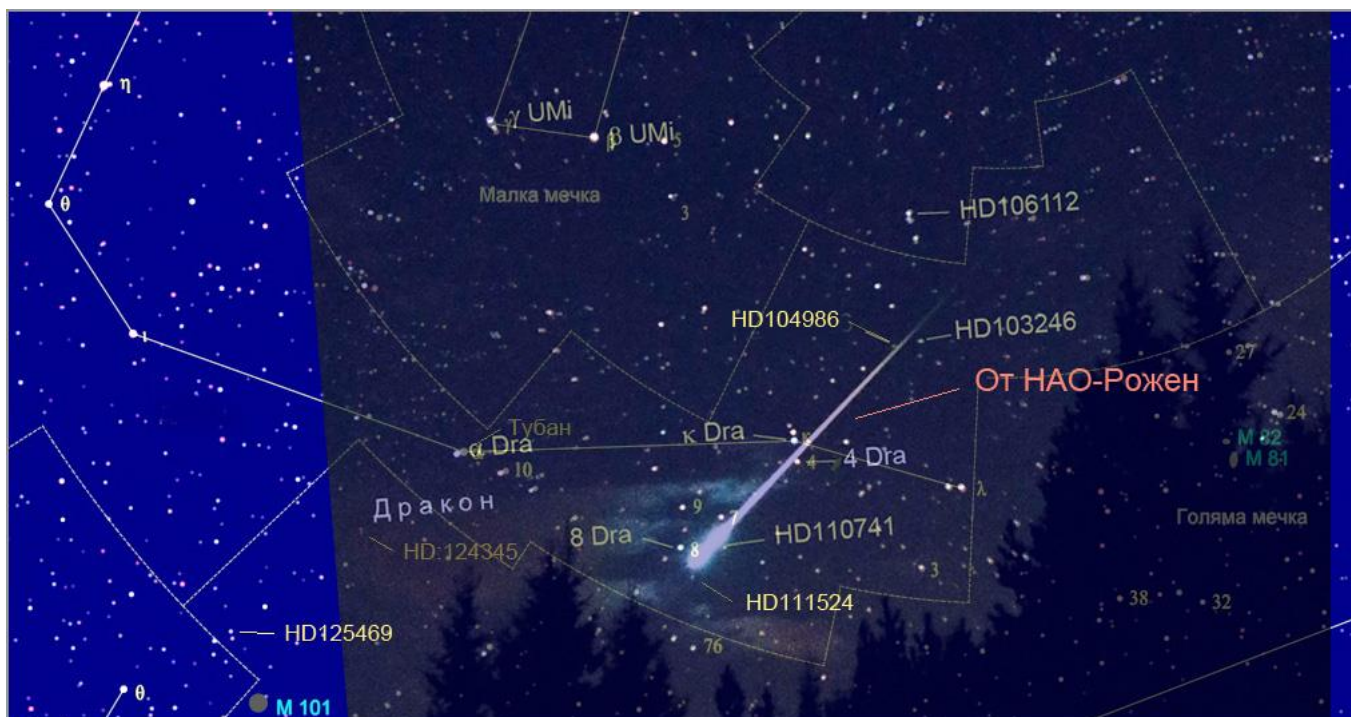
Експлозията на болида е видимо най-близо до 8 Dra, но не е трудно да се прецени, че експлозията покрива друга видимо близка звезда – HD111524 от Дракон, която в указания момент е била на височина  $18^{\circ} 26' 43.3''$  ( $18.445361^{\circ}$ ) и на геод. азимут  $348^{\circ} 09' 09.6''$  ( $348.152667^{\circ}$ ).

Екваториални координати на HD111524 за J2000:

RA: 12h 48m 56.097s, DE:  $+64^{\circ} 44' 06''$



*Площадката около болида с опознатите звезди*



Опознаване на площадката чрез налагане на полупрозрачна снимка върху карта (или обратно) – етап 1: болидът заснет от НАО-Рожен

#### **За наблюдател от НАОП-Кърджали:**

От all-sky камерата в НАОП-Кърджали между облаци е заснета само област около средата на траекторията, която от разположението ѝ спрямо алфа-Дракон, след налагане на снимката върху карта се вижда, че заснетата част от траекторията се проектира видимо близо до звездата HD124345 от Голяма мечка. Последната в указания момент за наблюдател от Кърджали е била на височина  $18^{\circ} 56' 52.0''$  ( $18.947778^{\circ}$ ) и на геод. азимут  $337^{\circ} 32' 30.0''$  ( $337.541667^{\circ}$ ).

Екваториални координати на HD124345 за J2000:

RA: 14h 11m 00.298s, DE:  $+60^{\circ} 24' 27.03''$ .

Самата експлозия на болида не се вижда на снимката от Кърджали – остава ниско зад облака.

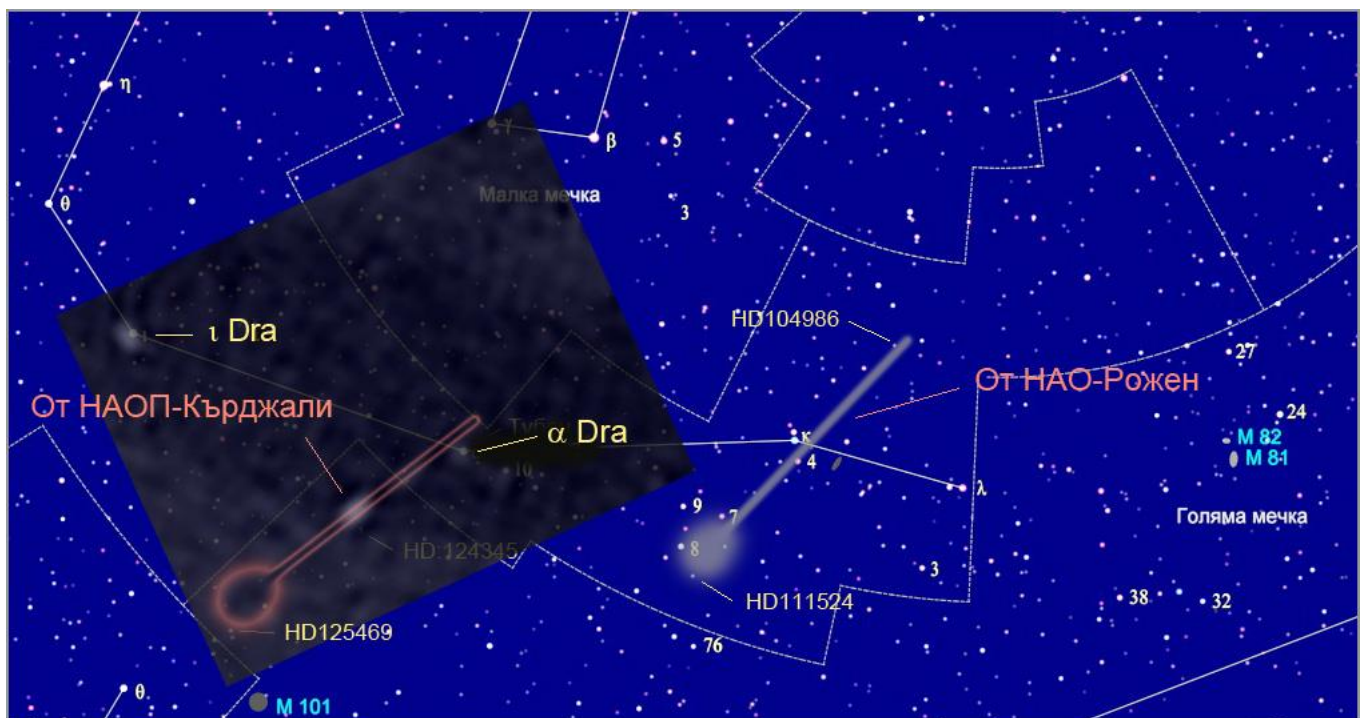
По аналог с видимите размери на метеорната следа, заснета от НАО (видимата дължина) и при взета нейна ориентация от снимката (позиционен ъгъл – след налагане на снимката върху карта), за НАОП-Кърджали експлозията би следвало да се наблюдава видимо близо до звездата HD125469 от Голяма мечка, която в указания момент е била на височина  $15^{\circ} 24' 51.5''$  ( $15.414306^{\circ}$ ) и на геод. азимут  $333^{\circ} 44' 44.1''$  ( $333.745583^{\circ}$ ).

Екваториални координати на HD125469 за J2000:

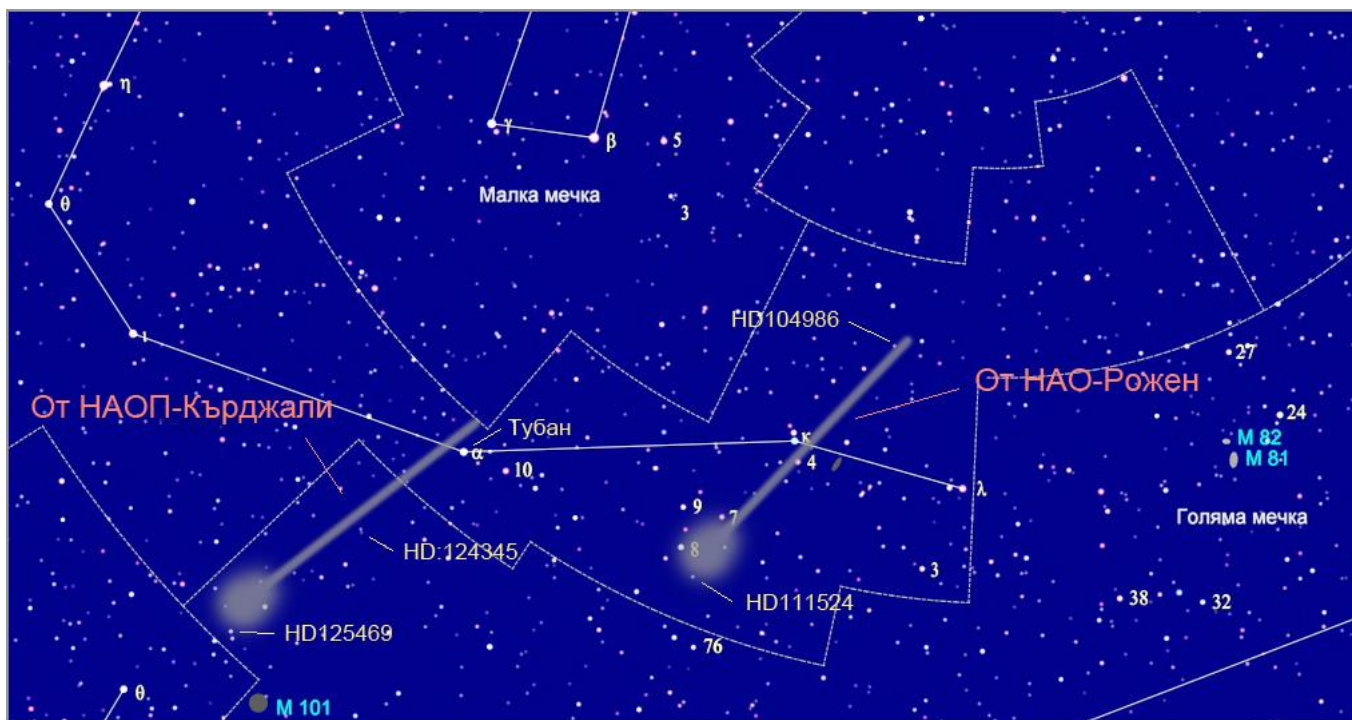
RA: 14h 17m 47.931s, DE:  $+55^{\circ} 25' 31.19''$



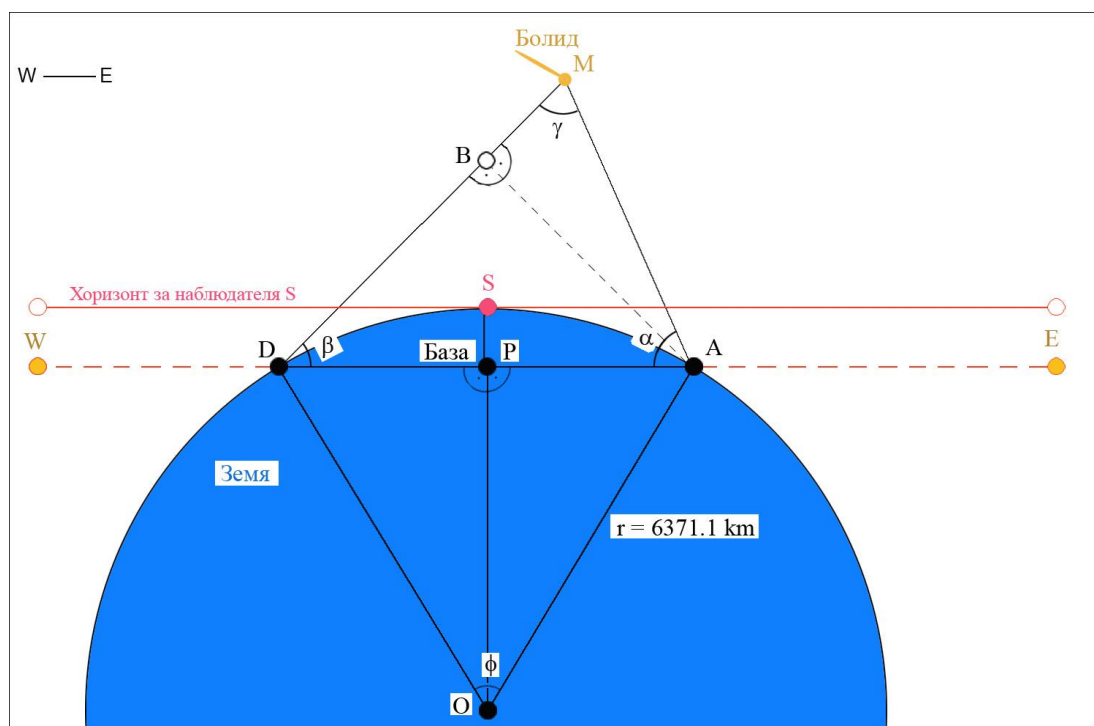
Увеличен фрагмент от снимката от НАОП-Кърджали – вижда се само част от траекторията на болида



Налагане на полупрозрачна снимка върху карта – етап 2: болидът заснето от НАОП-Кърджали



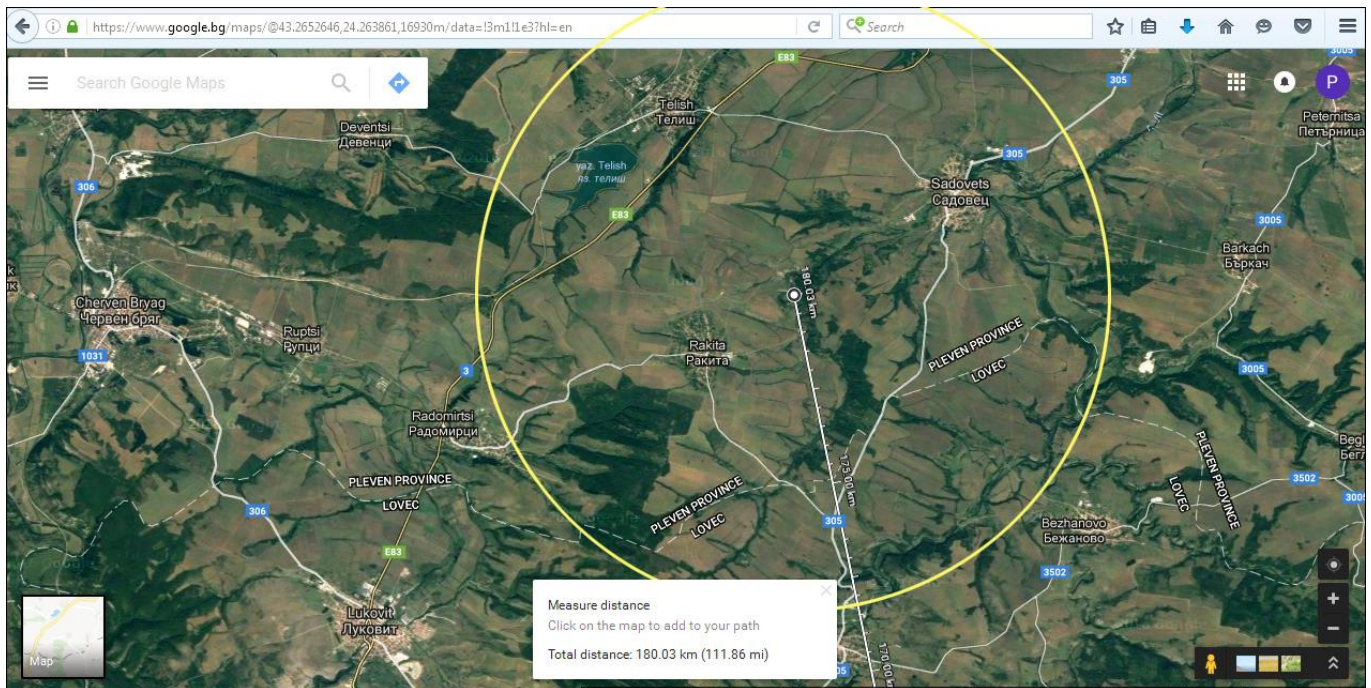
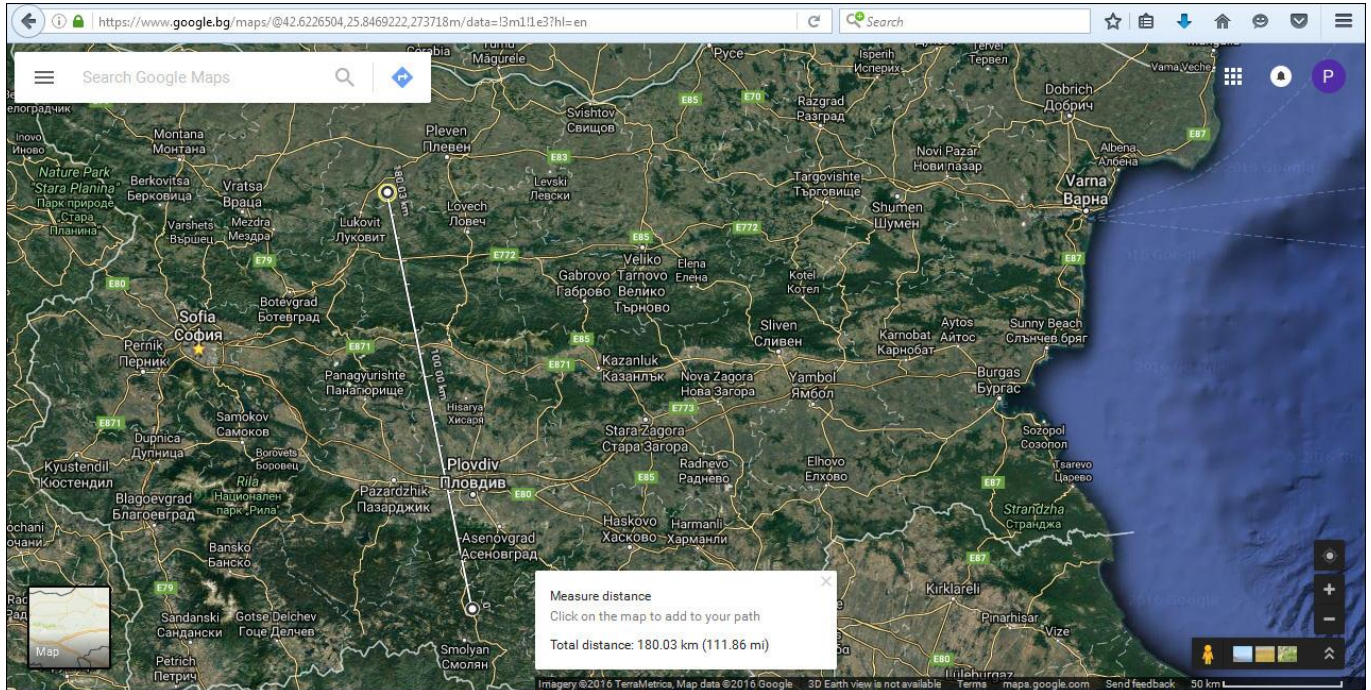
Етап 3, позициите на болида заснети от двата пункта



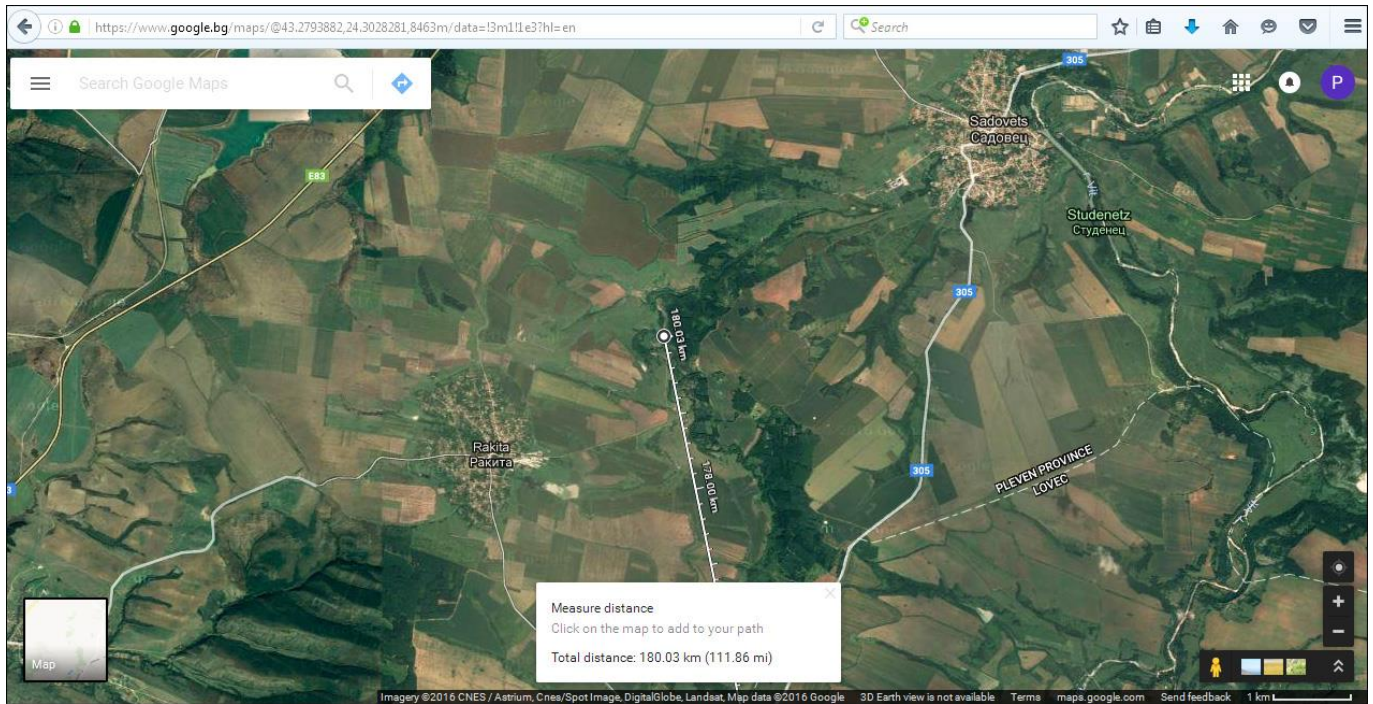
### Резултати

Ъгли получени от симулациите:  
 Гама, при взрива на болида:  $14^{\circ} 20' 19''$ ,  
 Бета, при НАО-Рожен:  $106^{\circ} 58' 51''$ ,  
 Алфа, при НАОП-Кърдж.:  $58^{\circ} 42' 48''$ .

Болидът се е взривил на 60 km височина, над местност, отдалечена от НАО-Рожен на 180 km, в посока 348.153° геод. азимут (север-северозапад), в района на селата Ракита и Садовец, област Плевен, на около 17 km източно от гр. Червен бряг (жълтата окръжност в картите по-долу покрива район с диаметър 15 km).

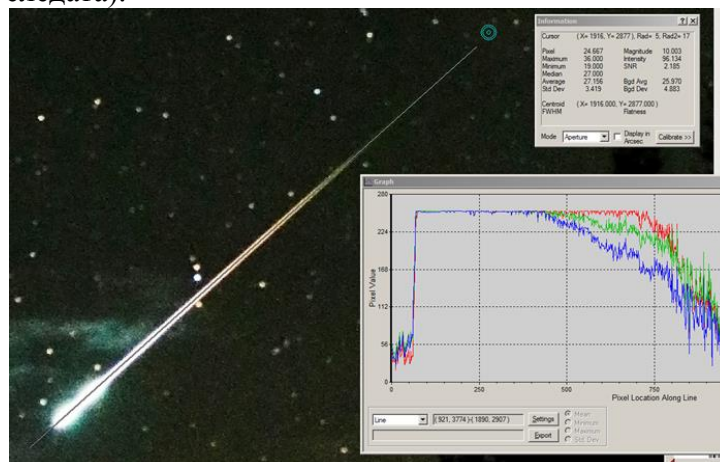






### Физически параметри на регистрирания болид

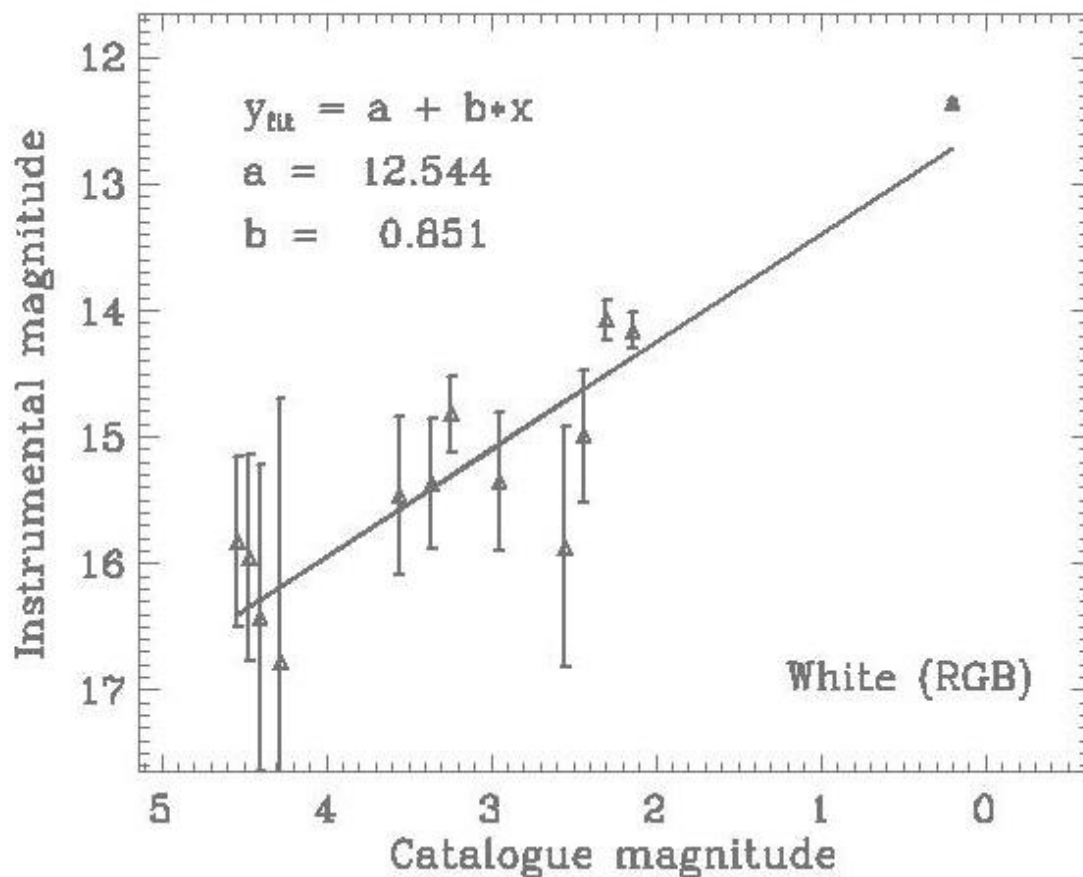
За определяне на физическите параметри на болида бе извършена фотометрична калибровка, като за целта бяха използвани звезди от кадрите. Направен бе опит за фотометрия по следата на снимката, получена от Виктория Мирчева. Този кадър, записан в jrg-формат, се оказа негоден за целта, поради ограниченията на формата (всеки от трите цвята е оцифрован с дълбочина 8 бита, което води до преекспониране на ярката част на следата).



Фотометриране на следата на болида. Вградената трицветна графика показва интензитета в трите цвята. Очевидно ярката част на следата на болида е преекспонирана

На следващия етап фотометрия на болида бе извършена по кадрите, записани във FITS-формат, използвайки звезди от кадъра. Резултатът от фотометрията показва, че точността на измерване на звезди по-слаби от 2.5 звездна величина е с много ниска точност. По тази причина за получаване на яркостта на болида бяха използвани само най-ярките звезди в кадъра. Вземайки предвид, че експозицията

на кадъра е 300 s, а ефективната експозиция на болида е 0.01 s (честота на обтуратора = 10 Hz, дължина на последния участък на следата: 10 px), към калибровката по звезди трябва да добавим 13.7 звездни величини (=  $2.5 \cdot \lg(300/0.01)$ ). Така фотометрията на болида с отчитане на калибровката и на корекцията за експозиция дава -14 зв. вел., т.е. по време на избухването болидът е бил по ярък отколкото пълната Луна. Болиди с такава яркост имат **маса около 7-8 kg** (виж фигура 3 в главата Мотивация за изграждането на мрежа за мониторинг на метеорната активност). Ако се приеме средна стойност за плътността на болида  $1 \text{ g/cm}^3$ , това би съответствало на сферично тяло с диаметър **24 – 25 cm**.



Фотометрична калибровка, чрез използване на звезди в полето. Измерените стойности за звездите по-слаби от 2.5 звездна величина се получават с голяма грешка, затова те са изключени от калибровката при определяне параметрите на болида.

След взривяването на болида на 60 км височина, останалите от него частици с различни размери продължават бавно да потъват в атмосферата. Едрите като пясъчинки частици могат да достигнат до Земята повърхност за няколко седмици, но на субмикронните ще бъдат необходими месеци. Въпреки, че останките от този болид не представляват опасност за Земята, малките пертурбации предизвикани от тях могат да нараснат до такава степен, че след дълго време да предизвикат хаотични бурни явления в атмосферата (ефект на пеперудата).

Повече детайли за мрежата от камери за мониторинг на метеорната активност и за първите резултати, получени с нея, са представени в Приложение (доклад пред 3 конгрес по физически науки).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Договорът ВРЪЗКА МЕЖДУ АСТРОНОМИЧЕСКИТЕ ДАННИ ЗА АТМОСФЕРАТА И ЕКОЛОГИЧНИТЕ ПАРАМЕТРИ НА ВЪЗДУХА между ПУДООС и ИА с НАО даде възможност да се продължи комплексното изследване на зависимостите между качеството на въздуха в приземния слой и някои характерни особености на атмосферата във височина до няколко десетки километри. Данните за атмосферната екстинкция от астрономическите наблюдения бяха сравнени с концентрациите на прахови частици и молекули, измервани от КФС „Рожен”. Разгледани са поотделно приносите на разсейването на Рейли, на аерозолната екстинкция и на молекулярното поглъщане от озон, водни молекули и техните производни. Намерена е антикорелация между концентрацията на праховите частици с размери по-малки от 10  $\mu\text{m}$  и атмосферната екстинкция. В късовълновата част на електромагнитния спектър аерозолната екстинкция показва силни вариации по отношение на усреднените стойности за цялата земна повърхност.

С много голяма вероятност наблюдаваните значителни пикове в концентрациите на азотните окиси, измерена от КФС “Рожен”, биха могли да са резултат от залпов ефект на образуването им в средната атмосфера в интервала от един месец до около една година преди това. Това образуване може да бъде причинено от протонни изригвания от Слънцето. Този резултат е изключително ценен, тъй като чрез него се дава обяснения за естествено нарастване на концентрацията на азотните, което няма антропогенен характер. За да се стигне до окончателен и категоричен отговор на въпроса влияят ли слънчевите протонни изригвания върху фоновите концентрации на азотните окиси и до каква степен е тяхното влияние, е необходимо да се проведе анализ върху значително по-голяма съвкупност от данни. Във връзка с това е необходимо да се продължи изпълнението на задачите, свързани с този проект поне още няколко години, до края на настоящия 24-ти слънчев цикъл през 2018-2019 г.

В края на 2013 г. в НАО „Рожен” бе въведен нов, високодисперсен спектрограф. Важна характеристика на този спектрограф е, че с него става достъпен за регистрация в един кадър целия спектрален диапазон на електромагнитния спектър, вкл. и част от близката инфрачервена област – от 0.4 до 0.9  $\mu\text{m}$ . Спектрите, получавани с този прибор съдържат голям брой телурични линии, които дават възможност за проследяване на вариации в молекулярните компоненти на атмосферата. Сравняването на тези вариации с данните, измервани от КФС „Рожен” е допълнителен източник на информация за състоянието на атмосферата и качеството на въздуха в района на НАО „Рожен”. Броят на телуричните линии, които се регистрират с новия спектрограф е с около 30 пъти по-голям в сравнение в сравнение с досегашните възможности на НАО „Рожен”. Това крие огромен допълнителен потенциал за анализ на състоянието на атмосферата и по-точно на характерните за нейния състав молекулярни компоненти – озон, кислород, водни пари, хидроксилен радикал. Анализирайки телуричните линии на ивицата В на кислородните молекули показахме, че концентрацията на  $\text{O}_2$  в глобален мащаб не се променя, въпреки някои кратковременни флукуации, характерни за измервания в локални, пространствено ограничени мащаби.

Представена беше и изградената мрежа от камери за наблюдаване на цялото небе, нейните хардуерни и софтуерни характеристики, както и методите за обработка на

получените изображения. Анализирани бяха кадрите, на които беше регистриран ярък болид на 10 август 2016 г. и бяха представени резултатите от избухването на болида - височина, азимут и разстояние от камерите, яркост и свързаните с нея размер и маса.

Получените до момента резултати показаха, че дейностите заложи в договора между ПУДООС и ИА с НАО са изключително перспективни. Продължаването на тези дейности ще доведе до ново разбиране на взаимодействието между атмосферата във височина до няколко десетки километра и качеството на въздуха в приземния слой.

Интернет страници, свързани с проекта:

<http://eco.astro.bas.bg/>

и

<http://allsky.moma.bg/>