

DYNAMICS OF THE HEIGHT OF THE ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER AND ATMOSPHERIC AEROSOL IN SOFIA AND KRUMOVGRAD IN AUGUST 2024

Nikolay Kolev ¹, Plamen Savov ¹, Maya Vatzkitcheva ¹, Maria Kolarova ², Lambo Lambov ³

¹University of Mining and Geology “St. Ivan Rilski”, 1700 Sofia; E-mail: nic_k@mgu.bg

² National Institute of Meteorology and Hydrology (NIMH)

³ DPM Metals Krumovgrad, Bulgaria

ABSTRACT. The article presents results from an experimental aerosol measurement conducted in Sofia and Krumovgrad over typical summer days in August 2024. Data for aerosol concentrations measured by laser particle counters and the combined effect of the diurnal variation of the atmospheric boundary layer height, meteorological parameters, and hourly variations on the concentrations of the aerosol fractions are discussed. WRF-GDAS and HYSPLIT models were used to determine the height of the atmospheric boundary layer (ABL) and to track the air mass transfer. The atmospheric boundary layer is the part of the troposphere that extends from the Earth's surface and ranges in height from a few hundred meters to 1–2 km. Exchange processes within the ABL include friction, evaporation and condensation, heat exchange, pollutant emissions, and changes in airflow characteristics influenced by surface roughness and terrain. During the experiment, the ABL height varied between 1,500 and approximately 3,000 meters, reflecting the specific orography of the regions, climatic and meteorological factors, and the synoptic situation. The measured concentrations of PM10 in Sofia ranged from 1 to 20 µg/m³, and in the Krumovgrad region between 1 - 10 µg/m³, which can be considered as background for the study areas.

Key words: atmospheric boundary layer (ABL), particulate matter concentrations, WRF-(GDAS) and HYSPLIT models

ДИНАМИКА НА ВИСОЧИНАТА НА АТМОСФЕРНИЯ ГРАНИЧЕН СЛОЙ И АТМОСФЕРНИЯ АЕРОЗОЛ В СОФИЯ И КРУМОВГРАД ПРЕЗ АВГУСТ 2024

Николай Колев ¹, Пламен Савов ¹, Майя Вацкичева ¹, Мария Коларова ², Ламбо Ламбов ³

¹ Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

² Национален институт по метеорология и хидрология (НИМХ)

³ ДПМ Металс Крумовеград, България

РЕЗЮМЕ. В статията са представени резултати от експериментална кампания на аерозолни измервания, проведена в София и Крумовград от типични летни дни на 2024 г. Обсъждат се данни от лазерни броячи на частици и комбинирания ефект от развитието на височината на атмосферния граничен слой, метеорологичните параметри и дневните вариации в концентрациите на аерозолните фракции. За определяне на височината на атмосферния граничен слой (АГС) и за проследяване на преноса на въздушни маси са използвани моделите WRF-GDAS и HYSPLIT. Атмосферният граничен слой е част от тропосферата, която започва от земната повърхност и се изменя от няколко стотин метра до 1-2 км. Процесите на обмен в АГС включват триене, изпарение и кондензация, топлообмен, емисии на замърсители и промени в характера на въздушния поток, повлияни от грападостта и релефа. По време на експеримента височина на АГС варира от 1500 до около 3000 метра, което отразява специфичната орография на районите, климатичните и метеорологични фактори, както и синоптичната обстановка. Измерените концентрации на PM10 в София са от 1 до 20 µg/m³, а в района на Крумовград между 1 - 10 µg/m³, което можем да определим като фоново за районите на изследването., варира от 1500 до 3000 м през различните експериментални дни.

Ключови думи: атмосферен граничен слой (АГС), концентрации на частици, модели WRF-(GDAS) и HYSPLIT

Въведение

Изследване на атмосферния аерозол и височината на атмосферния граничен слой в София и Крумовград през юли 2017 г е продължено в настоящото проучване през лятото на 2024 г. Височината на атмосферния граничен слой (АГС) оказва влияние върху концентрацията на фините прахови частици (ФПЧ), като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Измерените нива на масовата концентрация на ФПЧ10 в диапазона 10 µm за района на София са 4 – 5 пъти по високи от концентрациите на ФПЧ10 за района на Крумовград през юли 1917 г. Височината на Атмосферният граничен слой над Крумовград по моделни данни е по висока от височината на АГС над София за същите дни с 200-300 метра, като това се дължи вероятно на по-южното разположение на града спрямо София и по-високите температури на въздуха, които създават по-висок слой на АГС. (Kolev et al., 2025). София и Крумовград предлагат интересни контрасти: София (градска среда с голямо натоварване на фините прахови частици) и Крумовград

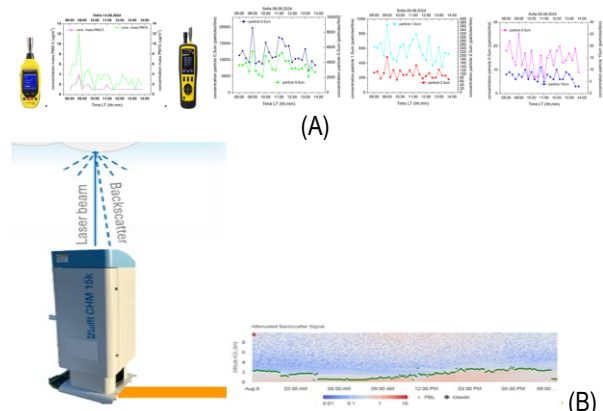
(регион с по-слабо индустриално влияние, но характерен с дългосрочни екологични проучвания около минен обект), което позволява да се анализират различни аерозолни източници и тяхното поведение в АГС. В диапазона 10–30 км, (често определян като мезомащабен), дневните изменения в структурата на АГС (напр. височина на смесващия слой) имат водеща роля, докато при по-големи разстояния (над 100 км) от значение са синоптичните процеси. (Stull, 1988; Оке, 1987). (Savov et al., 2021). Прахта (фините прахови частици – ФПЧ) е един от основните замърсители на въздуха, като основните й източници са промишлеността, транспорта и енергетиката. (Kolev et al., 2019, 2024). Главна част от аерозоли остават в тропосферата, като 80% от тях се локализира на височината на атмосферния граничен слой. Основните параметри определящи поведението на праха са: концентрация, размери, форма, специфично тегло и химичен състав на дисперсната фаза. ФПЧ10 и ФПЧ2.5 се емитират главно от индустрията и от автомобилния транспорт (Vatzkitcheva et al., 2020). Изследванията в Крумовград в близост до мината „Ада тепе“ имат и друг

интересен аспект, подобна мина е съществувала и в древността приблизително през бронзовата епоха (15 век) преди Христа, като добиваното злато е една много интересна хипотеза за древния рудодобив (Marinova K. et al., 2018, Tomova, M., et al., 2025, Kisyov At. et al., 2025).

Експериментални данни

Измерванията са проведени от 06.08.2024 до 14.08.2024 г. в районите на гр. София и гр. Крумовград. Масовата концентрация на ФПЧ е измерена с преносими лазерни броячи на частици BQ20 – Trotec (Фиг. 1А), измерващи в два канала: **канал 1** (0 – 2,5 μm) и **канал 2** (2,5 – 10 μm), обозначени по-нататък в текста съответно като PM2,5 и PM10. PC200 – Trotec (Фиг. 1А) – брояча на частици измерва запрашеността с помощта на 6 входящи канала за измерване на прахови частици с големина 0.3 μm , 0.5 μm , 1.0 μm , 2.5 μm , 5.0 μm и 10.0 μm .

Измервания с облакомер Ceilometer (CHM 15k), (Фиг. 1.В), разположен в ИЕ-БАН в София със спецификации: източник на светлина – Nd:YAG лазер с дължина на вълната 1064 nm за определяне на височината на АГС (Dreisshuh et al., 2016; Peshev et al., 2023).



Фиг. 1. Уреди за измерване: А) лазерни броячи на ФПЧ; В) сейлометър CHM 15k (облакомер);

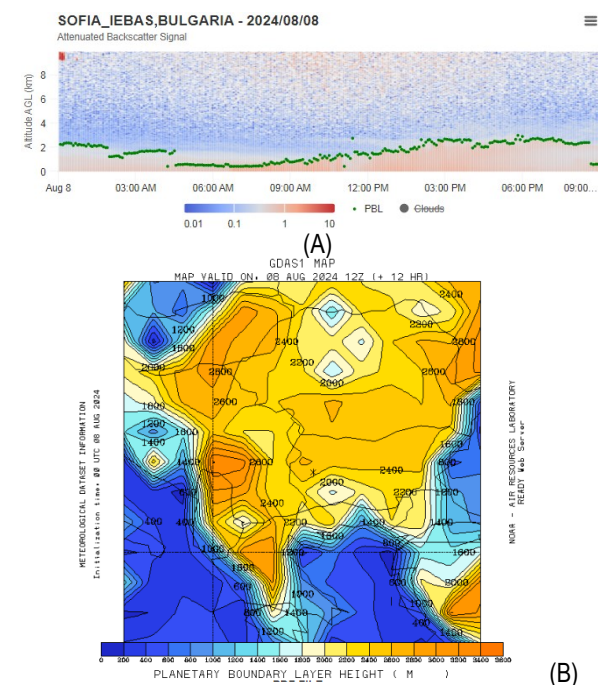
В настоящото проучване използвахме Ceilometer Lufft CHM 15k, който използва LiDAR (Light Detection and Ranging) технология, както е показано на Фиг. 1В. Това устройство излъчва кратки светлинни импулси от микроchip с твърдотелен лазер, които се разпръскват от частици като аерозоли, водни капчици и други молекули в атмосферата. Частта от отразената светлина, наречена обратно разсейване, се анализира от Ceilometer. Чрез измерване на времето, необходимо на лазерните импулси да се върнат, устройството определя разстоянието до разсейващите частици. Профилът на височината на отразените сигнали след това се използва за получаване на интензитета на обратното разсейване, който с помощта на валидна калибровъчна константа се преобразува в коефициента на отслабено обратно разсейване. От тази информация се определят различни атмосферни параметри, включително височината на облаците и разпределението на аерозолния слой. Тясната честотна лента на лазера позволява поставянето на оптичен филтър от приблизително 1 nm пред детектора, което значително намалява фоновия шум. Използва се

осредняване на сигнала за подобряване на съотношението сигнал/шум, което е от решаващо значение за измерванията базирани на лидар, и за получаване на подробни аерозолни слоеве и определяне на височината на атмосферния граничен слой (АГС). Метеорологичните параметри са измервани със станция PCE-FWS 20-1, позволяваща точно измерване на посоката и скоростта на вятъра, на температурата и относителна влажност на въздуха на височина от земята 1м. Използвани са моделите HYSPLIT и WRF-GDAS, разработени от ARL-NOAA, с помощта на които се определя по моделни данни височината на АГС за двата града и се сравнява с резултатите получени от сейлометъра.

Дискусия и анализ на данните

Данните от измерванията и анализа са за периода 06.08.2024 – 14.08.2024г., като са разгледани по задълбочено два дни с подходящи типично летни условия.

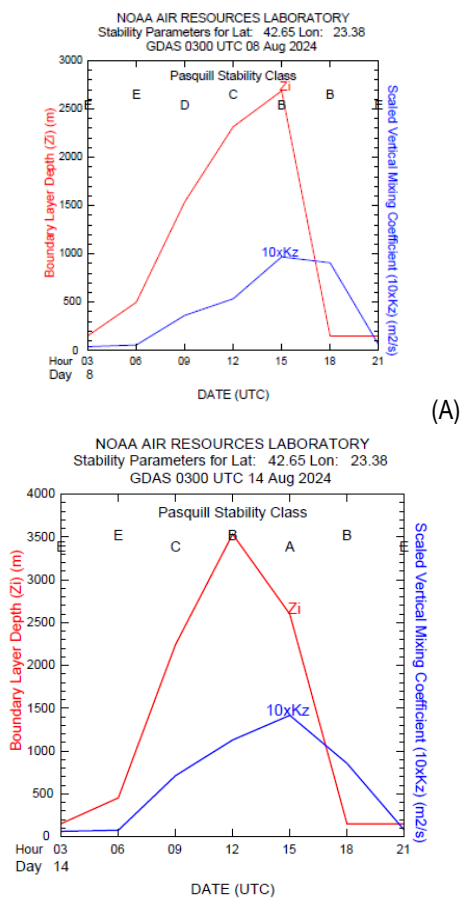
На фигура 2 е дадена височината на Атмосферният граничен слой в района на София (42.65N, 23.38E), Институт по Електроника, БАН определена от данни на облакомер Ceilometer (CHM 15k), за ясен слънчев ден със скорост на вятъра 1-2 m/s. На (Фиг. 2.А) от 08.08.24 височина на АГС в 15:00 PM (15 UTC + 3 часа локално време) е около 2600 m. На (Фиг. 2В) от 08.08.24 височината на АГС за София е около 2400 m – GDAS1 MAP – NOAA-ARL – Ready Web Server.



Фиг. 2. Сигнал от облакомер CHM 15k, получени на 08.08.2024 (А) в София и (В) карта на развитието на Атмосферният Граничен слой за България (GDAS1 MAP) на 08.08.2024 по данни на GDAS1 – HYSPLIT – NOAA-ARL-Ready Web Server

На фиг. 3 са представени височините на Атмосферния граничен слой по моделни данни (WRF-GDAS американски модел, разработен от ARL- NOAA) за два избрани дни в района на град София. Височината на АГС за 08.08.24

достига 2400m за 12:00 UTC (15:00 LT), а за 14.08.24 максималната височина на АГС е 3500m. Между моделните данни и данните получени за височина на АГС от облакомер Ceilometer (CHM 15k), има а разлика от 200 m, което е грешка в рамките на 10%, добър резултат при ясни слънчеви дни без вятър.

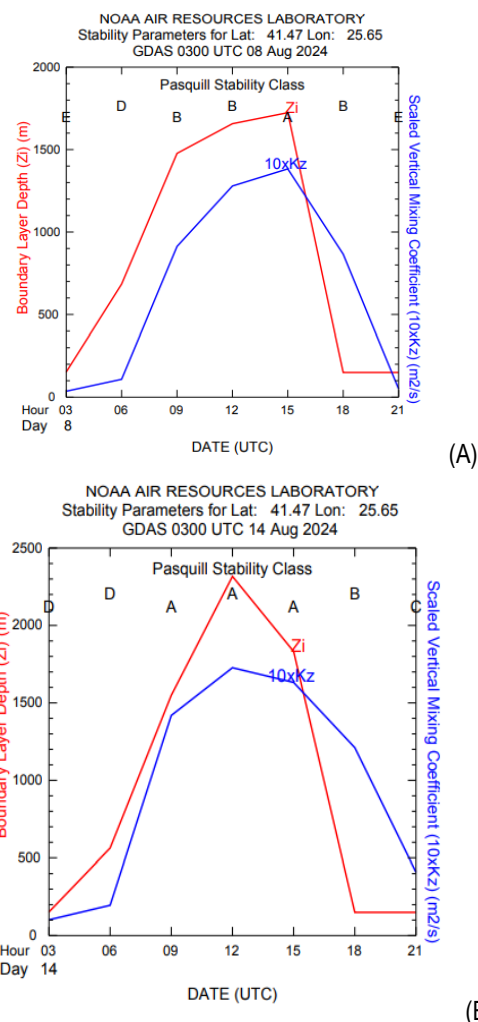


Фиг. 3. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС (Zi) на 08.08.2024 (A), 14.08.2024 (B), за (42.65N, 23.38E) София

На фигура 4 са представени моделни резултати за дневния ход на височината на атмосферния граничен слой (Zi) в Кривопград (41.47N, 25.65E) по моделни данни за двата дни на месец август 2024. Максималната височина на АГС на 08.08.2024 (Фиг. 4A) е около 1700 m в 12:00 UTC (15:00 LT), а на 14.08.2024 (Фиг. 4B) максимална височина на АГС в 12:00 UTC (15:00 LT) достига 2300 m.

Максималната височина на АГС в 12 UTC (15:00 LT) по данни от WRF-GDAS, с помощта на които се определя по моделни данни височината на АГС в София (42.65N, 23.38E) и Кривопград (41.47N, 25.65E) на 08.08.24 е съответно 2400m за София и 1700m за Кривопград.

На 14.08.24 височина на АГС за София е 3500m и 2300m за Кривопград. Отбелязват се по-високи стойности на височината на АГС за София в сравнение с Кривопград. За тези дни са измерени и едни от най-високите максимални температури в страната - 35°C и 33°C за София и Кривопград (горещници) (Draxler, 1979; Draxler, et al. 1998; Stein et al., 2015).



Фиг. 4. Модел WRF-GDAS - прогноза за височината на АГС на 08.08.2024 (A), 14.08.2024 (B), (41.47N, 25.65E) Кривопград

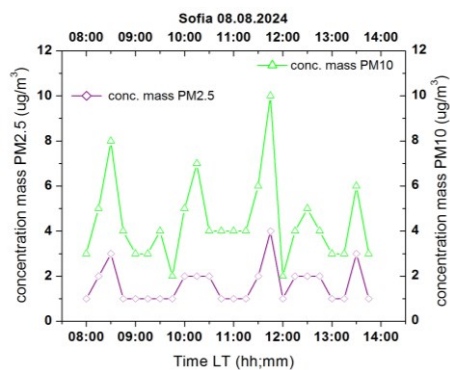
Измерените на 8 и 14 август концентрации на ФПЧ (PM_{2.5} и PM₁₀) за София и Кривопград са представени на фиг. 5 и фиг. 6.

На фиг. 5 е представен дневния ход на масовата концентрация на ФПЧ с размери 10 µm и 2.5 µm, за София (A) и (B) и за Кривопград (C) и (D).

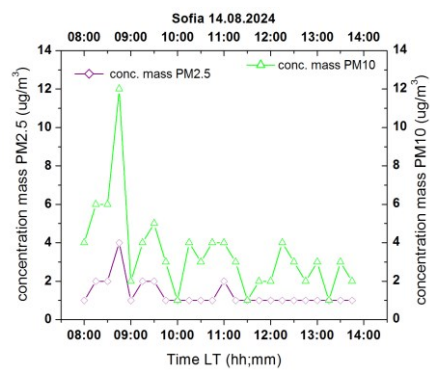
Измерената концентрация на (PM₁₀) за София на 08.08.2024 варира в диапазона от 8-10 µg/m³ в 09:00 LT до 3 µg/m³ в 12:00 LT, и от 12 µg/m³ сутрин до 2 µg/m³ следобед на 14.08.2024. Концентрацията на (PM_{2.5}) е от 3 µg/m³ сутрин до 1 µg/m³ следобед за 08.08.2024 и от 4 µg/m³ сутрин до 1 µg/m³ на 14.08.2024.

Концентрацията на PM₁₀ за Кривопград на 08.08.2024 е в диапазона от 10 µg/m³ до 1 µg/m³, а на 14.08.2024 е от 6 µg/m³ сутрин до 1 µg/m³ следобед. Концентрацията на (PM_{2.5}) и от 26 µg/m³ сутрин до 2 µg/m³ следобед за 08.08.2024, а на 14.08.2024 от 6 µg/m³ до 1 µg/m³.

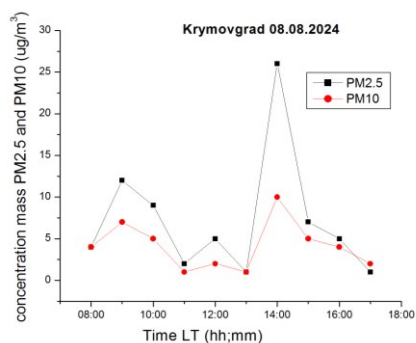
На фиг. 6 е представена измерената в София аерозолна концентрация на частици с размери 0.3µm, 0.5µm, 1.0µm, 2.5µm, 5.0µm и 10.0µm - на 08.08.2024 (A), (B), (C) и на 14.08.2024 (D), (E), (F).



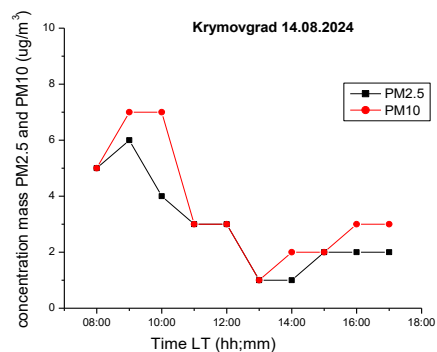
(A)



(B)

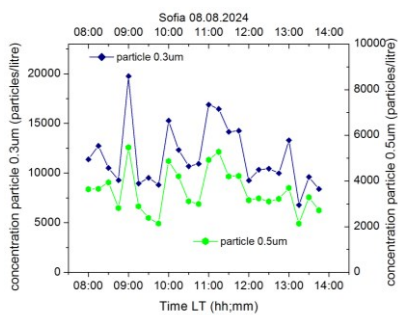


(C)

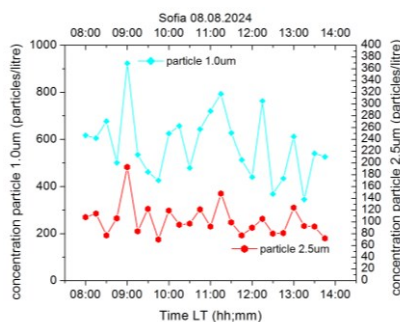


(D)

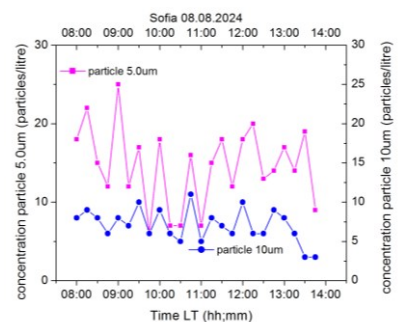
Фиг. 5. Концентрация фини прахови частици PM2.5 и PM10 на 08.08.2024 (A), (C); 14.08.2024 (B), (D), в София и Крумовград



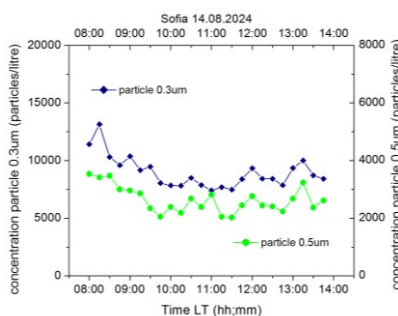
(A)



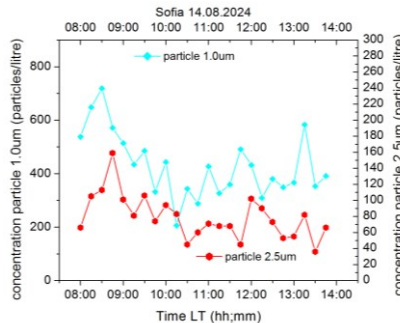
(B)



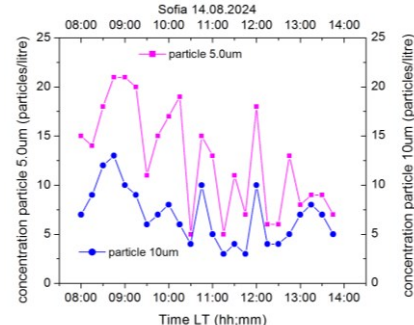
(C)



(D)



(E)



(F)

Фиг. 6. Концентрация фини прахови частици за размери от 0.3µm, 0.5µm, 1.0µm, 2.5µm, 5.0µm и 10.0µm на 08.08.2024 (A), (B), (C) и 14.08.2024 (D), (E), (F) в София

Концентрацията на 08.08.2024 на $0.3\mu\text{m}$ - $0.5\mu\text{m}$ за София варира в диапазона от 20000-7000 particle/litre за $0.3\mu\text{m}$ и 12000-5000 particle/litre за $0.5\mu\text{m}$ на 08.08.2024, Концентрацията на $1.0\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$ за София варира от 900-300 particle/litre за $1.0\mu\text{m}$ и 450-200 particle/litre за $2.5\mu\text{m}$. Концентрацията на $5.0\mu\text{m}$ - $10.0\mu\text{m}$ за София варира от 25-10 particle/litre за $5.0\mu\text{m}$ и 10-3 particle/litre за $10.0\mu\text{m}$.

Концентрацията на 14.08.2024 на $0.3\mu\text{m}$ - $0.5\mu\text{m}$ за София варира в диапазона от 13000-10000 particle/litre за $0.3\mu\text{m}$ и 9000-6000 particle/litre за $0.5\mu\text{m}$ на 14.08.2024, Концентрацията на $1.0\mu\text{m}$ - $2.5\mu\text{m}$ за София варира от 700-200 particle/litre за $1.0\mu\text{m}$ и 500-100 particle/litre за $2.5\mu\text{m}$. Концентрацията на $5.0\mu\text{m}$ - $10.0\mu\text{m}$ за София варира от 20-5 particle/litre за $5.0\mu\text{m}$ и 12-3 particle/litre за $10.0\mu\text{m}$.

Бройната концентрация на прахови частици с размери $0.3\mu\text{m}$, $0.5\mu\text{m}$, $1.0\mu\text{m}$, $2.5\mu\text{m}$, $5.0\mu\text{m}$ и $10.0\mu\text{m}$ на 08.08.2024 и на 14.08.2024 в София добре корелира с височината на АГС за двата дни и съответно за втория ден концентрацията е по-ниска от първия, докато височината на АГС за втория ден е по-висока от височината на първия експериментален ден. Потвърждава се тезата че височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на финни прахови частици.

завършващи над София и над Крумовград на: 08.08.2024 (А), 14.08.2024 (В), на височини 1500, 2000, 2500 и 3000 m. Преноса на въздушните маси за 72 часа от север, Полша, Чехия, Унгария, Румъния и България, а за 14.08.2024 е от север и северзапад от, Германия, Чехия, Унгария, и от североизток – над Румъния, Черно море и България.

Температурата е в интервала от 22°C до 36°C , а относителната влажност е от 55% до 11% за София на 08.08.2024, а за Крумовград – от 16°C до 33°C , относителната влажност е от 50% до 17%.

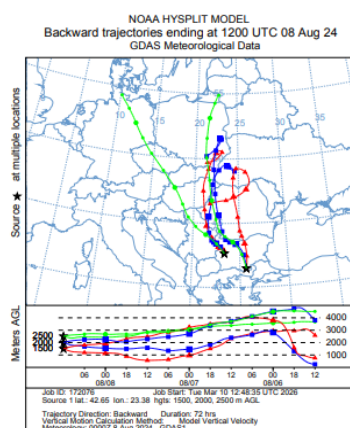
6–8.VIII: В първия ден от периода през Балканския полуостров преминава барична долина и лежащият в нея студен атмосферен фронт. На 7.VIII след изтеглянето на баричната долина от запад временно израства баричен гребен и се установява предимно слънчево време. След изясняването в котловините и по високите полета на 8.VIII дневните температури се повишават. В периода 11–14.VIII: Баричното поле е антициклонално, а времето е предимно слънчево и горещо. В края на периода налягането се понижава и полето се трансформира в размито циклонално. (Месечен бюлетин на НИМХ, август 2024).

Скоростта на вятъра е между 1-3 m/s, като преобладава вятъра от северна посока.

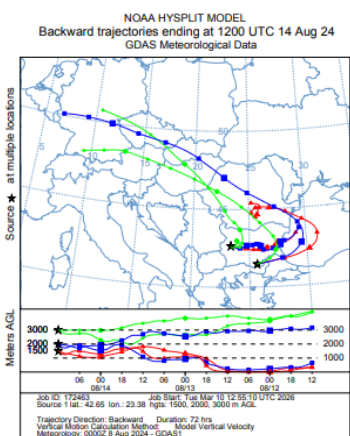
Заклучение

Това изследване представя резултати от комплексни експерименти в София и Крумовград за оценка на връзката на АГС и оптичните характеристики на атмосферния аерозол с помощта на устройства за дистанционно наблюдение, измервания на място и моделни данни. За двата града наблюдаваната височина на АГС варира от 2300 до 3500 m за експерименталните дни. По време на експерименталните изследвания измерените концентрации на частици (PM10) в София са от 10 до $3\mu\text{g}/\text{m}^3$. За района на Крумовград те са между 6 - $1\mu\text{g}/\text{m}^3$, които могат да се разглеждат като фоново ниски, измерванията са направени по време на експлоатацията на мината „Ада тепе“ 08.08.2024 и 14.08.2024. Резултатите от експеримента в София и Крумовград през месец юли 2017 г. и август 2024 показват връзката на АГС и микрофизични характеристики на атмосферния аерозол. Височината на атмосферния граничен слой оказва силно влияние върху концентрацията на финни прахови частици, като с повишаване на височината на АГС концентрацията на PM10 бързо намалява. Измерените нива на масовата концентрация на финните прахови частици в диапазона PM10 за района на София са 1.5 пъти по високи от концентрациите на ФПЧ10 за района на Крумовград. Височината на Атмосферният граничен слой над София по моделни данни е по висока от височината на АГС над Крумовград за същите дни с около 700 метра, като това се дължи вероятно на по-високите температури на въздуха, които генерират по-висок слой на АГС. (горещници август 2024г).

Изследванията в Крумовград в близост до мината „Ада тепе“ имат и друг аспект, подобна мина е съществувала и в древността приблизително през бронзовата епоха (15век) преди Христа, древния рудодобив по тези места е с много богата история. (Marinova K. et al., 2018, Tomova, M., et al., 2025, Kisyov At. et al., 2025)



(A)



(B)

Фиг. 7. Обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT, завършващи над София и над Крумовград на: 08.08.2024 (А), 14.08.2024 (В), на височини 1500, 2000, 2500 и 3000 m

На фигура 7 са представени обратни траектории на въздушните маси, изчислени от модела HYSPLIT,

Благодарности

Настоящото изследване е проведено във връзка с изпълнението на: Дог. ГПФ №261, на 30.03.2026 г. НИС-МГУ „Апробирание на методика за Мултиканален анализ на повърхностни вълни (Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW) и определяне на някои геоинженерни параметри с помощта на геофизични методи“, Ръководител: доц. д-р Мая Томова - катедра „Приложна геофизика“, научен колектив: проф. д-р П. Савов, доц. д-р Мая Вацкичева, доц. д-р Николай Колев, гл. ас. д-р Атанас Кисъов, гл. ас. д-р Християн Цанков, ас. Богдана Миленкович. Авторите изказват благодарност на NOAA Air Resources Лаборатория (ARL) за предоставяне на моделите WRF-GDAS и HYSPLIT, използвани в тази публикация. Авторите изказват благодарност на компанията ДПМ Металс Крумовград, България за предоставените данни, информация и подкрепата на мината „Ада тепе“ Крумовград. Авторите изказват благодарност още на Tanja Dreischuh and ACTRIS BG, part of the National Roadmap for Research Infrastructure, Grant Agreement No. 871115 (ACTRIS IMP).

Литература

Draxler, R. R. (1979). Estimating vertical diffusion from routine meteorological tower measurements, *Atmospheric Environment*, 13 (11) 1559-1564.

Draxler, R.R. & Hess, G.D. (1998). An overview of the HYSPLIT_4 modelling system for trajectories. *Australian meteorological magazine*, 47 (4), 295-308.

Dreischuh, T., Grigorov, I., Peshev, Z., Deleva, A., Kolarov, G. & Stoyanov, D. (2016). Lidar Mapping of Near-Surface Aerosol Fields, *Aerosols Science and Case Studies*, 85-110.

Peshev, Z., Chaikovsky, A., Evgenieva, Ts., Pescherenkov, V., Vulkova, L., Deleva, A. & Dreischuh, T. (2023). Combined Characterization of Airborne Saharan Dust above Sofia, Bulgaria, during Blocking-Pattern Conditioned Dust Episode in February 2021, *Remote Sens.*, 15, 3833, 1-33.

Kolev, N., Savov, P., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D., Vladkova, B. & Toncheva, S. (2019). The impact of outdoor mining activities on atmospheric air quality in nearby settlements. *J. of Mining and Geological Sciences*, 62 (2) 45-49.

Kolev, N., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D., Gogureva, A. & Atanasov, A. (2024). Analysis of the Atmospheric Air Quality over the Sofia - East Thermal Power Plant, *J. of Mining and Geological Sciences*, 67, 42-47, ISSN 2738-8816 (online).

Kolev, N., Savov, P., Vatzkitcheva, M., Kolarova, M., Lambov, L., Vasilev, Zh (2025). Measurement of Atmospheric Aerosol and Atmospheric Boundary Layer Height in Sofia and Krumovgrad in July 2017, *J. of Mining and Geological Science*, 68, 144-149, ISSN 2738-8816 (online)

Kisyov At., M. Tomova, and Iv. Koprev, (2025) Geophysical Methods for Optimizing Mining Waste Management, *EnviroRISks 2024*, LNNS 883, pp. 204–209, 2025, https://doi.org/10.1007/978-3-031-74707-6_22

Marinova K., St. Pristavova, (2018) Petrographic Investigation of Ceramic Artifacts from the Thracian Sanctuaries in the Eastern Rhodopes, *J. of Mining and Geological Science*, Vol. 61, Part I, Geology and Geophysics, 23-29.

Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates*, 2nd ed. London: Methuen, 435 pp.

Savov, P., Kolev, N., Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Dimitrov, D. & Vladkova, B. (2021). Urban parks and their relation to air pollution. *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia*, 64, 81-86.

Vatzkitcheva, M., Velichkova, K., Kolev, N., Savov, P. (2020). A study of horizontal distribution pattern of particulate pollutants near a highway, *Annual of University of mining and geology "St. Ivan Rilski" – Sofia*, 63, 113-117.

Tomova, M., Kisyov, At. (2025) Geophysical Evaluation of Water Drainage and Containment in a Mine Waste Storage Facility: a Comparative ERT Study, *J. of Mining and Geological Science*, 68, 61-65, ISSN 2738-8816 (online)

Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J B., Cohen, M.D. & Ngan, F. (2015). NOAA'S HYSPLIT Atmospheric Transport and Dispersion Modeling System. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 96 (12) 2059-2077.

Stull, R. B. (1988). *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, Kluwer Academic Publisher, 670 pp.

НИМХ (2024). Месечен хидрометеорологичен бюлетин на НИМХ, август 2024, София.