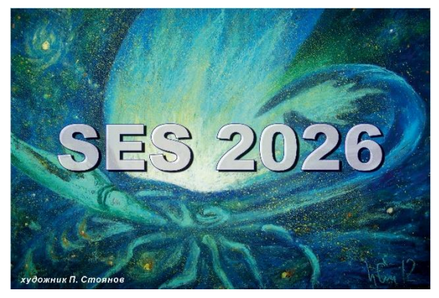
BULGARIAN ACADEMY OF SCIENCES
SPACE RESEARCH AND TECHNOLOGY INSTITUTE



ЗАПАЗВАНЕ НА ЕКСТРЕМНИТЕ ЕПИЗОДИ НА ЗАМЪРСЯВАНЕ С NO_2 ПРИ ОБЛАЧНИ УСЛОВИЯ В ДВА ЕВРОПЕЙСКИ БАСЕЙНА С АТМОСФЕРНА СТАГНАЦИЯ: СОФИЙСКАТА КОТЛОВИНА И ДОЛИНАТА НА РЕКА ПО

Пламен Тренчев, Даниела Аветисян, Елена Тренчева

Space Research and Technology Institute, Bulgarian Academy of Sciences

ptrenchev@space.bas.bg; davetisyan@space.bas.bg; etrencheva@space.bas.bg

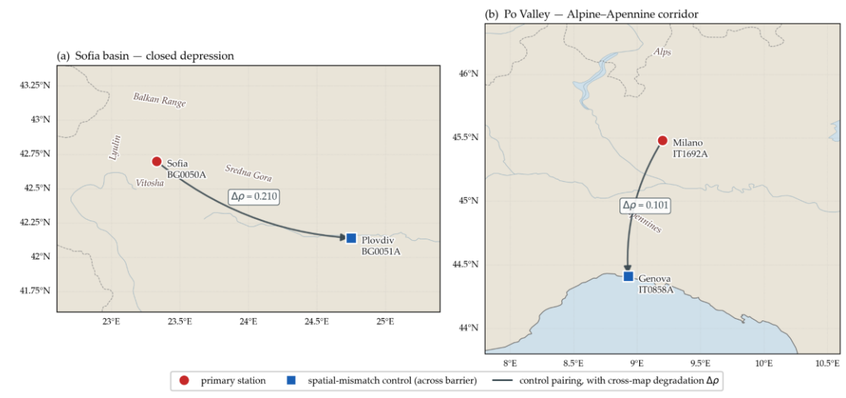
Изследователска рамка: Най-тежките епизоди на зимно замърсяване с NO_2 в затворените басейни съвпадат с температурни инверсии и продължителна облачност – точно когато липсват сателитни наблюдения. Ние разглеждаме паралелно два от най-засегнатите европейски басейни – София и Милано в долината на река По. Епизодите в тях са реконструирани чрез аналогово заключение въз основа на реконструиран атрактор и са сравнени с методите „Random Forest“, климатология, персистенция и линейна интерполация. В Милано два последователни епизода на температурна инверсия през есента на 2022 г. (наблюдавани колони от 414 и 405 μmol m^{-2}) се възпроизвеждат чрез нелинейния метод, като MOR_ext достига 0,915, докато „Random Forest“ систематично подценява всеки пик. В София всеки метод, различен от EDM, дава MOR_ext = 0,000 на ниво отделна реплика при маска MCAR (ε = 10-ти процентил, E = 3, q = 0,95). И в двата басейна предимството на RMSE спрямо „Random Forest“ при NO_2 на нивото на земната повърхност надвишава четирикратно. Контролните станции с пространствено несъответствие, разположени от двете страни на орографски бариери (Пловдив за София, Генуа за Милано), потвърждават, че реконструираната динамика е специфична за всеки басейн, а не регионална ($\Delta\rho$ = 0,210 и 0,101). По-силното разграничаване в София е в съответствие с по-затворената ѝ топография. Обсъждаме последствията за оценката на експозицията по време на епизоди, които стандартните сателитни продукти пропускат

Мотивация на изследването: Спътниковите наблюдения на NO_2 липсват точно когато са най-важни. Филтрирането за облаци премахва около две трети от пикселите на TROPOMI над Европа, съсредоточено през зимата. Условията, водещи до устойчива облачност - застой, слаби ветрове, плитък граничен слой - са същите, които предизвикват епизодите на натрупване. Липсата е структурирана: MNAR спрямо измерваната величина.

Последствието е специфично. Кригинг и регресорите от машинното обучение минимизират точкова загуба, което насочва прогнозата към условната средна. При MNAR пропуснатите наблюдения са непропорционално в горната опашка, така че моделът се обучава и възпроизвежда отрязано разпределение: гладка поредица, ниска RMSE, без епизодите. Неуспехът е структурен, не въпрос на настройка - компресията на дисперсията е правилното решение на поставената цел. Оттук хиперпараметрите не възстановяват опашката, а метрика върху цялото разпределение не открива, че тя липсва.

Затворените басейни са граничният случай: орографското ограничение прави инверсионните епизоди по-интензивни и по-устойчиви, а облачността - по-трайна. София е затворена котловина със зимни епизоди от битово твърдо гориво върху трафика. Долината на По, ограничена от Алпите и Апенините, поддържа едни от най-високите NO_2 колони в Европа при зимна стагнация.

Тук единица за анализ е басейнът, не алгоритъмът. Прилагаме публикувана рамка за нелинейна реконструкция *Trenchev et al. 2026* към двата басейна и питаме: заема ли зимният инверсионен режим отделен възстановим регион в пространството на състоянията; запазват ли се екстремните епизоди там, където базовите линии ги компресират; и специфична ли е динамиката за басейна, или е регионален сигнал. Третият въпрос се проверява с отрицателен контрол, необичаен в тази литература: реконструкцията се повтаря с наблюдения от станция отвъд орографска бариера. Метод, използващ регионална ковариация, остава незасегнат; метод, възстановяващ локалната динамика, се влошава. Контролът тества твърдението, а не го илюстрира.



Фиг. 1. Топографско положение на двата басейна с атмосферна стагнация и пространствена конфигурация на контролните станции за оценка на пространственото несъответствие.
(а) *Софийската котловина* представлява затворена топографска депресия, ограничена от Витоша на юг, Стара планина на север и Люлин планина на запад. Контролната станция Пловдив (BG0051A) се намира на 130 km в посока изток-югоизток, отвъд планинския хребет на Средна гора, в отделен подбасейн на Тракийската низина.
(б) *Западната част на долината на река По* е ограничена от Алпите на север и Апенините на юг. Контролната станция Генуа (IT0858A) се намира на 120 km южно, отвъд вододела на Апенините, на Лигурийското крайбрежие.
Кръговете обозначават основните станции, а квадратите — контролните станции. Стрелките показват съответните двойки основна–контролна станция и са придружени от стойностите на измереното понижение на корелацията при кръстосано картографиране ($\Delta\rho$), когато наземните наблюдения от основната станция се заменят с тези от съответната контролна станция.

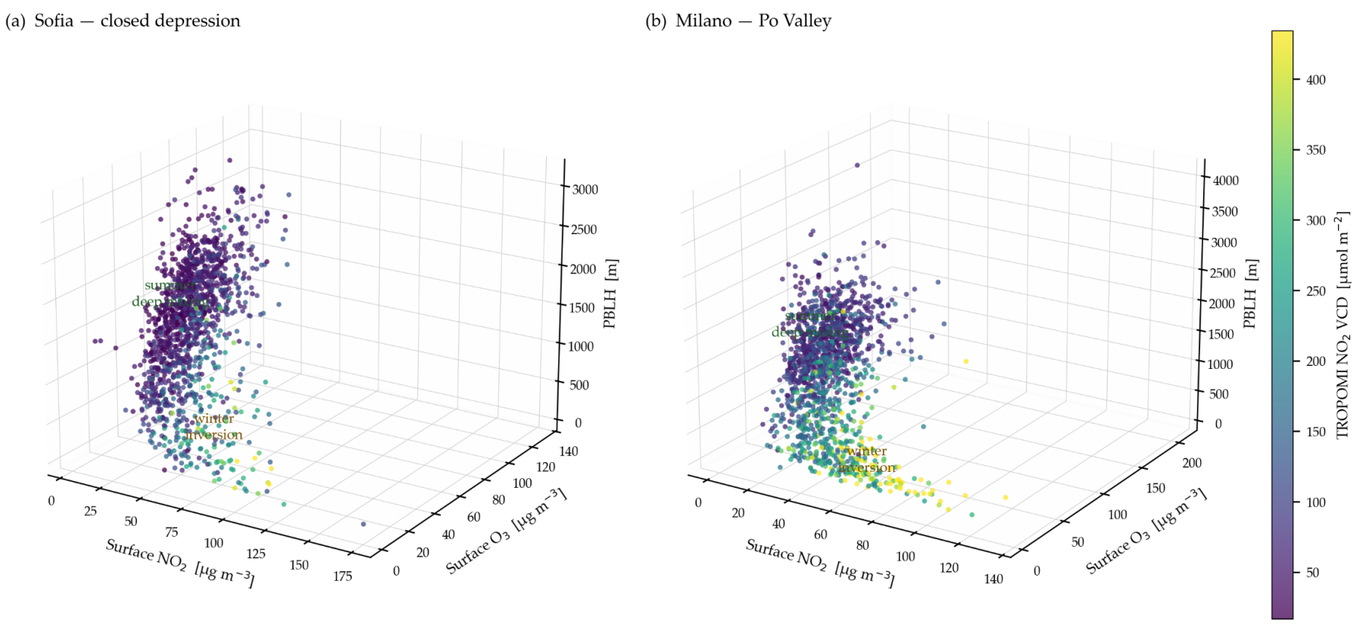
Концепция и нелинейна реконструкция: Рамката е описана изчерпателно в *Trenchev et al. 2026* ; тук се излага само необходимото за разбиране на резултатите.

Градският NO_2 се разглежда като принудена, неавтономна нелинейна динамична система. Вместо регресия от ковариати към липсващата колона, методът реконструира сенчесто многообразие на пространството на състоянията от наблюдаваните променливи и запълва празнините чрез преминаване към динамични аналози върху него. Теоретичната основа е теоремата на Такенс в многомерната форма на Дейл и Сугихара, разширена за системи с външно въздействие от Старк: такава система остава реконструируема, при условие че самите променливи на въздействието се приемат като координати на вграждане. Затова височината на граничния слой и слънчевият зенитен ъгъл влизат като изрични координати, а не като регресионни характеристики - те задържат аналозите в общ фотохимичен и смесителен режим.

MSSR генерира кандидатни вграждания от повърхностния NO_2, O_3, височината на граничния слой, компонентите на вятъра и зенитния ъгъл, и запазва най-точните чрез Simplex прогнозиране. Липсващите стойности се изчисляват като експоненциално претеглена средна върху k = 10 най-близки съседи, като отклонението при ясно небе се коригира чрез стабилизирано обратно вероятностно претегляне в теглата на аналозите - така оскъдните облачно-застойни аналози се претеглят пропорционално на обратната им вероятност за избор. Конвергентното кръстосано картографиране действа като филтър за валидност: липсва ли конвергентно сцепление между повърхностния сензор и сателитната колона, пропускът се маркира като извън многообразието и се оставя незапълнен.

Наред с RMSE и корелацията се използват две геометрични метрики. MOR_ext измерва дела на повтарящите се двойки в наблюдаваното екстремно подмножество, които се повтарят и в прогнозираната траектория (ε = 10-и процентил на разстоянията, в препоръчания диапазон 5-15% [21]; E = 3; q = 0,95). DTC измерва съгласуваността в знака на последователните прирасти. Те не са алтернативни мерки за точност, а друг въпрос към същото предсказание: RMSE пита колко далеч са реконструираните стойности от наблюденията, MOR_ext и DTC - дали траекторията посещава същата област и се движи в същата посока. Метод, минимизиращ RMSE чрез изравняване на върховете, е добър по първата мярка и лош по втората; за откриване на епизоди именно втората решава дали резултатът е използваем.

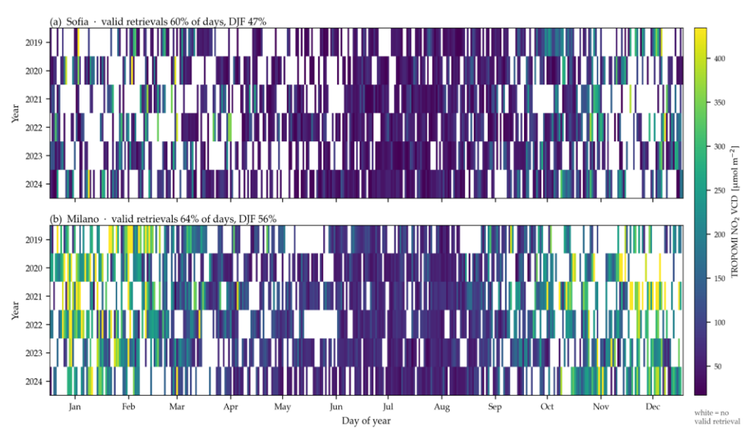
РЕЗУЛТАТИ:



Зимният режим на инверсия представлява отделна област в пространството на състоянията

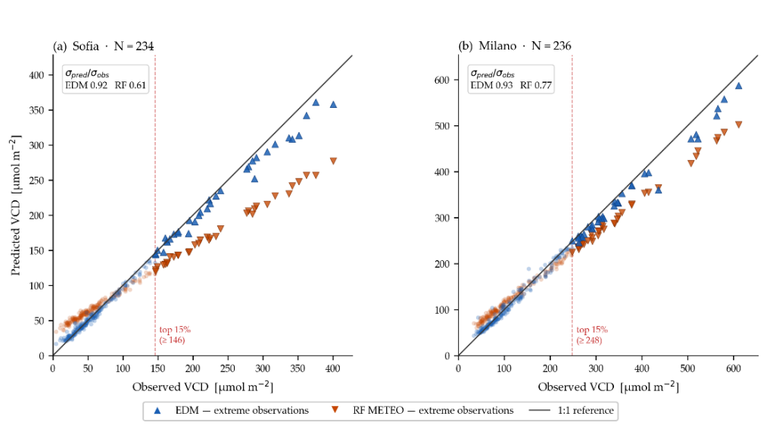
И в двата басейна реконструираното пространство на състоянията се разделя на две запълнени области, съответстващи на двата режима на вентилация. Зимният ъгъл се характеризира с ниска височина на граничния слой, високи концентрации на NO_2 на повърхността и потиснат O_3; летният ъгъл – с дълбоко смесване, ниски концентрации на NO_2 и високи концентрации на фотохимичен O_3. Оцветяването на точките от библиотеката според наблюдаваните колони на TROPOMI показва, че най-високите колони не са разпръснати из пространството на състоянията, а са концентрирани в ъгъла с ниска височина на граничния слой и високи концентрации на NO_2 (**Фигура 2**).

Разделението в София е по-компактно, отколкото в Милано, което съответства на по-малък басейн, в който една-единствена инверсия обхваща цялата градска зона, вместо да се развива като регионален басейн. Тъй като епизодите образуват режим, а не край на разпределението, аналогичните съседни области, избрани от този ъгъл, избягват притеглянето към гъстонаселения център, което ограничава глобално приспособения регресор.



Липсващите данни са съсредоточени там, където се намират епизодите

Структурата на MNAR се вижда ясно в данните за всеки ден от годината. Валидните прелитания са оскъдни от ноември до февруари и в двата басейна, като именно през тези месеци се наблюдават най-високите стойности. Пропуските не са разпределени равномерно в целия период на наблюдение; те са концентрирани именно в интервала, който определя епизодичното излагане (**Фигура 3**).



Основни научни изводи

Двата басейна дават един и същ отговор по различни пътища. И в двата зимният инверсионен режим заема отделна област в реконструираното пространство на състоянията; екстремните епизоди се запазват при аналоговата реконструкция, докато всяка точково оптимизирана базова линия ги компресира до условното средно; и отрицателните контроли през орографските бариери потвърждават, че възстановената връзка е локална за басейна, а не регионална.

Количествената разлика е информативна. Деградацията на контрола в София е двойно по-голяма от тази в Милано, а разделянето на пространството на състоянията — по-компактно. И двете следват от геометрията: малка затворена депресия допуска едно вентилационно състояние за цялата градска зона, докато басейн с размерите на долината на По поддържа вътрешни градиенти и споделя повече синоптични въздействия с околността. Предимството на метода е най-голямо именно там, където топографията е най-ограничаваща — и където епизодичната експозиция е най-тежка.

Самият дизайн на контрола заслужава внимание като преносим елемент. Проучванията за запълване на пропуски обикновено се валидират чрез изключване на наблюдения и отчитане на грешката спрямо тях — процедура, която не разграничава метод, усвоил местната динамика, от такъв, усвоил регионална климатология, споделена от всяка близка станция. Заместването с донорска станция отвъд известен физически вододел не изисква допълнителни данни и превръща това предположение в проверима прогноза, независимо от използвания метод за реконструкция.

Компресията на дисперсията разграничава методите

Механизмът е компресия на дисперсията. RF_METEO възпроизвежда съотношения на стандартното отклонение между прогнозираното и наблюдаваното от 0,61 в София и 0,77 в Милано: прогнозираната траектория е свита копия на наблюдаваната, което е достатъчно, за да се постави всяка екстремна прогноза в рамките на прага на наблюдаваните екстремни стойности и по този начин да се доведе MOR_ext до нула. Същото свиване е за сметка на точността — RMSE се повишава от 9,3 до 35,5 μmol m^{-2} в София и от 13,0 до 80,2 μmol m^{-2} в Милано — така че предимството на реконструкцията надвишава четирикратното съотношение и в двете станции, при условия, които благоприятстват базовата линия. **Фигура 5** показва това директно.