



Multilayer Open Network for Environmental and Climate Monitoring – METER.AC

Atanas Terziyski^{1*}, Stoyan Tenev¹, Vedrin Jeliaskov², Nikolay Kochev¹, Vesselina Paskaleva¹, Gergana Tancheva¹, Nikola Petrov³, Liliya Dimitrova⁴, Christo Angelov⁵, Luchezar Iliev², Nina Jeliaskova², Lyudvika Radeva¹, Emil Doychev¹ and Georgi Dimitrov¹

¹Faculty of Chemistry, University of Plovdiv, Tsar Assen 24, 4000 Plovdiv, Bulgaria

²IDEAconsult Ltd., Angel Kanchev 4, 1000 Sofia, Bulgaria

³Institute of Astronomy and National Astronomical Observatory, Bulgarian Academy of Sciences, Tsarigradsko Chaussee Blvd. 72, 1784 Sofia, Bulgaria

⁴National Institute of Geophysics, Geography, Geodesy, Bulgarian Academy of Sciences, Acad. G. Bonchev, Block 3, 1424 Sofia, Bulgaria

⁵Basic Environmental Observatory - Moussala, Institute for Nuclear Research and Nuclear Energy, Bulgarian Academy of Sciences, Tsarigradsko Chaussee Blvd. 72, 1784 Sofia, Bulgaria

Abstract: METER.AC is an open network for continuous and automated monitoring of natural phenomena and climate processes, developed in the context of citizen science and the Internet of Things (IoT). One of the hardware layers of the network consists of end devices developed by our team. In addition, METER.AC integrates numerous professional meteorological and other observation stations. The network's coverage across the country is evenly distributed and aligned with geographic characteristics to ensure better data representativeness. METER.AC collects data related to meteorology, but also air quality, radon monitoring in soil gas and mineral waters, soil data, agriculture-related parameters, and more.

Keywords: monitoring network, open data, big data, meteorology, citizen science, Internet of Things (IoT)

* atanas@uni-plovdiv.net

Многослойна отворена мрежа за наблюдение на околната среда и климата – METER.AC

А. Терзийски^{1,*}, С. Тенев¹, В. Желязков², Н. Кочев¹, В. Паскалева¹, Г. Танчева¹, Н. Петров³, Л. Димитрова⁴, Х. Ангелов⁵, Л. Илиев², Н. Желязкова², Л. Радева¹, Е. Дойчев¹, Г. Димитров¹

¹Химически факултет, Пловдивски университет „П. Хилендарски“, ул. Цар Асен 24, 4000 Пловдив

²Идеяконсулт ООД, ул. Ангел Кънчев, 1000 София

³Институт по астрономия с Национална астрономическа обсерватория – БАН, бул. Цариградско шосе 72, 1784 София

⁴Национален институт по геофизика, геодезия и география – БАН, ул. Акад. Г. Бончев, блок 3, 1424 София

⁵БЕО Мусала, Институт за ядрени изследвания и ядрена енергетика – БАН, бул. Цариградско шосе 72, 1784 София

Резюме: METER.AC е отворена мрежа за непрекъснато и автоматизирано наблюдение на природни явления и климатични процеси, и се развива в контекста на гражданската наука и интернет на нещата (IoT). Един от основните слоеве на мрежата е изграден от крайни устройства, разработени от нашия екип. Също така, към METER.AC са включени множество професионални метеорологични и други станции за наблюдение. Покритието на METER.AC в страната е равномерно и съобразено с географските особености за постигане на по-добра представителност на данните. Мрежата колекционира данни както с метеорологична насоченост, така и данни за качеството на атмосферния въздух, мониторинг на радон в почвен газ и минерални води, данни за почви, параметри със земеделска насоченост и др.

Ключови думи: мрежа, мониторинг, свободни данни, големи масиви от данни, метеорология, гражданска наука, интернет на нещата

1. ВЪВЕДЕНИЕ

Съвременните предизвикателства, свързани с разбирането на променящия се климат и изучаването на екстремни природни явления като интензивни топлинни или студени вълни, засушавания, наводнения, урагани и бури изискват дългосрочни наблюдения с висока времева и геопространствена разделителна способност. Понастоящем, в ерата на големите данни и изкуствения интелект, регистрирането на големи масиви данни може да се реализира чрез интегриран подход на усилията на академичните изследователи, регулаторните/държавните агенции и нарастващото участие на гражданската наука. Такова сътрудничество

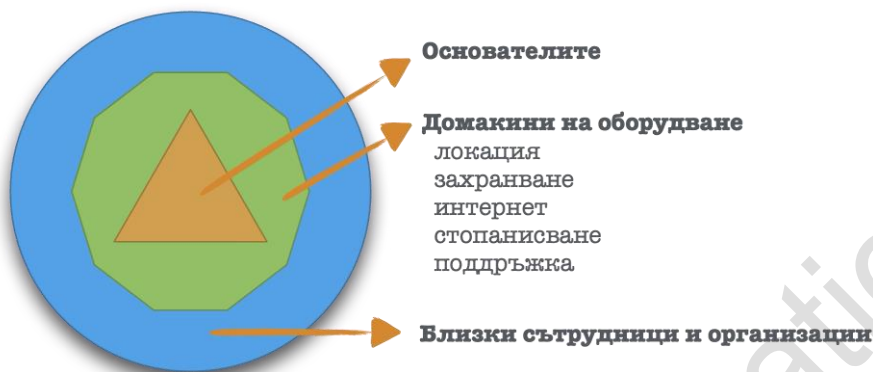
може да бъде ефективно реализирано чрез многослойна и хетерогенна мрежа от сензорни и други устройства, реализирана въз основа на парадигмата на „интернет на нещата“ (IoT). В настоящата статия представяме концепцията, архитектурата и реализацията на METER.AC - многослойна отворена мрежа за наблюдение на природни явления (Terziyski, 2020). Също така, описваме логическия дизайн на система за продуктивно управление на големи обеми от данни, както и дискутираме някои от нашите измержания и наблюдения.

1.1. Гражданска наука

Принципите на гражданската наука са основополагащи при създаването на мониторингова мрежа в контекста на наблюдения на природни явления и климатични процеси. Нейната значимост може да бъде разгледана в две основни направления: (1) дизайн, архитектура и изграждане на мрежа с участието на експерти, и (2) поддръжка и стопанисване на крайни устройства от ангажирани граждани.

Нужно е сътрудничеството на изследователите в областта на природните науки, инженерите и лбване на решения и проектиране на ИТ инфраструктура с комуникационни помощни устройства и крайни устройства за мониторинг на околната среда, специфично за нуждите на гражданската наука. Именно търсенето на такива решения заема ключово място в логическата организация и архитектурата на мрежата METER.AC – от избора на измервателни параметри и сензори до комуникационната инфраструктура и платформите за събиране и анализ на данни. След разработването и тестването на нови прототипни устройства, заинтересованите граждани кандидатстват за участие в мрежата като предоставят локация и заявяват интерес към определени измервания. След събеседване и одобрение те получават оборудване, като поемат дългосрочен ангажимент за неговото стопанисване и поддръжка по места. В общия случай доброволците не са специалисти, но те имат подчертан интерес към провеждане на даден вид измервания.

На фигура 1 е показана организацията на човешките ресурси. Ядрото от основателите на мрежата работи лично с домакинните на оборудване. От друга страна, наши близки сътрудници и партниращи си с нас научни организации ни консултират във вземането на решения както за техническото изграждане на мрежата, така и за поставянето на научно-изследователски задачи, които да се решават чрез постоянен мониторинг.

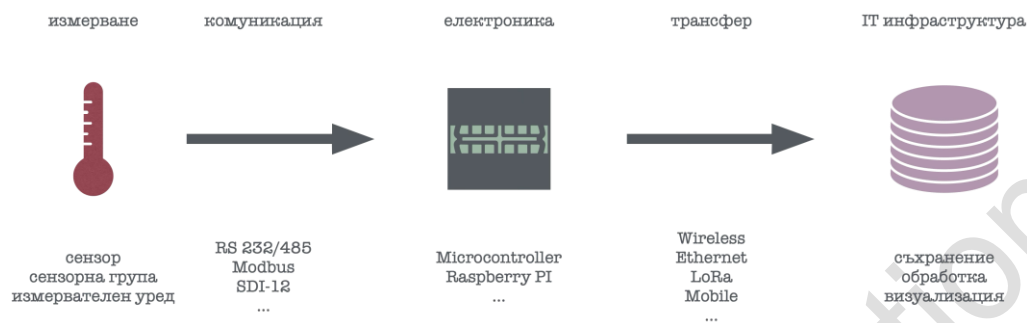


Фиг. 1. Организация на човешките ресурси за реализация на гражданска наука чрез METER.AC

Fig. 1. Human resources for citizen science implementation through METER.AC

1.2. Интернет на нещата (IoT)

Апаратната част от крайни устройства в мрежата METER.AC се подчинява изцяло на концепцията за интернет на нещата (IoT). "Интернет на нещата" (на английски: Internet of Things или IoT) е концепция, при която физически устройства, обекти и системи са свързани към интернет и могат да събират, предават и обменят данни помежду си, без или с минимална човешка намеса. Интернет на нещата повишава ефективността, автоматизира процеси, спестява време и ресурси, подобрява контрола и позволява вземане на информирани решения чрез събиране и анализ на данни в реално време. Основните предизвикателства при IoT са свързани със сигурността на данните, съвместимостта между различните устройства, управлението на големи обеми информация и защитата на личните данни. Крайните устройства на мрежата METER.AC за наблюдаване параметри на околната среда са сензори, сензорни групи или по-сложни измервателни уреди. Регистрираните данни се прехвърлят към микроконтролер или бюджетни едноплатков компютри посредством разнообразни протоколи, които се поддържат от крайното устройство, напр. RS232, Modbus, SDI-12 и т.н., както е показано на фигура 2.



Фиг. 2. Поток на данните в METER.AC в контекста на Интернет на нещата

Fig. 2. Data flow in METER.AC in the context of the Internet of Things

Микроконтролерът извършва първична обработка и подготовка на суровите данни. От тях се формират пакети с информация за съответния комуникационен протокол и се изпращат през наличната медия до IT инфраструктурата на мрежата METER.AC.

1.3. Социална активност

В рамките на инициативата METER.AC провеждаме срещи с утвърдени в своята област учени. В таблица 1, в хронологичен ред, са обобщени някои от по-важните проведени събития.

Таблица 1. Списък на уебинари, организирани от METER.AC

Table 1. List of webinars organized by METER.AC

Дата, тема	Участници
24.03.2021 Началото	Атанас Терзийски, Иван Чалъков, Любен Боянов, Явор Христов, Нина Желязкова, Ведрин Желязков, Лъчезар Илиев, Емил Дойчев
15.03.2022 Нови предизвикателства и решения	Дария Владикова, Димитър Иванов, Марин Димитров
22.02.2023 Изследване на атмосферата	Иван Костадинов
21.03.2023 Изследване на атмосферата 2	Валентин Симеонов
13.11.2023 Изследване на атмосферата 3	Христо Чипилски

Уебинарите по същество представляват онлайн презентации на поканени лектори, с панел за въпроси и свободни дискусии. Всички събития от таблица 1 са записани и достъпни свободно чрез сайта на METER.AC. От друга страна в рамките на някои емблематични изследвания издадохме три научнопопулярни

филми, подходящи за подрастващи и възрастни, в които се представят по достъпен и увлекателен начин по-сложни научни концепции като изучаване на атмосферата чрез балонни изследвания (2018 г., “Балонът на мечтите“), изграждане на национална мрежа за мониторинг (2020 г., „Теория на времето“) и измерване на радон в почвен газ (2023 г., „Вселената, животът и всичко останало...“).

Екипът на METER.AC взема активно участие в подкрепа на външни проекти като Blitzortung (www.blitzortung.org), което по същество е глобална мрежа за наблюдение и локализация на мълнии в реално време, основана на доброволчески принцип и изградена въз основа на принципите на гражданската наука. Също така, ние подкрепяме усилията на наши колеги от StringMeteo - българска онлайн платформа и активен форум, фокусиран върху любителската и професионалната метеорология.

1.4. Финансиране

В първите си години (2017 и 2018 г.) мрежата METER.AC започна основно с лични дарения, чрез които успяхме да изградим тестова реализация, включваща малък брой бюджетни измервателни станции, както и изграждане на основната част от информационна инфраструктура. Финансирането чрез доброволни дарения и понастоящем продължава да е важно перо за каузата на METER.AC. По-късно през годините успяхме да реализираме няколко проекта, чрез които надградихме различни слоеве на мрежата като нови и повече крайни устройства и сензори, подобрения на информационната инфраструктура и връзки с обществеността. В рамките на академични и бизнес сътрудничества ние набавихме ключов хардуерен актив, който се използва за наблюдение на природни феномени и генерира свободни и големи данни.

2. УПРАВЛЕНИЕ НА ГОЛЕМИ ДАННИ

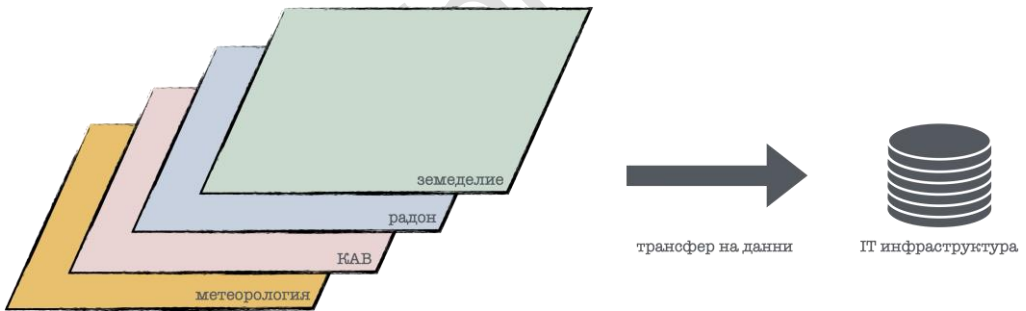
Крайните устройства в мрежата, в зависимост от типа им регистрират от няколко до няколко десетки величини. Честотата на докладите е от 1 минута за метеорологичните станции, 5 минути за базовия тип устройства (nodes - нодове) и до 10 минути за уредите, регистриращи радон в почвен газ или станции за мониторинг за земеделски цели.

Мрежата на METER.AC генерира огромни количества от данни заедно със съпътстващите ги метаданни. Експерименталните данни, са в основата на информационната пирамида. Поставени в контекст, данните се интерпретират и се извлича информация, след което чрез различни теории, правила, абстракции и модели, информацията се превръща в знание. За да се извлича информация от експериментални данни е нужно те да бъдат поставени в контекст, който се дефинира чрез съответните метаданни, които от своя страна може многократно да надскочат количествено самите данни. Ефективното управление на данни от различни източници е възможно само ако оригиналните измервания са съчетани

с богати метаданни. FAIR принципите позволяват експерименталните данни да се използват извън техния произход, за решаване на научни проблеми, запълване на липсващи данни, повторно използване на данните в приложения, моделиране и предоставяне на инструменти за други нужди на науката, промишлеността и регулаторите. Екипът на METER.AC полага усилия натрупаните данни да отговарят на принципите FAIR (Findable, Accessible, Interoperable and Reusable) за откриваеми, достъпни, оперативно съвместими и многократно използваеми експериментални данни. Трансформирането на всички първични данни във FAIR информационни ресурси е наша постоянна задача. Една ключова стъпка в това направление е създаденият от нас прототип на модел за данни (data model) за съхраняване на информацията (данни и мета данни) от мрежата на METER.AC според принципите FAIR.

Архитектурата на данните изисква специализиран подход, описан в следващата точка.

Фигура 2 визуализира линейно потокът на данните при оперирането на мрежата в контекста на парадигмата „Интернет на нещата“ (IoT). Крайните сензори, разположени по унифициран начин спрямо изискванията, могат да бъдат класифицирани в няколко обособени слоя, както е показано на фигура 3. Във всеки слой провеждаме паралелни сравнителни измервания с бюджетни уреди за постигане на по-добра геопространствена резолюция, както и с професионални, сертифицирани уреди.



Фиг. 3. IoT слоеве на мрежата METER.AC

Fig. 3. IoT layers of the METER.AC network

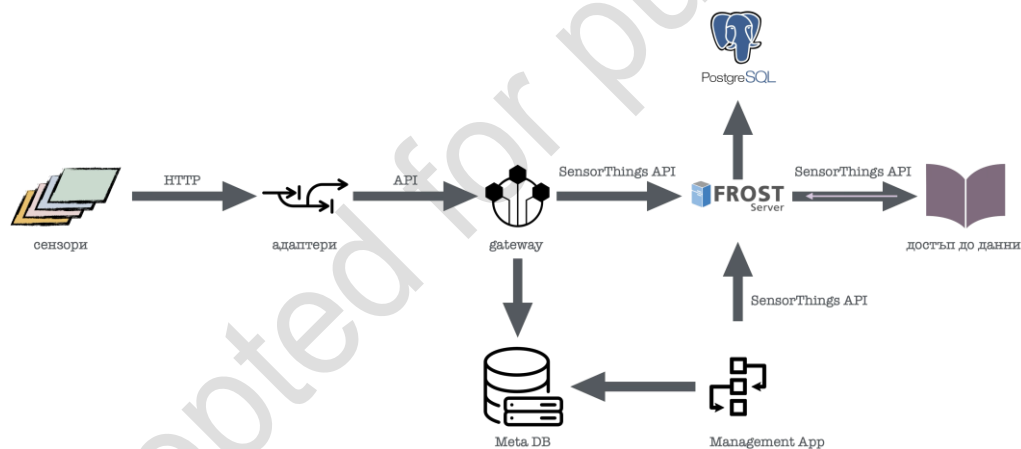
На фигура 4 е представена информационната инфраструктура на система за събиране, обработка и достъп до данни от IoT устройства, измерващи параметри на околната среда, като температура, влажност, концентрация на фини прахови частици, радон, слънчева радиация и др. Архитектурата следва модулен и стандартизиран подход, основан на протокола SensorThings API, дефиниран от Open Geospatial Consortium (OGC).

Първичното събиране на данни се извършва от различни сензорни устройства, които изпращат наблюденията си чрез HTTP заявки. Тъй като устройствата

произвеждат хетерогенни формати на данни, в системата се въвежда слой от адаптери, които осигуряват уеднаквяване на входящите данни и допълването им с техническа информация (например, времеви печат на получените данни, идентификационен номер на устройство и т.н.).

След трансформацията, данните се препращат към компонент, обозначен като gateway. В текущата реализация този компонент е изграден върху платформа Node-RED, позволяваща визуално програмиране на потоци от данни. Gateway модулът обработва получената информация и на базата на мета-данни генерира поредица от заявки към FROST Server – сървърна имплементация на SensorThings API, чрез който се реализира моделът за данни на METER.AC. За всяка заявка се извличат допълнителни атрибути от Meta DB, която съдържа допълнителна информация за устройствата, като: географска локация, типове сензори, мерни единици и др.

FROST Server приема тези заявки и ги съхранява в PostgreSQL база данни с активиран софтуерен модул за работа с времеви редове (timeseries plugin), който оптимизира представянето и извличането на времеви редове – ключов аспект при работа с IoT данни.



Фиг. 4. Архитектура на мрежа за събиране и управление на данни от IoT сензори

Fig. 4. Architecture of a network for data collection and management from IoT sensors

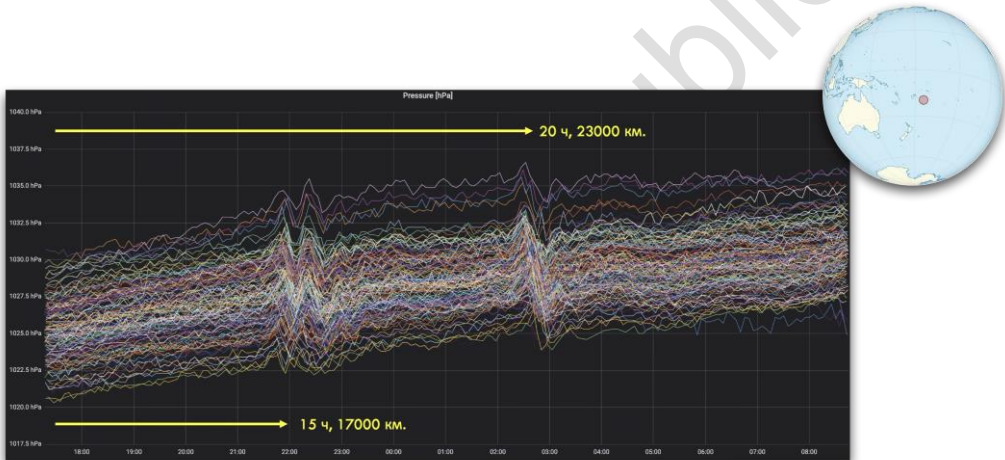
Достъпът до натрупаните данни се осъществява от външни приложения чрез SensorThings API. Това позволява стандартизиран интерфейс за четене на данни от аналитични платформи, визуализационни инструменти или мобилни приложения. В допълнение, чрез специализирано (Management) приложение се поддържа и администрира съдържанието на Meta DB и синхронизирането им с Frost Server.

Предложената архитектура демонстрира гъвкавост, мащабиране и съвместимост със съвременните принципи на отворените стандарти и е особено подходяща за системи за мониторинг на околната среда, в които са ангажирани множество и разнородни сензорни устройства. Въз основа на базовия модел за данни, архитектурата на METER.AC и потока на суровите данни са програмирани python скриптове и електронни бележници (Jupyter

Notebooks) за предварителна обработка на сигнали и експериментални данни. Също така, въз основа на модела за данни е реализиран и прототип на софтуерна платформа ACreM (Air Credible Monitoring), която е хибридна мултиагентна платформа и комбинира методи от символния и субсимволния изкуствен интелект (Stoyanov, 2025)

3. ПРИМЕРНИ ИЗМЕРВАНИЯ

На 15 януари 2022 г. изригна вулканът на островите Хунга Тонга в Тихия океан. Разстоянието от епицентъра на вулкана до територията на Република България, е съответно около 17000 км (по-късото разстояние) и около 23000 км от другата (по-дългото разстояние) страна на земната повърхност. Двете ударни вълни, достигайки до мрежата METER.AC се изразяват в промяна на атмосферното (звуково) налягане. Промяната е минимална, в рамките на 0.5 hPa, но масовият и едновременен отклик на стотици уреди еднозначно регистрира и двете събития 15 и 20 ч. след изригването, както е показано на фигурата.

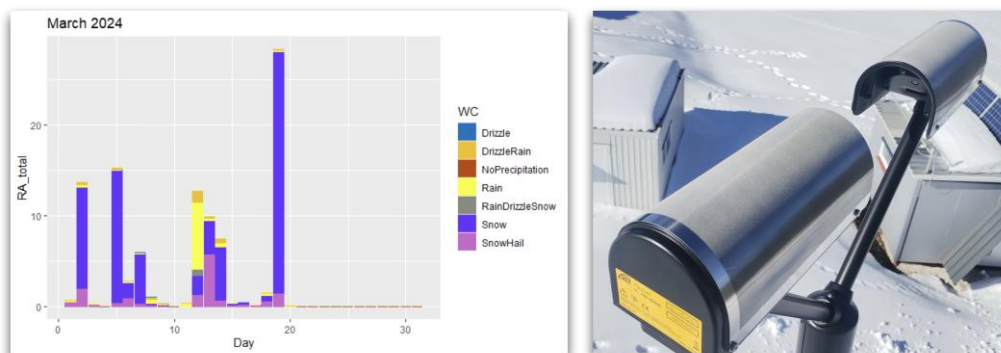


Фиг. 5. Вулканът Хунга-Тонга, регистриран в България (януари 2022 г.)

Fig. 5. Hunga Tonga volcano monitoring in Bulgaria (January 2022)

Тези наблюдения доказват допълнителната стойност от мрежовата архитектура и едновременната регистрация на събития чрез множество бюджетни сензори, даващи отклик близък до прага на откриване на всяко едно устройство (чувствителност и честота на измерване), но в същото време е възможно наблюдение на глобални промени в средата.

Дистрометърът (OTT Parsivel2) е съвременен уред за лазерна регистрация на всички видове валежи. Той улавя както скоростта така и размера на всяка частица от валежа и създава възможност за разпределение на валежите в 32 класа. Суровите данни се използват за изчисляване на вида, количеството, интензивността и кинетичната енергия на валежите, видимостта във валежите и еквивалентната радарна отразителна способност.

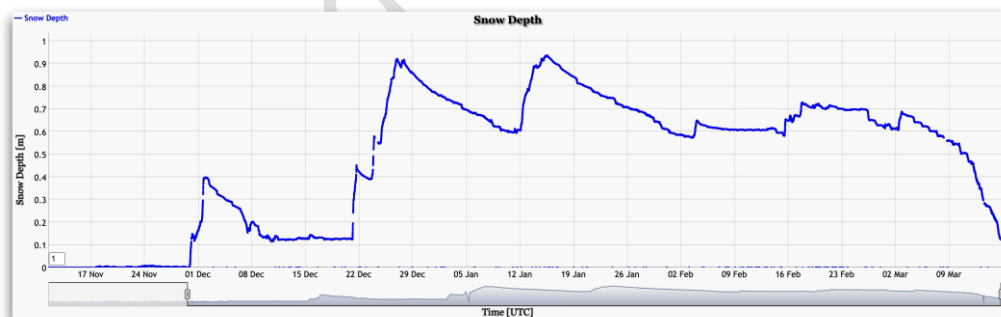


Фиг. 6. Регистрация на валежи на НАО Рожен чрез OTT Parsivel2

Fig. 6. Precipitation monitoring at Rozhen NAO using OTT Parsivel2

На фигура 6 е представено разпределението на валежите на НАО Рожен през дните на месец март 2024 г., разпределени по количества от всеки тип. В дясно на фигурата е показана инсталацията на уреда според изискванията на производителя.

С друг лазерен уред (ОТТ SHM 31), на същото място наблюдаваме снежната покривка. Уредът работи с видим и лесен за детектиране измервателен лъч. Дълбочината на снега се определя до 15 метра в рамките на секунди, с милиметрова точност и надеждност. На фигура 7 е представена динамиката в промяната на снежната покривка на НАО Рожен за зимния сезон на 2024-2025 г. Суровите данни са с времева резолюция от 1 минута, което позволява задълбочен анализ и използване на данните от други колективи.



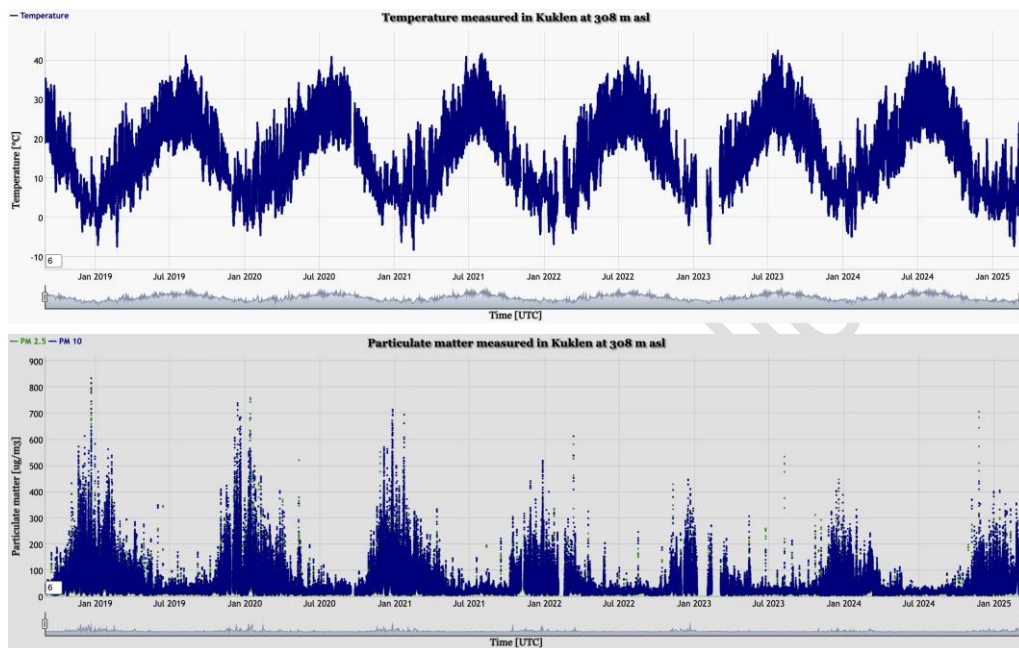
Фиг. 7. Регистрация на снежна покривка на НАО Рожен чрез OTT SHM 31

Fig.7. Snow cover monitoring at Rozhen NAO using OTT SHM 31

Всички метеорологични измервания се регистрират в началото на всяка минута според универсалното GPS време.

Най-масовият уред в мрежата са така наречените „нодове“ (nodes), които по същество представляват асемблирани от нас устройства за мониторинг на шест величини (атмосферно налягане, околна температура, влажност на въздуха, фини

прахови частици размери 2.5 и 10 μm и комбиниран сензор за мониторинг на бета/гама фона). Времевите редове на един от първите уреди в мрежата, инсталиран през лятото на 2018 г. в гр. Куклен са показани на следващата фигура.



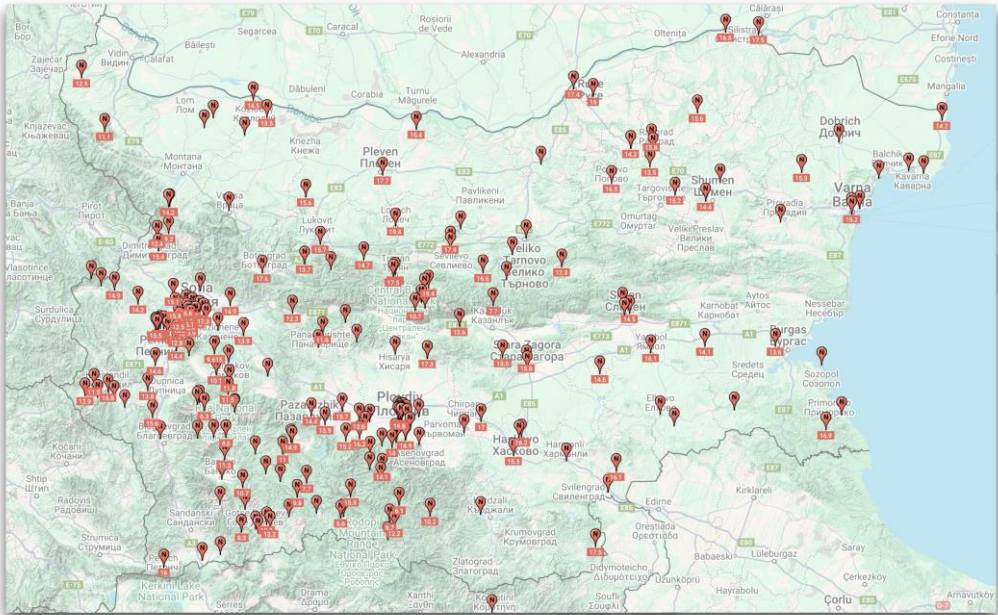
Фиг. 8. Времеви ред от измервания на температура (горе) и ФПЧ (долу) в гр. Куклен
Fig. 8. Time series of temperature measurements (top) and PM concentration (bottom) in the town of Kuklen

Времевата резолюция на данните е 5 минути, а общият размер на суровите данни на реда е 57МВ. Прави впечатление намаляване на регистрираните прахови замърсявания за периода от зима 2018-2019 до 2024-2025.

Карта на покритието на нодовете в страната е показана на следващата фигура.

БЛАГОДАРНОСТИ

Това изследване е финансирано от Европейския съюз - NextGenerationEU, чрез Националния план за възстановяване и устойчивост на Република България, проект № BG-RRP-2.004-0001-C01



Фиг. 9. Карта на покритието на мрежата METER.AC на територията на България

Fig. 9. Coverage map of the METER.AC network across the territory of Bulgaria

ЛИТЕРАТУРА

A volcanic eruption sent enough water vapor into the stratosphere to cause a rapid change in chemistry, <https://research.noaa.gov/hunga-tonga-2022-eruption>

FAIR, <https://www.go-fair.org>

OGC SensorThings API, <https://www.ogc.org/standards/sensorthings>

OTT Parsivel2, <https://www.ott.com/products/meteorological-sensors-26/ott-parsivel2-laser-weather-sensor-2392>

OTT SHM 31, <https://www.otthydromet.com/en/p-snow-depth-sensor-shm31/8365.30>

Real time lightning map, <https://www.blitzortung.org>

Stoyanov, S., Doychev, E., Stoyanova-Doycheva, A., Tabakova-Komsalova, V.; Stoyanov, I., Nedelchev, I. A Regional Multi-Agent Air Monitoring Platform, Future Internet 2025, 17, 112.

Terziyski, A., Tenev, S., Jeliakov, V., Jeliakov, N., Kochev, N., METER.AC: Live Open Access Atmospheric Monitoring Data for Bulgaria with High Spatiotemporal Resolution. Data 2020, 5, 36.