



Raport z weryfikacji działania urządzenia pomiarowego AIRFOX firmy Foxytech sp. z o.o.

Opracowanie

Anetta Drzeniecka-Osiadacz i Tymoteusz Sawiński

Uniwersytet Wrocławski

Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego
Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery

Wrocław 2019

Raport
z weryfikacji działania urządzenia pomiarowego AIRFOX
firmy Foxytech sp. z.o.o.
zgodnie z umową WNZKŚ.U. 30.2018.AP

Opracowanie
Anetta Drzeniecka-Osiadacz i Tymoteusz Sawiński
Uniwersytet Wrocławski
Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego
Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery

1 Wstęp

Analizę weryfikacji pyłomierzy przeprowadzono na podstawie danych zgromadzonych w okresie od 01.2018 do 28.02.2019 r. Pyłomierze optyczne dostarczone przez firmę FOXYTECH Sp. z o.o. przez zleceniodawcę wyposażone zostały w moduł pomiarowy jakości powietrza umożliwiający pomiar stężenie pyłu $PM_{2.5}$ (stężenie pyłu PM_{10} oraz PM_1 wyliczane jest na podstawie algorytmu w oparciu o pomiary $PM_{2.5}$) oraz moduł pomiarów meteorologicznych – pomiary temperatury, wilgotności względnej powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego. Dane gromadzone były z rozdzielczością 1 minuty.

Podjęto decyzję o wydłużeniu okresu badawczego, ze względu na zwiększenie zakresu danych pomiarowych, w szczególności dla pyłu $PM_{2.5}$ oraz PM_{10} . Weryfikacja pomiarów została przeprowadzona dla różnych kroków uśredniania: 1 minuta, 1 godzina, 1 doba. Ponadto przeanalizowano szczegółowo zmienność wskazań pyłomierzy i czujników meteorologicznych dla różnych przedziałów czasowych: dane dekadowe, dane miesięczne oraz cały okres pomiarowy. Wyniki pomiarów pyłomierzy optycznych zweryfikowano również dla różnych warunków pogodowych (wilgotność powietrza RH poniżej 85%, powyżej 85%, powyżej 90%, powyżej 95%, przypadki z opadem atmosferycznym i bez opadu) oraz dla klas stężeń pyłu. Analizy te nie zostały zaprezentowane w niniejszym raporcie, gdyż nie wносиły dodatkowej informacji.

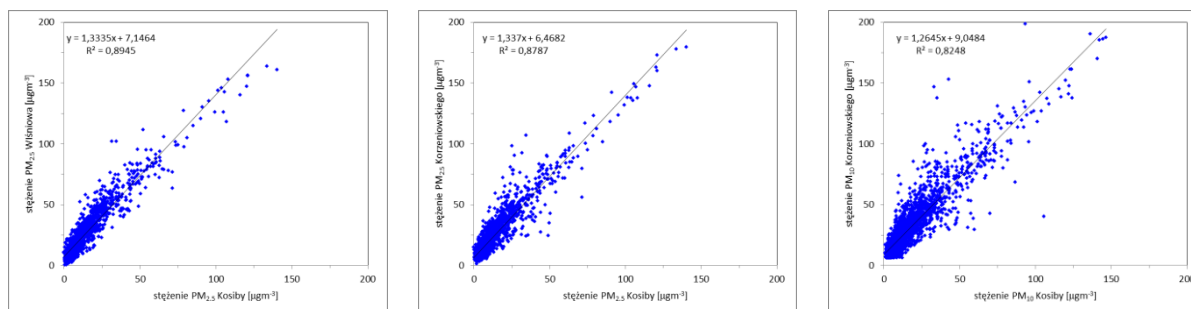
2 Jakość powietrza i warunki pogodowe w analizowanym okresie

W okresie od grudnia 2018 do końca lutego 2019 średnie stężenie pyłu zawieszonego $PM_{2.5}$ we Wrocławiu wynosiło od $14 \mu g m^{-3}$ (ZKiOA, ul. Kosiby) do $28 \mu g m^{-3}$ (PMŚ, ul. Wiśniowa), a najwyższe stężenia zanotowano w lutym 2019 r. Stężenia zmierzone na Biskupinie są powyżej 30% niższe niż w centrum miasta, co wynika z braku bezpośrednich źródeł emisji w pobliżu punktu pomiarowego oraz lokalizacji czerpni na wysokości 15 m n.p.g. (Ryc. 1).

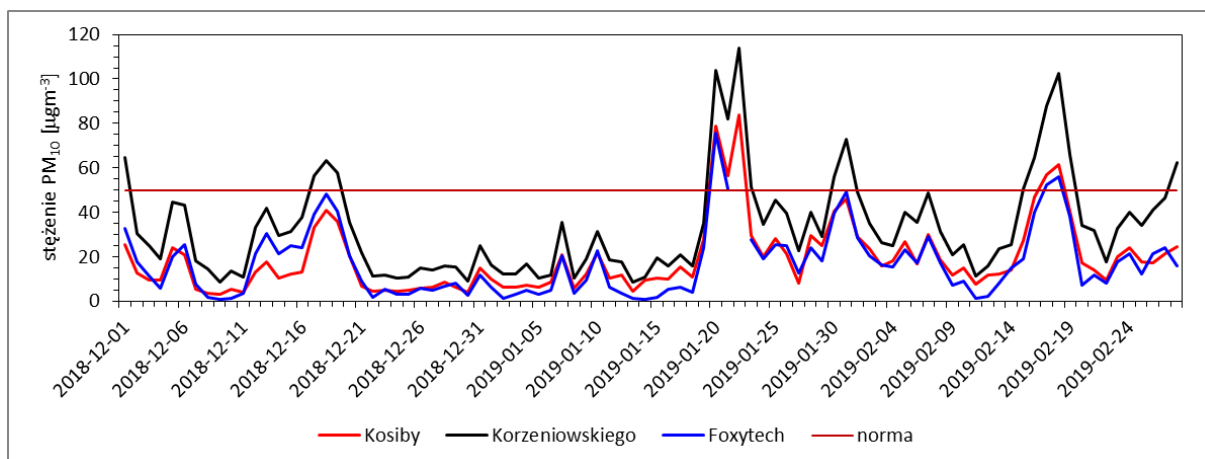
Okres ten charakteryzował się sprzyjającymi warunkami dyspersji zanieczyszczeń, było ciepło – średnia temperatura powyżej $2^{\circ}C$ (co ograniczało zużycie paliw na cele grzewcze), deszczowo i wietrznie, ze znaczną frekwencją pogody cyklonalnej (Tab. 1). Podczas tych trzech miesięcy zanotowano 16 dni, kiedy stężenie średnie dobowe dla pyłu PM_{10} (stacja PMŚ, ul. Korzeniowskiego) przekroczyło poziom dopuszczalny równy $50 \mu g m^{-3}$, po 6 dni zostało odnotowane w styczniu i w lutym. W ciągu dwóch dni (20.01 i 22.01) średnie dobowe stężenie pyłu przekroczyło $100 \mu g m^{-3}$ (Rys. 1). Maksymalne stężenie jednogodzinne wyniosło dla pyłu PM_{10} wyniosło $198 \mu g m^{-3}$ (18.02 godz. 23 UTC) a dla pyłu $PM_{2.5}$ $127 \mu g m^{-3}$ (19.02 godz. 1 UTC).

Tabela 1 Charakterystyka warunków pogodowych i jakości powietrza we Wrocławiu w analizowanym okresie

miesiąc	Korzeniowskiego		Wiśniowa	Kosiby				
	PM_{10} [$\mu g m^{-3}$]	$PM_{2.5}$ [$\mu g m^{-3}$]	$PM_{2.5}$ [$\mu g m^{-3}$]	PM_{10} [$\mu g m^{-3}$]	$PM_{2.5}$ [$\mu g m^{-3}$]	T [$^{\circ}C$]	RH [%]	P [hPa]
Grudzień 2018	27,1	23,4	23,4	12,7	8,3	2,9	81,9	1002,9
Styczeń 2019	33,3	29,3	30,1	22,1	18,6	-0,2	79,0	996,3
Luty 2019	40,2	30,4	31,1	23,3	14,9	3,6	68,0	1007,4
AVG	33,3	27,6	28,1	19,2	14,1	2,1	76,6	1002,1



Ryc. 1 Porównanie stężenia pyłu PM_{10} i $PM_{2.5}$ na stacji ZKiOA Kosiby i stacjach PMŚ, na podstawie danych godzinowych

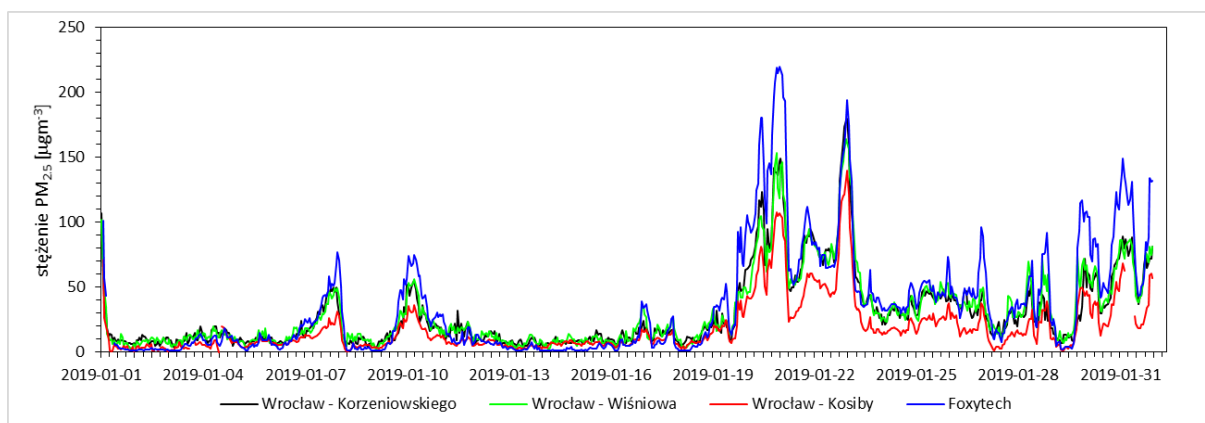


Ryc. 2 Przebieg dobowego stężenia PM_{10} na stacji Wrocław – Kosiby (ZKiOA), Wrocław – Korzeniowskiego (PMŚ) oraz detektora AIRFOX produkcji Foxytech (po wprowadzeniu współczynnika korekcyjnego)

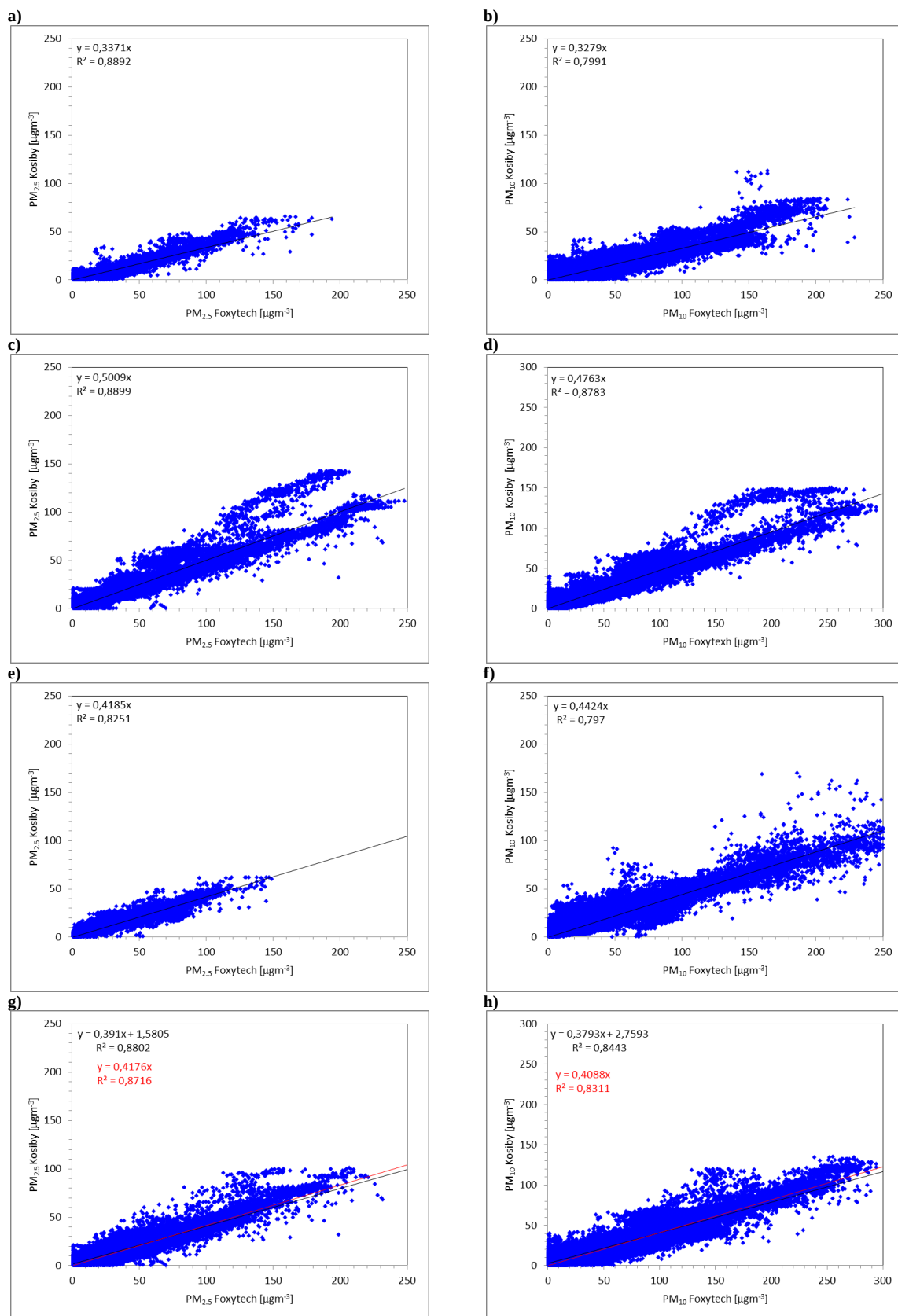
3 Weryfikacja wyników pomiarów

3.1 Weryfikacja wyników pomiarów stężenia pyłu PM_{10} oraz $PM_{2.5}$ wykonywanych przy użyciu urządzenia AIRFOX produkcji firmy Foxytech w oparciu o pomiary pyłomierzami stacjonarnymi TEOM 1400a

Pyłomierze optyczne powszechnie dostępne w sprzedaży zawyżają wyniki pomiarów w stosunku do pomiarów wykonywanych metodami zarówno manualnymi, jak i automatycznymi (TEOM, pomiar osłabienia promieniowania Beta). Najważniejszym w tym przypadku jest zachowanie linowości wskazań i brak dryftu wraz z upływem czasu. Szczegółowy przebieg zmian stężeń pyłu zawieszonego PM_{10} i $PM_{2.5}$, zmierzonych podczas całego okresu porównawczego z pomocą czujnika AIRFOX Foxytech oraz analizatorów TEOM 1400a, przedstawiono w załączniku 1 (ryc. I – VI). Ryciny te prezentują surowe, nieskorygowane dane pomiarowe, zarejestrowane podczas pomiarów. Ponadto na rycinie 3 przedstawiono przebieg stężenia pyłu $PM_{2.5}$ zmierzony na stacjach PMŚ, ZKiOA oraz AIRFOX Foxytech w styczniu 2019 – bez wprowadzonych współczynników korekcyjnych. W oparciu o uzyskane dane pomiarowe można stwierdzić, że w większości przypadków pyłomierz AIRFOX Foxytech wskazywał stężenie pyłu wyższe niż pozostałe czujniki. Warto zwrócić uwagę na epizod 19-23.01, kiedy to drugie maksimum nie zostało poprawnie zarejestrowane przez czujnik AIRFOX Foxytech – stężenia były niższe od spodziewanych (ryc. 3) – przyczyny tej rozbieżności nie są możliwe do wyjaśnienia. Jednak ze względu na to, że stanowiły one w pewien sposób dane „odstające”, zostały wykluczone z wyliczenia ostatecznego współczynnika korekcyjnego.



Ryc. 3 Przebieg stężenia pyłu zawieszonego w styczniu 2019 r.



Ryc. 4 Analiza zależności pomiędzy minutowymi wartościami stężeń pyłu PM_{10} , $PM_{2,5}$ mierzonymi analizatorem AIRFOX Foxytech a analizatorami TEOM,

a) grudzień 2018 – stężenia $PM_{2,5}$, b) grudzień 2018 – stężenia PM_{10}

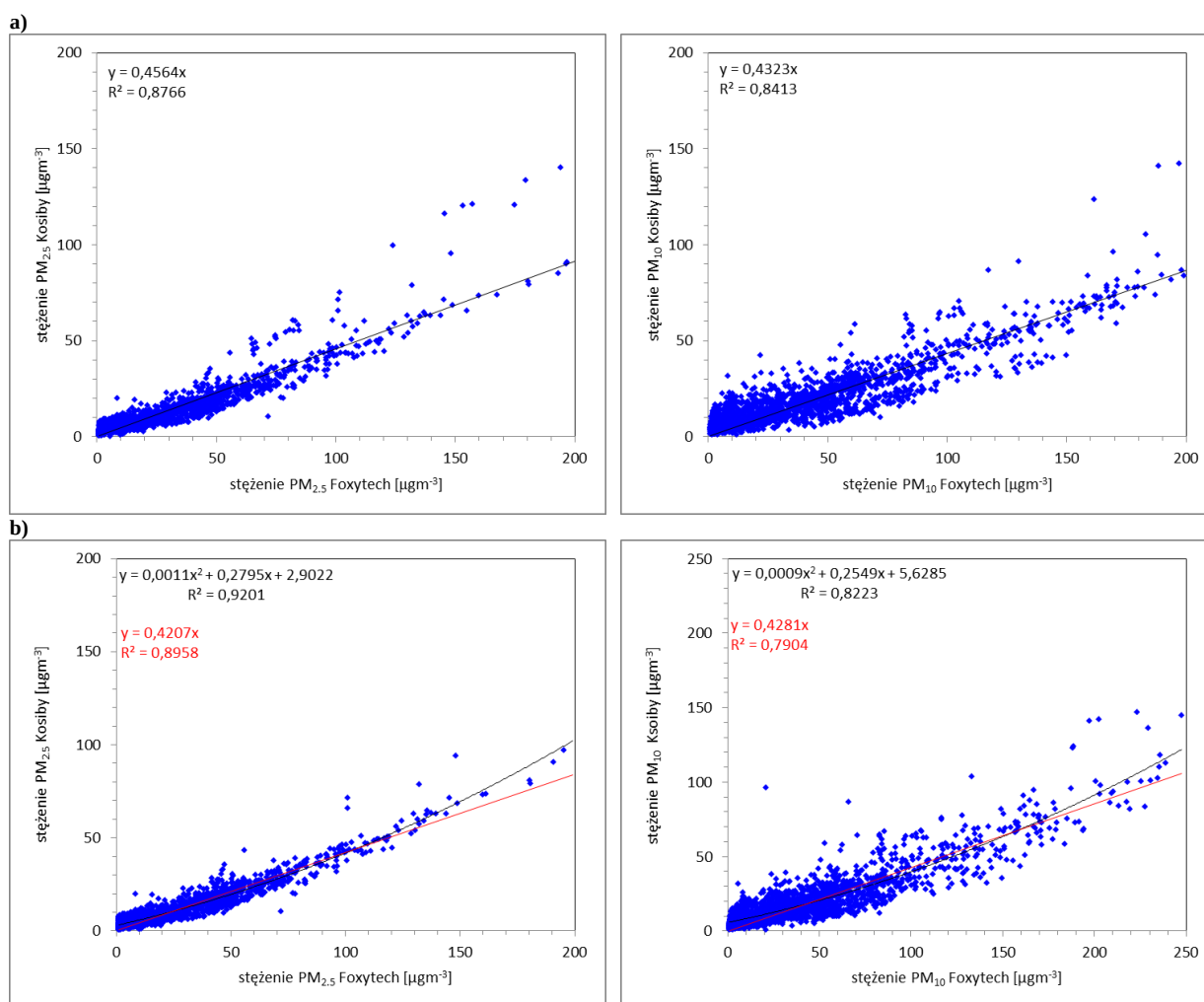
c) styczeń 2019 – stężenia $PM_{2,5}$, d) styczeń 2019 – stężenia PM_{10}

e) luty 2019 – stężenia $PM_{2,5}$, f) luty 2019 – stężenia PM_{10}

g) cały analizowany okres – stężenia $PM_{2,5}$, h) cały analizowany okres – stężenia PM_{10}

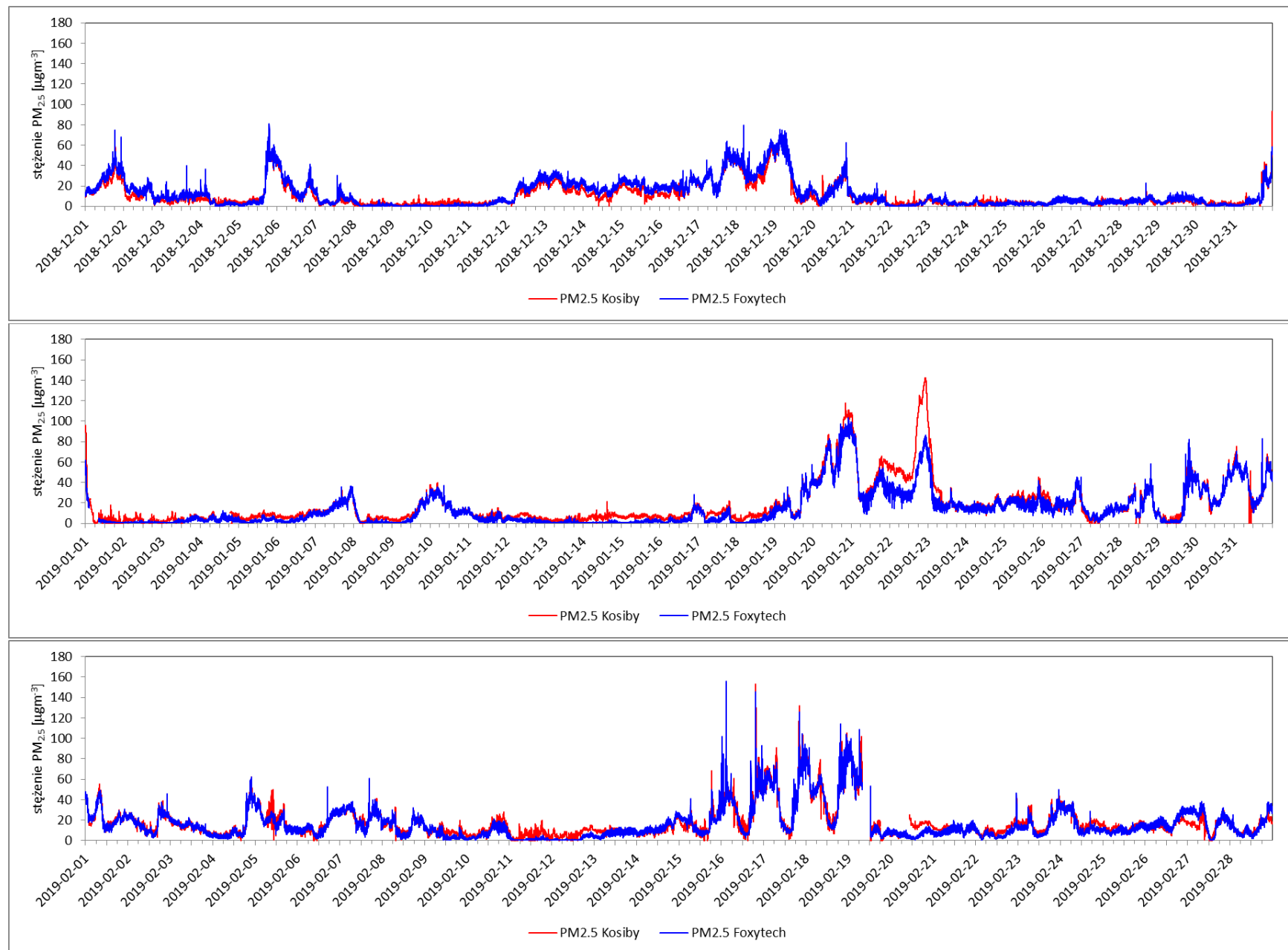
3.1.1 Podsumowanie

Analiza zmienności współczynników regresji odrębnie dla 3 miesięcy wskazała na dość znaczne różnice, co wynika przede z różnego zakresu analizowanych wartości stężeń pyłu (Ryc. 4). Stężenia mierzone analizatorami TEOM (Kosiby) stanowiły od 33 do 50% stężeń wskazywanych przez analizator AIRFOX Foxytech, średnia z 3 miesięcy po usunięciu wartości odstających wyniosła 42% dla pyłu $PM_{2.5}$ oraz 41% dla pyłu PM_{10} . Na różnice, które zaznaczyły się w styczniu, przede wszystkim wpłynęły wartości odstające (1.01. oraz 23.01), kiedy to zanotowane zostały mniejsze różnice pomiędzy stężeniami pyłu wskazywanymi przez analizator Foxytech a analizatory TEOM. Ponadto występowała bardzo dobra zgodność w dynamice stężeń, na co wskazuje wysoki współczynnik determinacji R^2 bliski 0,9. Nieco gorsze zależności uzyskano dla pyłu PM_{10} , co wynika z faktu zastosowania prostego algorytmu wyliczającego stężenia PM_{10} na podstawie stężeń $PM_{2.5}$. Metoda ta przy zróżnicowanych źródłach emisji jest zbyt prosta, zwłaszcza w cieplej porze roku, przy zwiększającym się udziale pyłu generowanego w procesach mechanicznych. Z drugiej strony wydaje się jednak, że w chłodnej porze roku jest wystarczająca do wyliczenia wskaźnika służącego do informowania mieszkańców o zagrożeniach związanych z jakością powietrza.

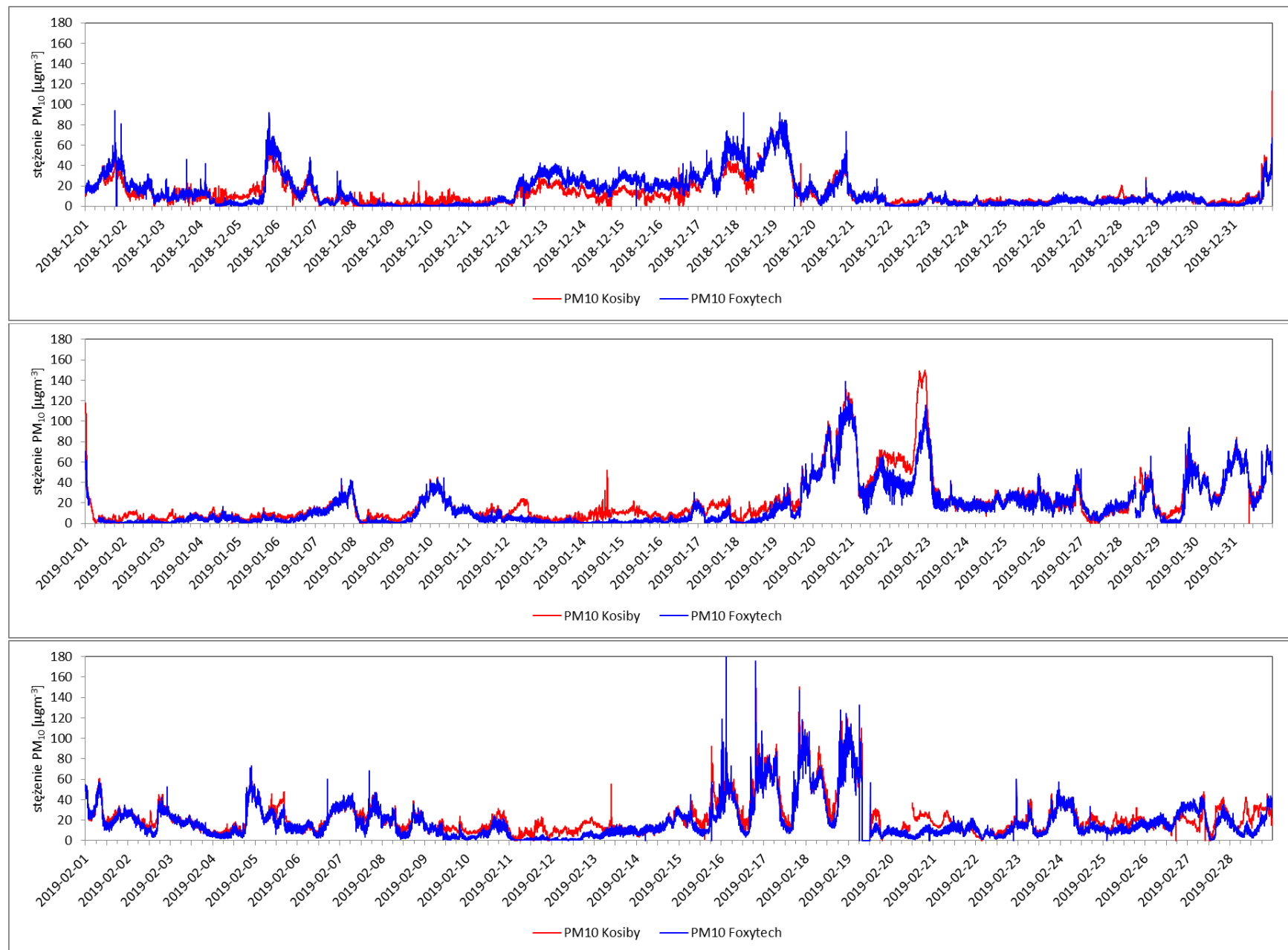


Ryc. 5 Analiza korelacji dla średnich 1-godzinnych wartości stężeń pyłu PM_{10} , $PM_{2.5}$ mierzonymi analizatorem AIRFOX Foxytech a analizatorami TEOM; a) bez usuniętych wartości odstających, b) z usuniętymi wartościami odstającymi

Analiza porównawcza danych pozwoliła na wyznaczenie współczynników korekcyjnych. Zgodnie z wyliczeniami dla pomiarów wykonywanych analizatorem AIRFOX Foxytech sugeruje się użycie współczynnika korekcyjnego 0,4176 dla pyłu $PM_{2.5}$ oraz 0,4088 dla pyłu PM_{10} . Stężenia pyłu po wprowadzeniu współczynników zostały przedstawione na rycinach 7 oraz 8. Potwierdza to wcześniejsze analizy i bardzo dobrą zgodność wskazań pomiędzy czujnikami optycznymi a analizatorami TEOM.



Ryc. 6 Porównanie 1 minutowych wartości stężenia pyłu PM_{2.5} z analizatora TEOM (Kosiby) oraz analizatora Foxytech po wprowadzeniu współczynników korekcyjnych



Ryc. 7 Porównanie 1 minutowych wartości stężenia pyłu PM₁₀ z analizatora TEOM (Kosiby) oraz analizatora Foxytech po wprowadzeniu współczynników korekcyjnych

3.2 Wyniki weryfikacji działania czujników temperatury powietrza, wilgotności powietrza i ciśnienia atmosferycznego

3.2.1 Ciśnienie atmosferyczne

Dane o wartościach ciśnienia atmosferycznego, zmierzone z pomocą czujnika AIRFOX Foxytech obejmują okres od 01.12.2018 godz. 00:00 do 31.01.2019 godz. 23:00. Dane rejestrowane były z rozdzielczością 1 hPa, z krokiem czasowym 1 min., kompletność serii wynosi 99,4 %. W celu sprawdzenia poprawności działania czujnika dane te zostały porównane z danymi gromadzonymi w Obserwatorium Meteorologicznym Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, przy pomocy czujnika ciśnienia Vaisala PTA 427 zintegrowanego z automatycznym systemem rejestracji Obserwatorium. Dane z tego czujnika rejestrowane były z rozdzielczością 0,001 hPa, krok czasowy pomiaru również wynosił 1 minutę, a kompletność serii wynosi 98,0 %.

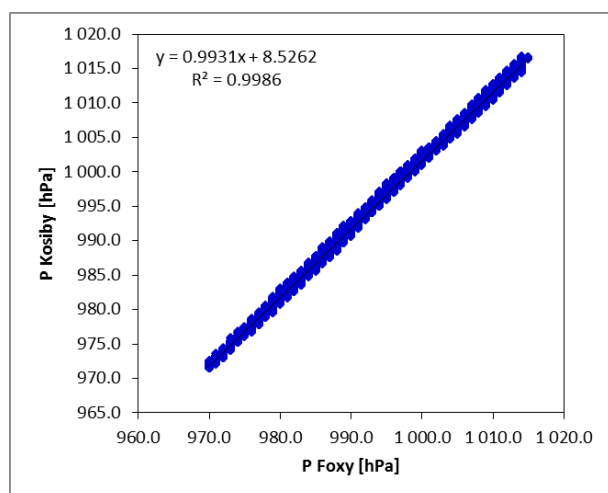
Czujnik AIRFOX Foxytech zainstalowany był na podeście obserwacyjnym, zlokalizowanym na dachu budynku Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery, na wysokości ok. 15 m nad poziomem podłoża, czujnik Vaisala umieszczony był na wysokości ok. 2 m nad poziomem podłoża, w kontenerze pomiarowym na terenie ogródka meteorologicznego Obserwatorium. Odległość pozioma między czujnikami wynosi około 15 m.

Charakterystyka zmienności ciśnienia atmosferycznego i porównanie wskazań czujników

Podstawowe charakterystyki zmian ciśnienia atmosferycznego dla całego okresu porównawczego, opracowane na podstawie wskazań czujnika AIRFOX Foxytech i czujnika Vaisala zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2 Podstawowe charakterystyki zmian ciśnienia atmosferycznego P zmierzonego za pomocą czujnika Foxytech (oznaczenie P_{Foxy}) i czujnika Vaisala zainstalowanego w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW (oznaczenie P_{Kosiby}), w okresie 01.12.2018 godz. 00:00 – 31.01.2019 godz. 23:00.

	grudzień			styczeń			cały okres		
	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg
P_{Kosiby}	1016,3	978,2	1002,9	1016,6	971,3	996,4	1016,6	971,3	999,6
$P_{Foxytech}$	1014,0	977,0	1001,4	1015,0	970,0	994,7	1015,0	970,0	998,1



Ryc. 9 Korelacja wartości ciśnienia atmosferycznego P [hPa], zmierzonego przy użyciu czujnika Foxytech (oznaczenie P_{Foxy}) z wartościami ciśnienia zmierzonymi czujnikiem Vaisala w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW (oznaczenie P_{Kosiby}).

Porównanie przebiegu rejestrowanych wartości dla całego analizowanego okresu (Załącznik 1., ryc. IV – VI) pokazuje bardzo dobrą zgodność wskazań czujnika AIRFOX Foxytech w porównaniu ze wskazaniami czujnika Vaisala, w całym zakresie mierzonych wartości, we wszystkich sytuacjach pogodowych, z współczynnikiem determinacji R^2 między badanymi zmiennymi równym 0,9986 (ryc. 9). Analizując dane pomiarowe stwierdzono, że w całym analizowanym okresie różnice wskazań pomiędzy czujnikiem AIRFOX Foxytech a czujnikiem Vaisala utrzymywały się na zbliżonym poziomie (Załącznik 1., ryc. IV – VI). Średnia różnica d między wskazaniami czujników ($d = P_{Foxy} - P_{Kosiby}$) wynosiła -1,612 hPa (wskazania czujnika AIRFOX Foxytech były o 1,612 hPa niższe niż wskazania czujnika Vaisala), mediana zbioru różnic dla całego okresu pomiarowego

wynosiła -1,606 hPa, przy odchyleniu standardowym równym 0,376 hPa. Maksymalna wartość różnicy wskazań dla całego okresu wyniosła -0,258 hPa, minimalna -3,221 hPa (tabela 2).

Ze względu na różnicę wysokości pomiędzy czujnikami, w ocenie poprawności działania czujnika AIRFOX Foxytech należy uwzględnić korektę ciśnienia wynikającą z tej różnicy. Przyjmując wielkość stopnia barycznego (parametr opisujący pionową zmianę ciśnienia w dolnej troposferze) jako

1 hPa/8 m, oraz różnicę wysokości między czujnikami jako 13 m, otrzymujemy wielkość różnicy ciśnienia między czujnikami, wynikającą z różnicy wysokości między nimi, równą 1,625 hPa. Oznacza ona, że wskazania na wysokości 15 m nad podłożem powinny być o 1,625 hPa niższe, niż wskazania na wys. 2 m nad poziomem podłoża. Uwzględniając tą różnicę poprzez dodanie do danych uzyskanych z czujnika Foxytech poprawki równej 1,625 hPa, stwierdzono, że po korekcie maksymalna różnica wskazań między czujnikiem Foxytech a czujnikiem Vaisala wynosiła 1,367 hPa, minimalna różnica wynosiła -1,596 hPa, średnia różnica oraz mediana odpowiednio 0,013 i 0,019 hPa, natomiast wartość 10 i 90 percentyla odpowiednio -0,468 i 0,487 hPa, przy odchyleniu standardowym równym 0,376 hPa (tabela 3.).

Tabela 3 Statystyki różnic wartości ciśnienia atmosferycznego zmierzonych za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech i czujnika Vaisala zainstalowanego w Obserwatorium ZKiOA IGRR UWr dla okresu 01.12.2018 godz. 00:00 – 31.01.2019 godz. 23:00; d_p – różnica między wskazaniami czujnika Foxytech (P Foxy) i wskazaniami czujnika Vaisala (P Kosiby); $d = P_{\text{Foxy}} - P_{\text{Kosiby}}$; $d_{p_{kor}}$ – różnica między wskazaniami czujnika Foxytech skorygowanymi o poprawkę barometryczną wynikającą z różnicy wysokości między czujnikami ($kor P = 1,625$ hPa; objaśnienia w tekście) i wskazaniami czujnika Vaisala; $d_{p_{kor}} = P_{\text{Foxy}} + kor P - P_{\text{Kosiby}}$.

	max	min	średnia	med.	odch. std.	10 percentyl	90 percentyl
d_p	-0,258	-3,221	-1,612	-1,606	0,376	-2,093	-1,138
$d_{p_{kor}}$	1,367	-1,596	0,013	0,019	0,376	-0,468	0,487

Przedstawione powyżej wyniki wskazują na bardzo dobrą pracę czujnika ciśnienia zainstalowanego w urządzeniu AIRFOX Foxytech. Urządzenie prawidłowo rejestruje wartości ciśnienia atmosferycznego oraz bardzo dobrze odtwarza dynamikę zmian tej wielkości. Przy uwzględnieniu poprawki wynikającej z różnicy wysokości między czujnikami, stwierdzone błędy pomiaru (tabela 3.) należy uznać za pomijalne, zwłaszcza przy rozdzielczości pomiarowej urządzenia wynoszącej 1 hPa.

3.2.2 Temperatura powietrza

Analizowane dane o wartościach temperatury powietrza, zmierzone z pomocą czujnika AIRFOX Foxytech obejmują okres od 01.12.2018 godz. 00:00 do 28.02.2019 godz. 23:59. Dane rejestrowane były z rozdzielczością 1 °C, z krokiem czasowym 1 min., kompletność serii wynosi 99,4 %. W celu sprawdzenia poprawności działania czujnika dane te zostały porównane z danymi gromadzonymi w Obserwatorium Meteorologicznym Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UWr, przy pomocy zintegrowanego czujnika temperatury i wilgotności powietrza Vaisala HMP45 oraz dodatkowo czujnika oporowego PT100. Oba czujniki były podłączone do automatycznego systemu rejestracji Obserwatorium Dane z tych czujników rejestrowane były z rozdzielczością 0,001 °C, krok czasowy pomiaru również wynosił 1 minutę, a kompletność serii pomiarowych wynosi dla obu czujników 98,4 %.

Umiejscowienie czujników

Ze względu na główny cel badań, jakim była ocena poprawności pracy czujników stężenia pyłu zawieszonego, urządzenie AIRFOX Foxytech podczas pomiarów umieszczone było na podeście obserwacyjnym, zlokalizowanym na dachu budynku Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery, na wysokości ok. 15 m nad poziomem podłoża, w sąsiedztwie czerpni pyłomierzy pracujących w ramach systemu pomiarowego Obserwatorium.

Czujnik HMP45 zainstalowany był zgodnie ze wskazaniami WMO w standardowej klatce meteorologicznej, na wysokości 2 m nad trawiastym podłożem. Odległość pozioma między czujnikiem Foxytech a klatką meteorologiczną wynosiła około 15 m.

Ze względu na różnicę wysokości umiejscowienia czujnika AIRFOX Foxytech i czujnika HMP45 do porównań wykorzystano dodatkowy czujnik (PT100), umieszczony na szczycie wieży aktynometrycznej Obserwatorium, na wysokości 15 m nad powierzchnią podłoża. Odległość między wieżą aktynometryczną, a podestem na którym zainstalowano urządzenie AIRFOX Foxytech wynosiła około 40 m.

Zarówno czujnik HMP45 jak i czujnik PT100 umieszczone były w osłonach radiacyjnych – w przypadku HMP45 była to standardowa biała klatka meteorologiczna, w przypadku czujnika PT100 – mała biała osłona radiacyjna z tworzywa sztucznego, standardowo stosowana dla niezależnych sond temperatury powietrza. Czujnik temperatury urządzenia AIRFOX Foxytech zainstalowany był w dolnej części jego obudowy, w wystającej na ok. 5 cm dość masywnej końcówce, pozbawionej osłony

radiacyjnej stosowanej standardowo w urządzeniach meteorologicznych do pomiaru temperatury powietrza, ponadto cała obudowa urządzenia miała kolor ciemnoszary (fot. 1).



Fot. 1 Urządzenie AIRFOX Foxytech na stanowisku pomiarowym; na dole urządzenia widoczna końcówka z sondą temperatury i wilgotności powietrza (fot. T. Sawiński)

Różnice w umiejscowieniu czujników, wynikające z przedstawionego wyżej głównego celu badań oraz różnice związane z brakiem osłony radiacyjnej i ciemnym kolorem obudowy czujnika AIRFOX Foxytech mogą mieć istotny wpływ na mierzone parametry i powodować wystąpienie różnic pomiędzy wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech a czujnikami referencyjnymi HMP 45 i PT100, nie wynikających z charakterystyki samych czujników. Jako główne przyczyny różnic należy wskazać:

1. Wpływ naturalnej stratyfikacji termicznej przygruntowej warstwy atmosfery w warunkach nocnych (występowanie przygruntowych ochłodzeń i przymrozków w warunkach pogody radiacyjnej)
2. Wpływ oddziaływania nagrzanego podłoża w warunkach pogody słonecznej na wskazania termometru HMP 45 umieszczonego 2 m nad podłożem, wpływ nagrzanej połaci dachu na wskazania czujnika AIRFOX Foxytech
3. W godzinach porannych i popołudniowych wpływ zacienienia przez budynki i drzewa na wskazania czujnika HMP 45 umieszczonego 2 m nad podłożem
4. Wpływ ciemnej obudowy urządzenia AIRFOX Foxytech, podatnej na nagrzewanie w warunkach pogody słonecznej
5. Wpływ osłon radiacyjnych na wskazania czujników HMP 45 i PT100 – przede wszystkim niwelowanie nagrzewania czujników w warunkach pogody słonecznej (czujniki mierzą temperaturę opływającego je powietrza, a nie temperaturę nagrzanej obudowy) oraz ograniczenie wpływu osadów atmosferycznych (rosy, szronu, osadu kropel mgły) na wskazania czujników (osadzanie cząstek wody/łodu następuje przede wszystkim na osłonie, a nie na samym czujniku)

Należy zaznaczyć, że w przypadku 2. wpływ nagrzanego podłoża na wskazania czujnika HMP 45 jest częściowo niwelowany przez jego umieszczenie we wnętrzu klatki meteorologicznej, w przypadku czujnika AIRFOX Foxytech, pozbawionego osłony radiacyjnej, wpływ oddziaływania nagrzanej połaci dachu nie jest niwelowany i może się dodatkowo wzmacniać w wyniku oddziaływania nagrzewającej się ciemnej obudowy.

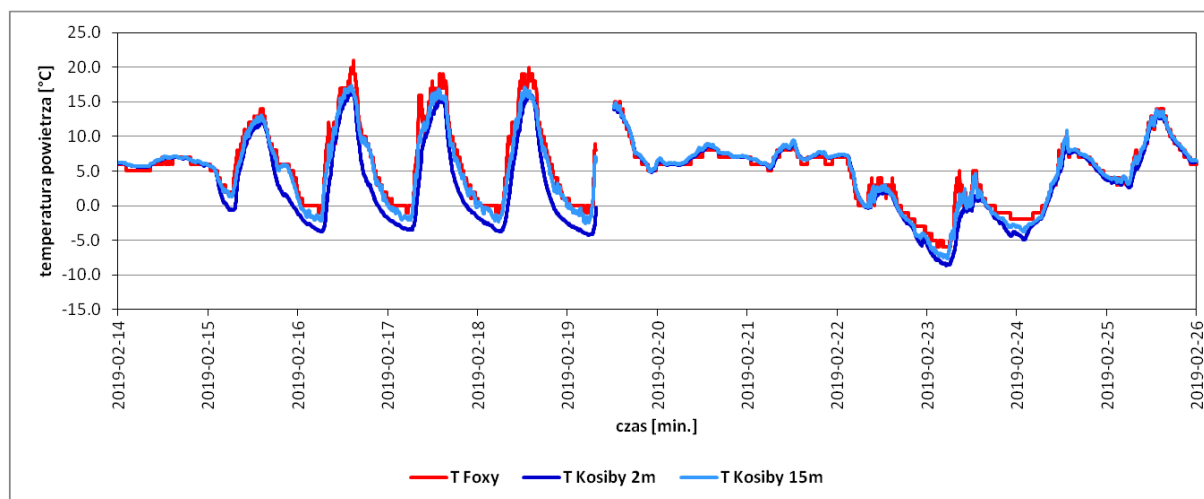
Z tego względu przedstawione poniżej porównanie wskazań temperatury powietrza mierzonej przez urządzenie Foxytech ze wskazaniami czujników wchodzących w skład systemu pomiarowego Obserwatorium ZKiOA ma jedynie charakter orientacyjny.

Charakterystyka zmienności temperatury powietrza i porównanie wskazań czujników

Podstawowe charakterystyki zmian temperatury powietrza dla całego okresu porównawczego, opracowane na podstawie wskazań czujnika AIRFOX Foxytech oraz czujników Vaisala HMP 45 i PT100 zestawiono w tabeli 4.

Tabela 4 Podstawowe charakterystyki zmian temperatury powietrza T [°C] zmierzonych za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech (oznaczenie T Foxy) oraz dwóch czujników temperatury powietrza zainstalowanych w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW: czujnika Vaisala HMP 45 zainstalowanego na wysokości 2 m nad podłożem (oznaczenie T Kosiby 2m) i czujnika PT100, zainstalowanego na wysokości 15 m nad podłożem (oznaczenie T Kosiby 15m), w okresie 01.12.2018 godz. 00:00 – 28.02.2019 godz. 23:59.

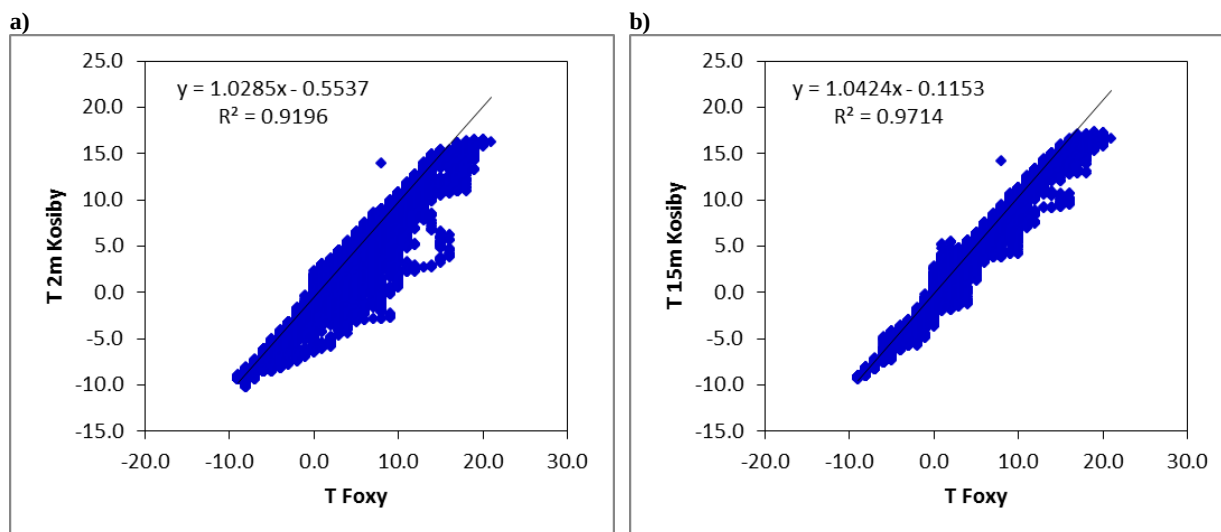
	grudzień			styczeń			luty			cały okres		
	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg
T Kosiby 2m	10,833	-6,855	2,891	7,754	-10,212	-0,190	16,522	-8,625	3,593	16,522	-10,212	2,055
T Kosiby 15 m	11,176	-5,734	3,172	7,925	-9,372	0,177	17,346	-7,602	4,393	17,346	-9,372	2,527
T Foxy	11,000	-5,000	2,960	7,000	-9,000	0,184	21,000	-6,000	4,495	21,000	-9,000	2,485



Ryc 10 Przebieg zmian temperatury powietrza w okresie 14-25.02.2019, zarejestrowany przez czujnik temperatury zainstalowany w urządzeniu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T Foxy) oraz czujniki HMP 45 (oznaczenie T Kosiby 2m) i czujnik PT100 (oznaczenie T Kosiby 15m).

W całym omawianym okresie wartości średnie temperatury, zmierzone przez czujniki Foxytech, HMP 45 i PT100 były na zbliżonym poziomie – jedynie w lutym różnica średnich miesięcznych, między czujnikiem AIRFOX Foxytech a czujnikiem HMP 45 sięgnęła 1 °C, w pozostałych miesiącach oraz dla całego omawianego okresu różnice między średnimi nie przekraczały 0,5 °C (tab. 4). W zestawieniu tym zwracają jednak uwagę różnice między odnotowanymi wartościami ekstremalnymi, najsilniej zaznaczone w lutym. Maksimum dla tego miesiąca odnotowane przez czujnik AIRFOX Foxytech wyniosło 21,0 °C, podczas gdy wskazania czujników HMP 45 i PT100 wyniosły odpowiednio 16,5 i 17,3 °C. Wartości minimalne dla czujników AIRFOX Foxytech, HMP 45 i PT100 to odpowiednio -6,0, -8,6 i -7,6 °C (tab. 4). Wspomniane różnice wystąpiły podczas dwóch epizodów bezchmurnej pogody radiacyjnej (15 – 19.02 i 22 – 24.02; ryc. 10), sprzyjającej głębokim nocnym spadkom temperatury powietrza, zwłaszcza przy podłożu, i znaczącym wzrostem temperatury powietrza w ciągu dnia, spowodowanym swobodnym dopływem promieniowania słonecznego. Zdaniem autorów, różnice temperatury między czujnikami wynikają z następujących przyczyn: ogrzewania ciemnej obudowy czujnika AIRFOX Foxytech w ciągu słonecznego dnia, wzmagane dodatkowo przez oddziaływanie nagrzanej połaci dachu (znacząco wyższe temperatury maksymalne, wskazywane przez ten czujnik), spadków temperatury powietrza przy powierzchni podłoża w ciągu nocy, związanych ze swobodnym wypromieniowaniem energii z powierzchni gruntu i grawitacyjnym

osiadaniem powietrza chłodnego (znacznie niższe temperatury wskazywane przez czujnik HMP 45 umieszczony na wysokości 2 m nad powierzchnią podłoża).



Ryc. 11 Korelacja wartości temperatury powietrza T [°C], zmierzonej przy użyciu czujnika AIRFOX Foxytech (oznaczenie T Foxy) z wartościami temperatury zmierzonymi czujnikiem HMP 45, na wys. 2 m nad podłożem (oznaczenie T 2m Kosiby; rys. a) oraz z wartościami temperatury zmierzonymi za pomocą czujnika PT100, na wysokości 15 m nad podłożem (oznaczenie T 15m Kosiby; rys. b).

Mimo wskazanych różnic, analiza przebiegu zmian temperatury powietrza, rejestrowanych przez porównywane czujniki w całym omawianym okresie (załącznik 1., ryc. X – XV) pokazuje dobrą zgodność wskazań czujnika AIRFOX Foxytech z wskazaniami czujników HMP 45 i PT 100. Czujnik AIRFOX Foxytech prawidłowo rejestruje dynamikę zmian temperatury powietrza, zadowalający jest również czas reakcji czujnika na krótkookresowe wahania temperatury. Świadczy o tym wysoka korelacja wskazań czujnika AIRFOX Foxytech ze wskazaniami czujników HMP 45 i PT100, wyrażona współczynnikami determinacji R^2 , wynoszącymi 0,9196 dla czujnika HMP 45 i 0,9714 dla czujnika PT100 (ryc. 11). Wyższa wartość współczynnika determinacji dla czujnika PT100 wynika zdaniem autorów z faktu, że czujnik ten umieszczony był na takiej samej wysokości jak czujnik Foxytech i w jego wskazaniach nie zaznaczał się wpływ nocnych spadków temperatury występujących przy podłożu, rejestrowanych przez czujnik HMP 45.

Tabela 5 Statystyki różnic wartości temperatury powietrza zmierzonych za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech oraz czujników HMP 45 i PT100 w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW r dla okresu 01.12.2018 godz. 00:00 – 31.01.2019 godz. 23:00; $d_{T\ 2m}$ – różnica między wskazaniami czujnika Foxytech (T Foxy) i wskazaniami czujnika HMP 45 (T Kosiby 2m); $d_{T\ 2m} = T\ \text{Foxy} - T\ \text{Kosiby 2m}$; $d_{T\ 15m}$ – różnica między wskazaniami czujnika Foxytech i wskazaniami czujnika PT100 (oznaczenie T Kosiby 15 m); $d_{T\ 15m} = T\ \text{Foxy} - T\ \text{Kosiby 15m}$.

	max	min	średnia	med.	odch. std.	10 percentyl	90 percentyl
$d_{T\ 2m}$	12,198	-2,270	0,482	0,157	1,223	-0,624	2,057
$d_{T\ 15m}$	6,582	-4,176	0,008	-0,126	0,736	-0,768	1,002

Szczegółowa analiza różnic między wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech, a wskazaniami termometrów referencyjnych (tab. 5) pokazuje, że w przypadku czujnika HMP 45 średnie różnice wskazań wynoszą 0,482 °C (przeciętnie urządzenie Foxytech wskazuje temperaturę o 0,482 °C wyższą niż czujnik HMP 45), przy odchyleniu standardowym równym 1,223 °C, przy czym w 80% przypadków różnice mieszczą się w przedziale od -0,624 do 2,057 °C. W przypadku czujnika PT 100 średnia różnica wynosi 0,008 °C, przy odchyleniu standardowym równym 0,736 °C i wartościach 10 i 90 percentyla odpowiednio -0,768 i 1,002 °C. Większe wartości różnic i ich większy rozrzut w przypadku porównania z czujnikiem HMP 45 wynikają z różnic w wysokości położenia czujników.

W oparciu o powyższe wyniki można uznać wskazania czujnika Foxytech za zadowalające, a różnice wskazań wynoszące przy porównaniu z czujnikiem zainstalowanym na takiej samej wysokości w przybliżeniu ± 1 °C za akceptowalne, zwłaszcza w urządzeniu nie przeznaczonym do zastosowań profesjonalnych, w którym pomiar dokonywany jest z dokładnością 1 °C. Dodatkowo należy wskazać,

że zastosowanie w przyszłości białej obudowy urządzenia AIRFOX Foxytech i dodanie osłony radiacyjnej wokół czujnika temperatury wpłynęłoby korzystnie na jakość pozyskiwanych danych o temperaturze powietrza. Rozwiązania te ograniczą przede wszystkim możliwość zawyżania wskazań temperatury powietrza, spowodowane nagrzewaniem obudowy urządzenia. Zastosowanie osłony radiacyjnej ograniczy również osadzanie cząstek wody lub lodu na czujniku (osad ciekły, sadz, szron, rosa), które mogą wpływać na wskazania temperatury i wilgotności powietrza poprzez uwalnianie/pochłanianie ciepła przemian fazowych. Jako dodatkowe rozwiązanie poprawiające potencjalnie jakość pozyskiwanych danych pomiarowych można rozważyć zawarcie w instrukcji eksploatacji zalecenia odnośnie instalacji urządzenia w cieniu (np. po północnej stronie budynku).

3.2.3 Wilgotność względna powietrza

Analizowane dane o wartościach wilgotności względnej powietrza, zmierzone z pomocą czujnika AIRFOX Foxytech obejmują okres od 01.12.2018 godz. 00:00 do 28.02.2019 godz. 23:59. Dane rejestrowane były z rozdzielczością 1 %, z krokiem czasowym 1 min., kompletność serii wynosi 99,4 %. W celu sprawdzenia poprawności działania czujnika dane te zostały porównane z danymi gromadzonymi w Obserwatorium Meteorologicznym Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, przy pomocy zintegrowanego czujnika temperatury i wilgotności powietrza Vaisala HMP45, podłączonego do automatycznego systemu rejestracji Obserwatorium. Dane z czujnika rejestrowane były z rozdzielczością 0,001 %, krok czasowy pomiaru również wynosił 1 minutę, a kompletność serii pomiarowej wynosi 98,4 %.

W analizie, jako dodatkową charakterystykę przyjęto również wartości prężności pary wodnej e [hPa] (opisującej rzeczywistą zawartość pary wodnej w powietrzu, wyrażoną jako ciśnienie parcjale pary wodnej w powietrzu). Wartość tę określano, wyliczając dla każdej minuty prężność pary nasyconej E [hPa] (wielkość opisującą maksymalną możliwą zawartość pary wodnej przy danej temperaturze powietrza) i mnożąc przez wartość wilgotności względnej (opisującej stosunek aktualnej zawartości pary wodnej e do prężności pary nasyconej E), wg wzoru: $e = E \cdot U$. Wartości E wyliczano wg empirycznej formuły Magnusa-Tetensa (Alduchov, Eskridge, 1996), która przyjmuje postać:

$$E = 10 \cdot 0,61094 \cdot 10^{\frac{17,625T}{T+243,04}}$$

gdzie T jest temperaturą powietrza wyrażoną w °C.

Informacje o lokalizacji czujników wykorzystanych do porównań i związane z nią zastrzeżenia przedstawiono w części opracowania poświęconej temperaturze powietrza.

Charakterystyka zmienności parametrów wilgotnościowych powietrza i porównanie wskazań czujników

W całym omawianym okresie dominowały sytuacje z podwyższoną wilgotnością powietrza – w przypadku danych z czujnika AIRFOX Foxytech stwierdzono, że sytuacje z wilgotnością względną powyżej 70% stanowiły 81 % przypadków, sytuacje z wilgotnością powyżej 80% – 62 % przypadków, a sytuacje w których odnotowano wilgotność względną powyżej 90 % – 36 % przypadków. Dla danych z czujnika HMP 45 wartości te to odpowiednio 67 %, 41 % i 28 % przypadków.

Podstawowe charakterystyki zmian wilgotności względnej powietrza oraz zmian prężności pary wodnej dla całego okresu porównawczego, opracowane na podstawie wskazań czujnika AIRFOX Foxytech oraz czujnika Vaisala HMP 45 zestawiono w tabelach 6 i 7.

W oparciu o uzyskane dane stwierdzono, że czujnik AIRFOX Foxytech rejestruje wyższe wartości parametrów wilgotnościowych powietrza, zarówno w odniesieniu do wilgotności względnej powietrza, jak i prężności pary wodnej. Wskazują na to wyższe wartości średnie wskazywane przez czujnik Foxytech w porównaniu do czujnika HMP 45 – dla całego okresu porównawczego średnia wilgotność względna dla danych z czujnika AIRFOX Foxytech wynosiła ok. 82 %, dla czujnika HMP 45 – 77 %, dla grudnia 2018 oraz stycznia i lutego 2019, odpowiednio 88 i 82 %, 86 i 79 % oraz 71 i 68 % (tab. 6). Wyższe były również minimalne wartości wilgotności względnej, rejestrowane przez czujnik AIRFOX Foxytech (tab. 5), wyraźnie zaznaczała się też większa ilość przypadków z wilgotnością względną na poziomie 100 % rejestrowana przez czujnik AIRFOX Foxytech (załącznik 1., ryc. XVI – XVIII). Ta sama prawidłowość występowała również w odniesieniu do prężności pary wodnej – wartości e wyliczone w oparciu o dane z czujnika AIRFOX Foxytech były przeciętnie o 0,5 – 0,6 hPa wyższe niż te, wyliczone w oparciu o dane z czujnika HMP 45 (tab. 7).

Tabela 6 Podstawowe charakterystyki zmian wilgotności względnej powietrza U [%] zmierzonych za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech (oznaczenie U Foxy) oraz czujnika wilgotności względnej powietrza Vaisala HMP 45 zainstalowanego w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW r (oznaczenie U Kosiby), w okresie 01.12.2018 godz. 00:00 – 28.02.2019 godz. 23:59.

	grudzień			styczeń			luty			cały okres		
	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg
U Kosiby	99,997	44,611	81,945	99,997	36,099	79,120	99,997	14,761	67,992	99,997	14,761	76,599
U Foxy	99,000	47,000	87,917	99,000	43,000	86,085	99,000	19,000	70,905	99,000	19,000	82,005

Tabela 7 Podstawowe charakterystyki zmian prężności pary wodnej e [hPa], wyliczone w oparciu o dane o temperaturze i wilgotności względnej powietrza, zmierzone za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech (oznaczenie e Foxy) oraz czujnika temperatury i wilgotności względnej powietrza Vaisala HMP 45 zainstalowanego w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW r (oznaczenie e Kosiby), w okresie 01.12.2018 godz. 00:00 – 28.02.2019 godz. 23:59.

	grudzień			styczeń			luty			cały okres		
	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg	max	min	avg
e Kosiby	10,900	2,900	6,203	8,600	2,400	4,870	10,100	1,600	5,239	10,900	1,600	5,444
e Foxy	11,000	3,300	6,695	9,400	3,000	5,412	9,800	2,200	5,831	11,000	2,200	5,987

Mimo wskazanych różnic, porównanie przebiegu zmian wilgotności względnej powietrza rejestrowanych przez czujnik AIRFOX Foxytech i czujnik HMP 45 pokazuje, że czujnik AIRFOX Foxytech zadowalająco odtwarza dynamikę zmian tej wielkości – wyjątkiem są tylko sytuacje z wysoką wilgotnością, w których analizowany czujnik osiąga szybciej wilgotność 100 %, oraz sytuacje, w których różnice między rejestrowanymi wartościami wilgotności względnej wynikają z różnej lokalizacji czujników. Są to przede wszystkim sytuacje radiacyjne, w których występują głębokie spadki temperatury przy powierzchni podłoża, omówione w rozdziale poświęconym temperaturze powietrza. Powodują one, że wartości wilgotności względnej rejestrowane przez czujnik HMP 45, umieszczony na wysokości 2 m nad podłożem są wyższe niż wartości rejestrowane przez czujnik AIRFOX Foxytech na wysokości 15 m (spadek temperatury powietrza powoduje zmniejszenie prężności pary nasyconej, a tym samym wzrost wilgotności względnej powietrza, zgodnie z formułą $U = \frac{e}{E} \cdot 100\%$, gdzie U – wilgotność względna powietrza, e – aktualna prężność pary wodnej w powietrzu, E – prężność pary nasyconej dla danej temperatury). W ciągu omawianych trzech miesięcy takie sytuacje najbardziej wyraźnie zaznaczyły się w następujących okresach (załącznik 1, ryc. XVI – XVIII):

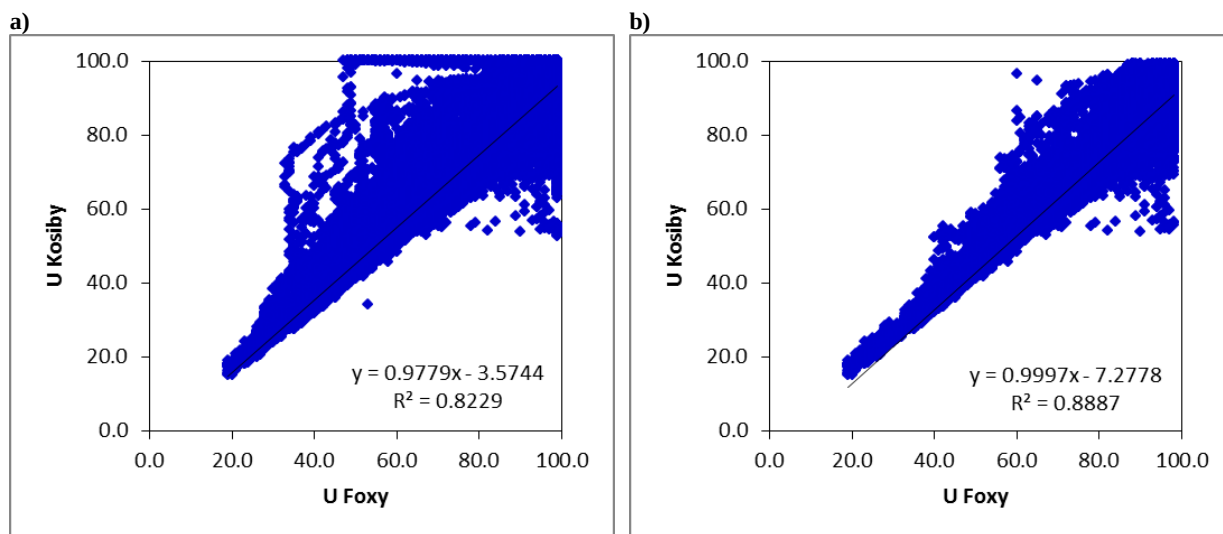
- 12-13.12.2018 godz. 18:00 – 9:00
- 16.12.2018 godz. 00:00 – 23:00
- 18-19.12.2018 godz. 18:00 – 9:00
- 19-21.01.2019 godz. 18:00 – 9:00
- 29-30.01.2019 godz. 18:00 – 9:00
- 15-19.02.2019 godz. 18:00 – 9:00
- 22-24.02.2019 godz. 18:00 – 9:00
- 27-28.02.2019 godz. 18:00 – 9:00

Wskazania czujników AIRFOX Foxytech i HMP 45 wykazują wysoką korelację (współczynnik determinacji $R^2 = 0,8229$; ryc. 12a), chociaż wykres rozrzutu dla porównywanych wartości pokazuje wyraźne niezgodności dla sytuacji w których wilgotność względna na czujniku HMP 45 osiąga 100% oraz „artefakty” wyraźnie niezgodne z generalną zależnością pomiędzy wskazaniami czujników (ryc. 12a, zał. 1, ryc. XVI – XVIII b, d, f). Wyeliminowanie z zestawu analizowanych danych zasygnalizowanych wyżej sytuacji wątpliwych, w których różnice wskazań wynikają jednoznacznie z lokalizacji czujników, wyraźnie poprawia korelację ($R^2 = 0,8887$; ryc. 12b), z wykresu rozrzutu znikają również wspomniane wyżej „artefakty”. Należy zaznaczyć, że mimo poprawy korelacji dopasowanie danych wyraźnie zmniejsza się dla wartości wilgotności względnej powietrza powyżej 70 %. Zdaniem autorów za taki stan rzeczy odpowiadają następujące czynniki:

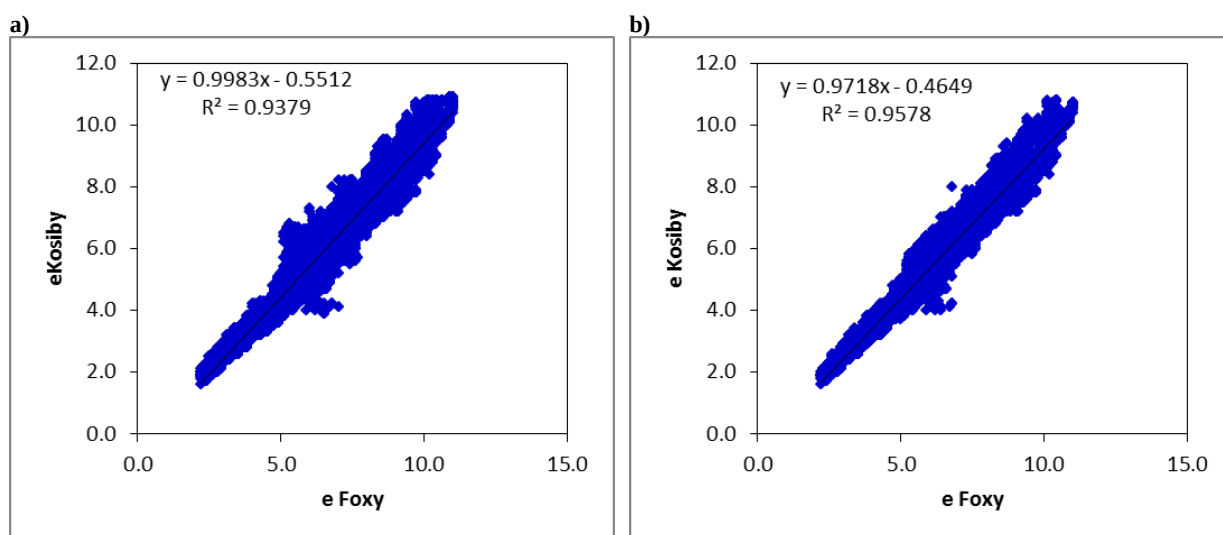
1. Powszechnie znane trudności techniczne przy pomiarach wilgotności względnej powietrza metodą pojemnościową, związane z pochłanianiem wilgoci przez element pomiarowy urządzeń i trudnościami z jej odparowaniem w warunkach podwyższonej wilgotności powietrza – wysoka

wilgotność powietrza, a tym samym niewielki niedosyt wilgotności (zwłaszcza w warunkach pogody chłodnej, która dominowała podczas pomiarów) spowalniają intensywność procesów parowania i ograniczają szybkość reakcji czujnika na zmiany wilgotności powietrza. Oddziaływanie tego zjawiska zależy w dużej mierze od konstrukcji czujnika – wpływają na nie takie czynniki jak powierzchnia i objętość elementu pomiarowego oraz obecność bądź brak osłony czujnika przeciwdziałającej osadzaniu się na nim produktów kondensacji pary wodnej.

2. Różnice temperatury powietrza pomiędzy czujnikami, związane z ich odmienną lokalizacją – mimo próby wyeliminowania tego czynnika przez usunięcie wskazanych wyżej danych budzących wątpliwości, należy założyć, że różnice takie, choć na znacznie mniejszym poziomie, zaznaczały się podczas całego okresu pomiarowego i miały wpływ na rejestrowane wartości wilgotności względnej powietrza (zawyżenie wartości U dla czujnika znajdującego się w strefie o niższej temperaturze powietrza).



Ryc. 12 Korelacja wartości wilgotności względnej powietrza U [%], zmierzonej przy użyciu czujnika AIRFOX Foxytech (oznaczenie U Foxy) z wartościami wilgotności względnej zmierzonymi czujnikiem HMP 45, na wys. 2 m nad podłożem (oznaczenie U Kosiby); ryc. a przedstawia wykres rozrzutu dla całej analizowanej serii danych, ryc. b. wykres rozrzutu dla serii z usuniętymi sytuacjami wątpliwymi.



Ryc. 13 Korelacja wartości prężności pary wodnej e [hPa], zmierzonej przy użyciu czujnika AIRFOX Foxytech (oznaczenie e Foxy) z wartościami prężności pary wodnej zmierzonymi czujnikiem HMP 45, na wys. 2 m nad podłożem (oznaczenie e Kosiby); ryc. a przedstawia wykres rozrzutu dla całej analizowanej serii danych, ryc. b. wykres rozrzutu dla serii z usuniętymi sytuacjami wątpliwymi.

Tą drugą hipotezę wspiera dodatkowo wysoka korelacja wartości prężności pary wodnej e wyliczonych w oparciu o wskazania czujnika AIRFOX Foxytech i czujnika HMP 45, zarówno dla

pełnego zestawu danych ($R^2 = 0,9379$; ryc. 13a), jak i dla zestawu danych z usuniętymi sytuacjami wątpliwymi ($R^2 = 0,9578$; ryc. 13b). Ponieważ wielkość ta reprezentuje rzeczywistą zawartość pary wodnej w powietrzu i w przypadku wilgotności poniżej 100 % nie jest zależna od zróżnicowania temperatury powietrza między punktami lokalizacji czujników, wysoka korelacja analizowanych wartości wskazuje na poprawne rejestrowanie przez czujnik AIRFOX Foxytech zmian parametrów wilgotnościowych powietrza.

Tabela 8 Statystyki różnic wartości wilgotności względnej powietrza zmierzonych za pomocą urządzenia AIRFOX Foxytech oraz czujnika HMP 45 w Obserwatorium ZKiOA IGRR UWr dla okresu 01.12.2018 godz. 00:00 – 31.01.2019 godz. 23:00; d_U – różnica między wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech (U Foxy) i wskazaniami czujnika HMP 45 (U Kosiby); $d_U = U_{\text{Foxy}} - U_{\text{Kosiby}}$; $d_{U \text{ kor}}$ – różnica między wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech i wskazaniami czujnika HMP 45 po usunięciu sytuacji wątpliwych, gdy mierzone różnice wilgotności wynikały z różnic w lokalizacji czujników (objaśnienia w tekście).

	max	min	średnia	med.	odch. std.	10 percentyl	90 percentyl
d_U	46,482	-52,997	5,383	7,145	7,057	-2,997	11,835
$d_{U \text{ kor}}$	42,670	-36,170	7,304	8,691	4,941	0,211	12,000

Tabela 9 Statystyki różnic wartości prężności pary wodnej wyliczonych dla urządzenia AIRFOX Foxytech oraz czujnika HMP 45 w Obserwatorium ZKiOA IGRR UWr dla okresu 01.12.2018 godz. 00:00 – 31.01.2019 godz. 23:00; d_e – różnica między wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech (e Foxy) i wskazaniami czujnika HMP 45 (e Kosiby); $d_e = U_{\text{Foxy}} - U_{\text{Kosiby}}$; $d_{e \text{ kor}}$ – różnica między wskazaniami czujnika AIRFOX Foxytech i wskazaniami czujnika HMP 45 po usunięciu sytuacji wątpliwych, gdy mierzone różnice wilgotności wynikały z różnic w lokalizacji czujników (objaśnienia w tekście).

	max	min	średnia	med.	odch. std.	10 percentyl	90 percentyl
d_e	2,900	-1,500	0,562	0,600	0,378	0,000	1,000
$d_{e \text{ kor}}$	2,600	-1,200	0,634	0,700	0,306	0,200	1,000

Szczegółowa analiza różnic między parametrami wilgotnościowymi powietrza wskazywanymi przez czujnik AIRFOX Foxytech i czujnik HMP 45 (tab. 8, 9) pokazuje, że w przypadku wilgotności względnej dla całej serii pomiarowej średnie różnice wskazań wynoszą 5,383 % (przeciętnie urządzenie firmy Foxytech wskazuje wilgotność względną powietrza o 5,383 % wyższą niż czujnik HMP 45), przy odchyleniu standardowym równym 7,057 %, przy czym w 80% przypadków różnice mieszczą się w przedziale od -2,997 do 11,835 %. W przypadku prężności pary wodnej średnia różnica wynosi 0,562 hPa, przy odchyleniu standardowym równym 0,378 hPa i wartościach 10 i 90 percentyla odpowiednio 0,000 i 1,000 hPa. W przypadku serii z usuniętymi sytuacjami wątpliwymi, średnia różnica wskazań wilgotności względnej powietrza wynosi 7,304 %, a prężności pary wodnej – 0,634 hPa, zmniejsza się jednak rozrzut rejestrowanych różnic – wartości odchylenia standardowego wynoszą dla wilgotności względnej 4,941 %, a dla prężności pary wodnej 0,306 hPa, wartości 10 i 90 percentyla wynoszą odpowiednio dla wilgotności względnej 0,211 i 12,000 %, a dla prężności pary wodnej 0,200 i 1,000 hPa. Należy zaznaczyć, że mniejsza przeciętna różnica między wskazaniami czujników dla całego zestawu danych wynika z oddziaływania opisanych wyżej sytuacji z głębokimi spadkami temperatury przy powierzchni podłoża. Epizody te skutkowały wzrostem wartości wilgotności względnej rejestrowanych przez czujnik HMP 45 powyżej wartości rejestrowanych przez czujnik Foxytech. Wpłynęło to na okresowe „odwrócenie” różnic pomiędzy czujnikami i w efekcie zmniejszenie wartości średniej tych różnic. Ponieważ, jak wspomniano wyżej, sytuacje te nie wynikają z cech badanych czujników, ale z różnic w ich lokalizacji, wartości te nie mogą być brane pod uwagę przy generalnej ocenie poprawności działania czujników.

Przedstawione analizy pozwalają uznać, że urządzenie AIRFOX Foxytech w sposób zadawalający rejestruje parametry wilgotnościowe powietrza. Prawidłowo odtwarzany jest przebieg zmian wilgotności względnej, w większości przypadków zadawalający jest również czas reakcji czujnika na zmiany tej wielkości. Pewne zastrzeżenia budzić może zawyżanie wskazań wilgotności względnej powietrza przez analizowany czujnik, jednak różnica ta utrzymuje się przeciętnie na poziomie około 7 %, co uznać można za wartość w pełni akceptowalną, zwłaszcza że głównym przeznaczeniem urządzenia są pomiary warunków arosanitarnych. Podobnie jak w przypadku temperatury powietrza, pewną poprawę wskazań można by osiągnąć przez zmianę koloru obudowy (poprawa wskazań temperatury powietrza spowoduje również poprawę wskazań wilgotności) oraz zastosowanie osłony radiacyjnej na czujniku (ograniczenie osadzania się produktów kondensacji pary wodnej na czujniku).

3.2.4 Podsumowanie

Przedstawione powyżej wyniki wskazują na bardzo dobrą pracę czujnika Foxytech w przypadku rejestracji ciśnienia atmosferycznego oraz zadowalającą pracę w przypadku rejestracji temperatury powietrza i wilgotności względnej powietrza. Zidentyfikowane różnice wskazań w stosunku do urządzeń wykorzystanych jako referencyjne nie wymagają korekty, zwłaszcza w przypadku urządzenia optymalizowanego pod kątem pomiarów jakości powietrza. Należy jednak wskazać, że przedstawione wyniki porównań odnoszą się wyłącznie do testowanego egzemplarza urządzenia AIRFOX Foxytech, a ich reprezentatywność dotyczy wyłącznie pomiarów w warunkach zimowych. Ze względu na cechy konstrukcyjne testowanego urządzenia (ciemny kolor obudowy, brak osłony radiacyjnej na sondzie temperatury i wilgotności powietrza), w warunkach półrocza letniego, cechującego się większym dopływem promieniowania słonecznego i większym udziałem pogody bezchmurnej, należy spodziewać się znacznego pogorszenia wskazań temperatury i wilgotności powietrza, związanych z nadmiernym nagrzewaniem czujnika. Dokładne określenie zachowania czujnika AIRFOX Foxytech w takich warunkach byłoby możliwe po przeprowadzeniu dodatkowej serii pomiarów.

Ze względu na powyższe, zdaniem autorów niniejszego opracowania, wskazana jest modyfikacja urządzenia obejmująca zmianę koloru obudowy na biały i dodanie osłony radiacyjnej sondy temperatury i wilgotności powietrza.

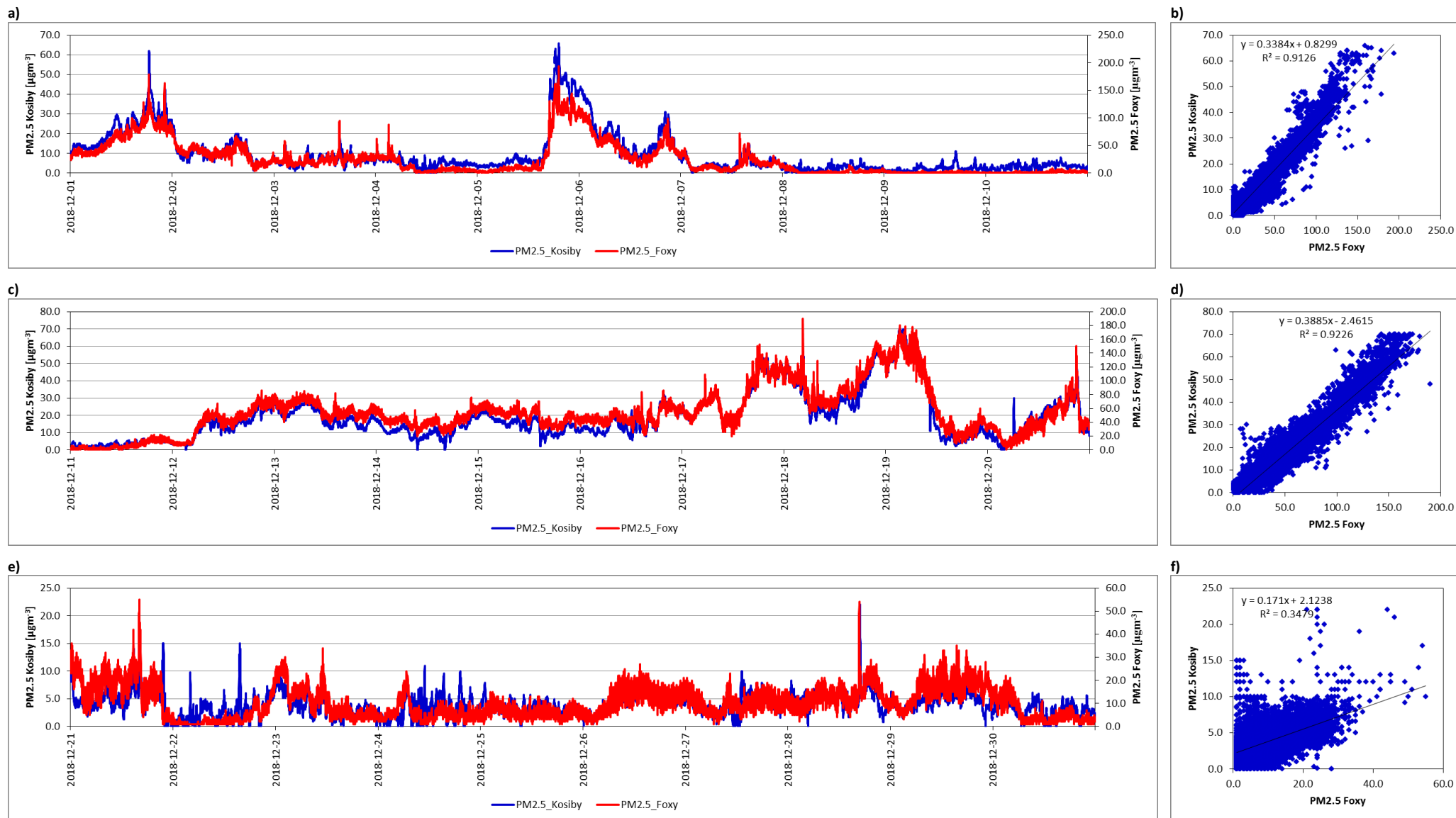
Literatura

Alduchov O.A., Eskridge, R.E., 1996, *Improved Magnus form approximation of saturation vapor pressure*, Journal of Applied Meteorology, 35 (4), s. 601-609

Załącznik 1

Wykresy szczegółowe

Przebieg zmian stężeń pyłu zawieszonego, ciśnienia atmosferycznego, temperatury powietrza i wilgotności względnej powietrza, rejestrowanych przez urządzenie AIRFOX Foxytech oraz urządzenia referencyjne, w podziale na okresy 10-dniowe

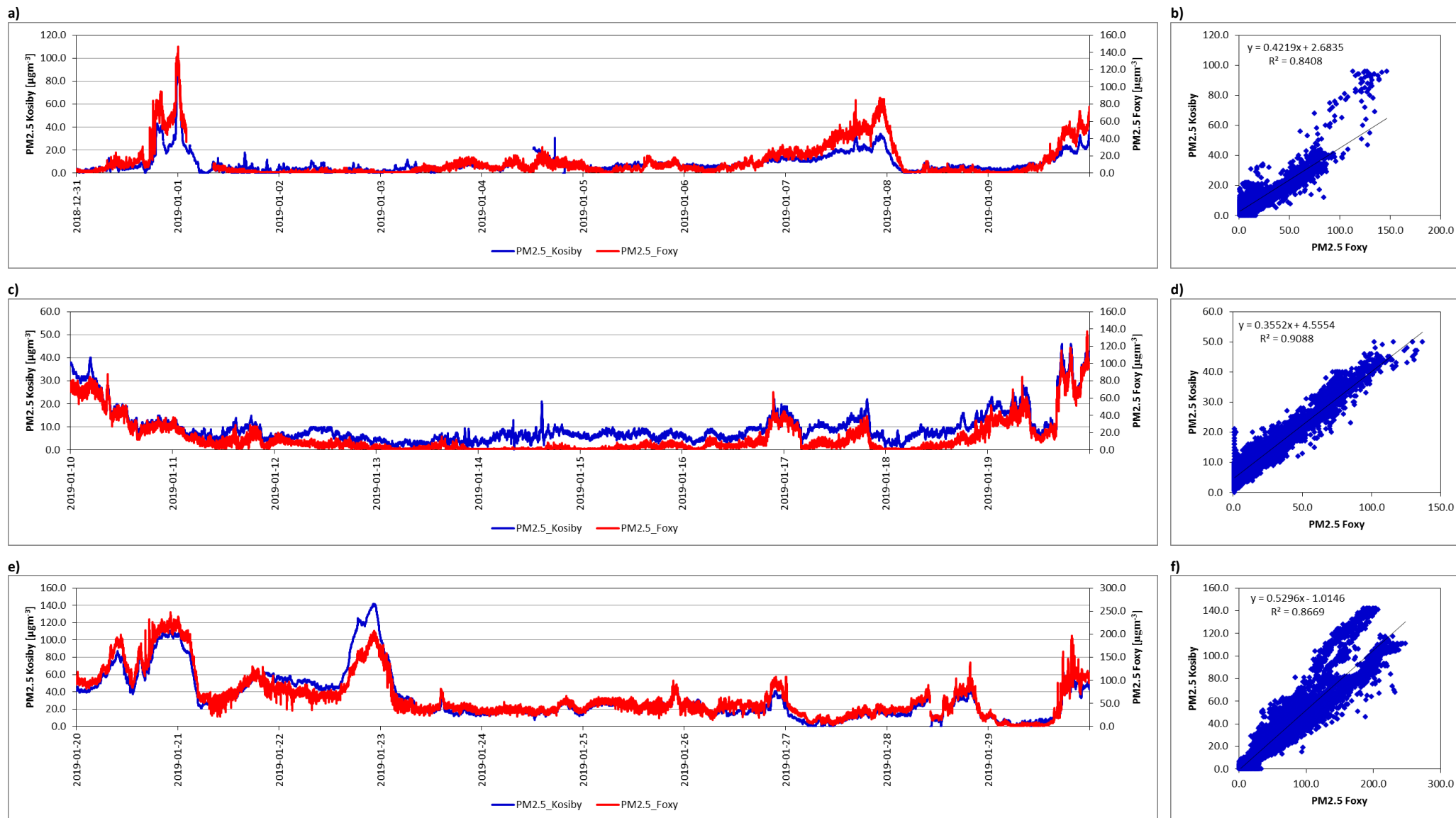


Ryc. I Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego $\text{PM}_{2.5}$, zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie PM2.5_Kosiby, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie PM2.5_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem AIRFOX Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem AIRFOX Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 11-20.12.2018

e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem AIRFOX Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 21-30.12.2018

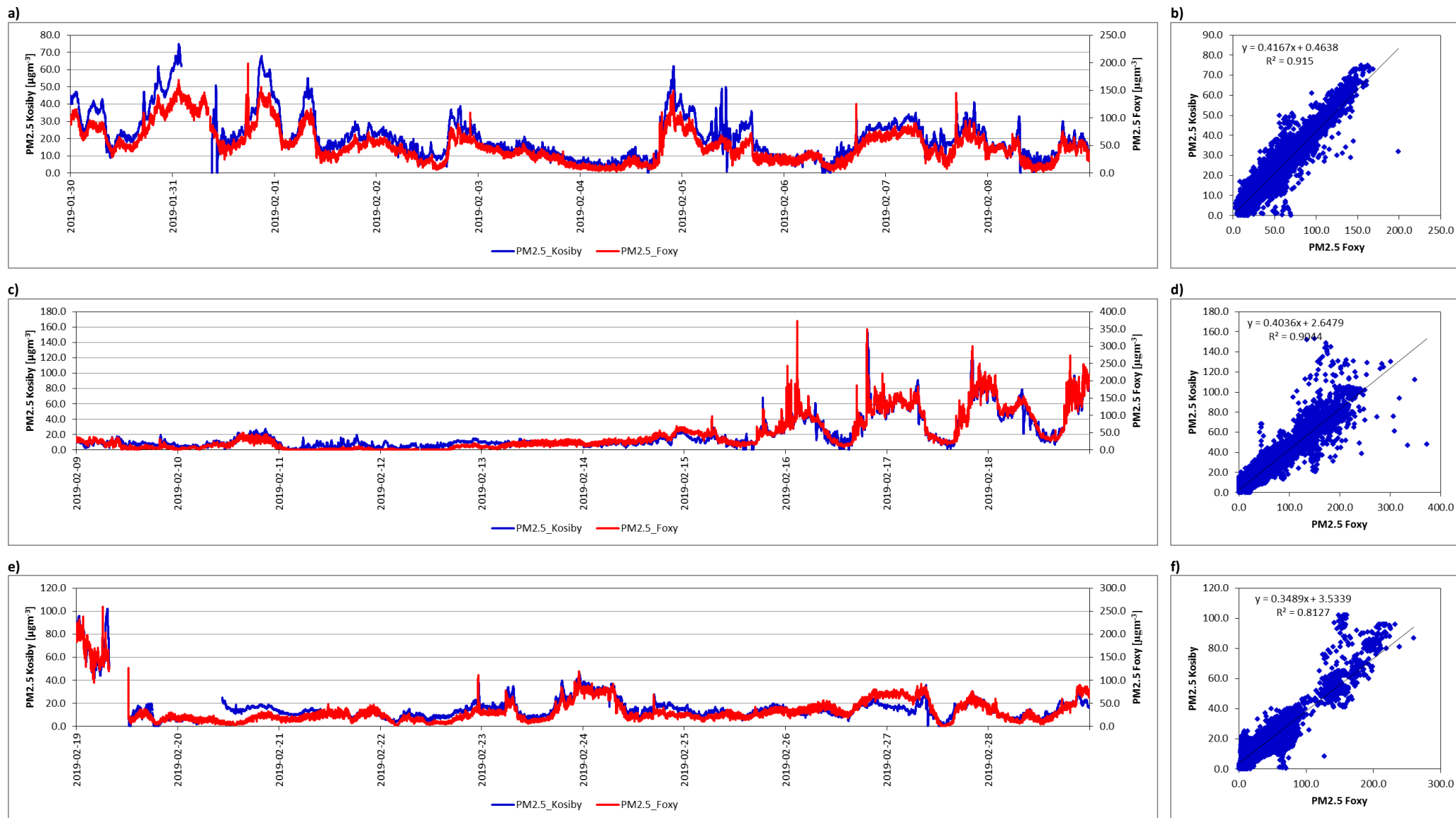


Ryc. II Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego $\text{PM}_{2.5}$, zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie PM2.5_Kosiby, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie PM2.5_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 31.12.2018-29.01.2019, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 31.12.2018-09.01.2019

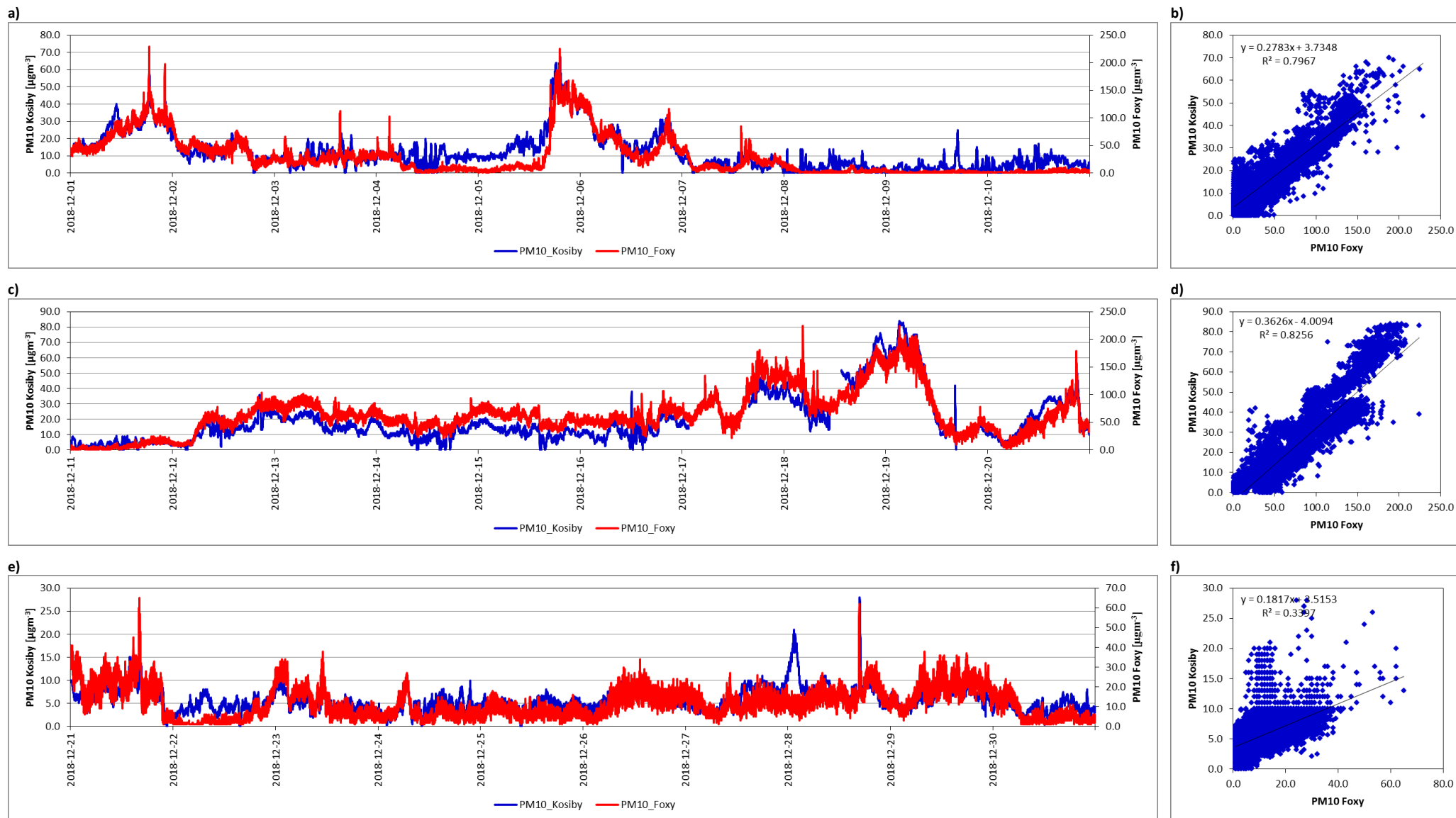
c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 10-19.01.2019

e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 20-29.01.2019



Ryc. III Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego $\text{PM}_{2.5}$, zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie PM2.5_Kosiby, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie PM2.5_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 30.01-28.02.2019, w podziale na okresy 10-dniowe

- a)** Porównanie zmienności stężeń dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; **b)** Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 30.01-08.02.2019
c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 10-19.01.2019; **d)** Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 09-18.02.2019
e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 20-29.01.2019; **f)** Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 19-28.02.2019

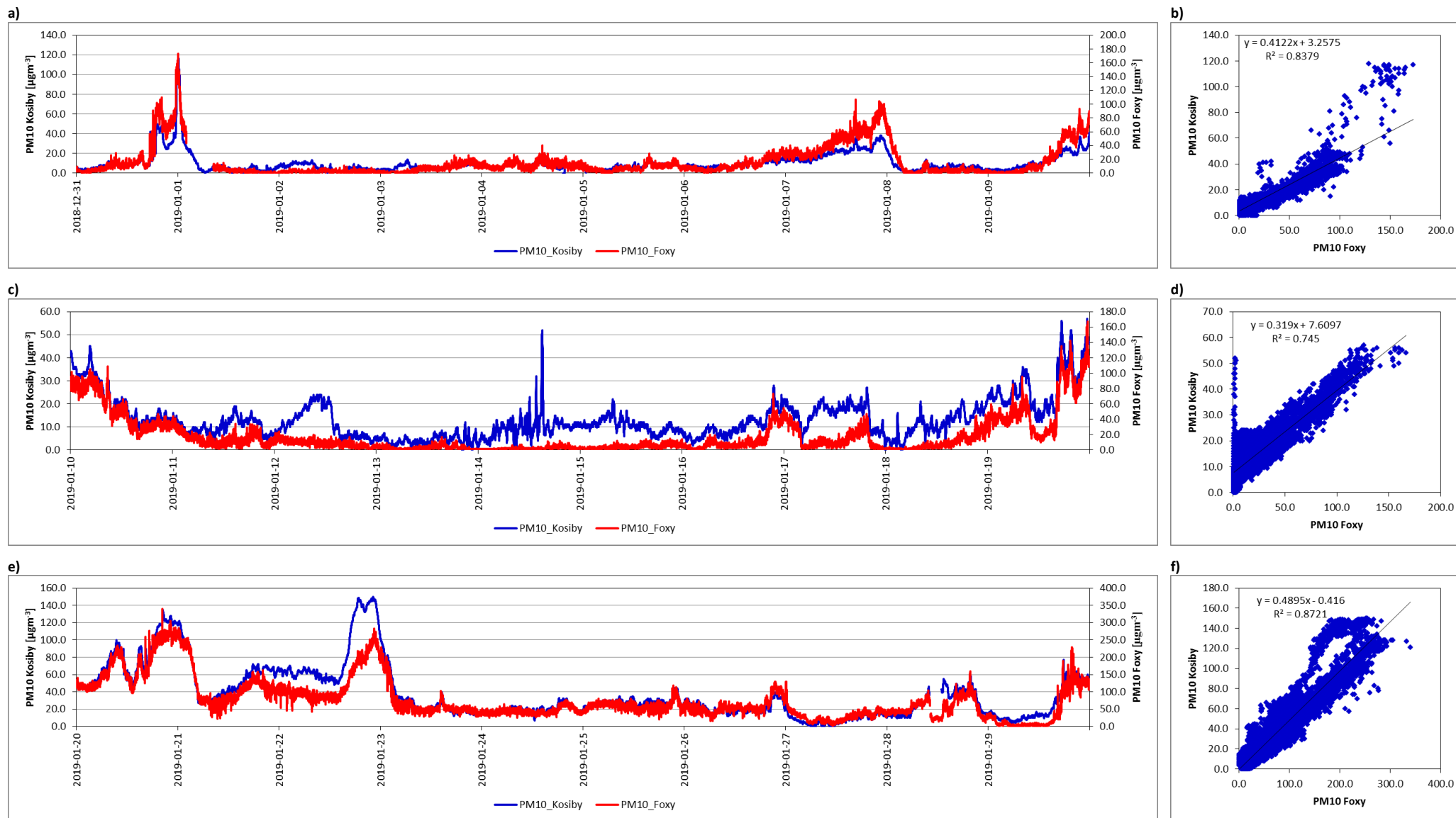


Ryc. IV Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego PM_{10} , zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie $\text{PM}_{2.5_Kosiby}$, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie $\text{PM}_{2.5_Foxy}$, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 11-20.12.2018

e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 21-30.12.2018

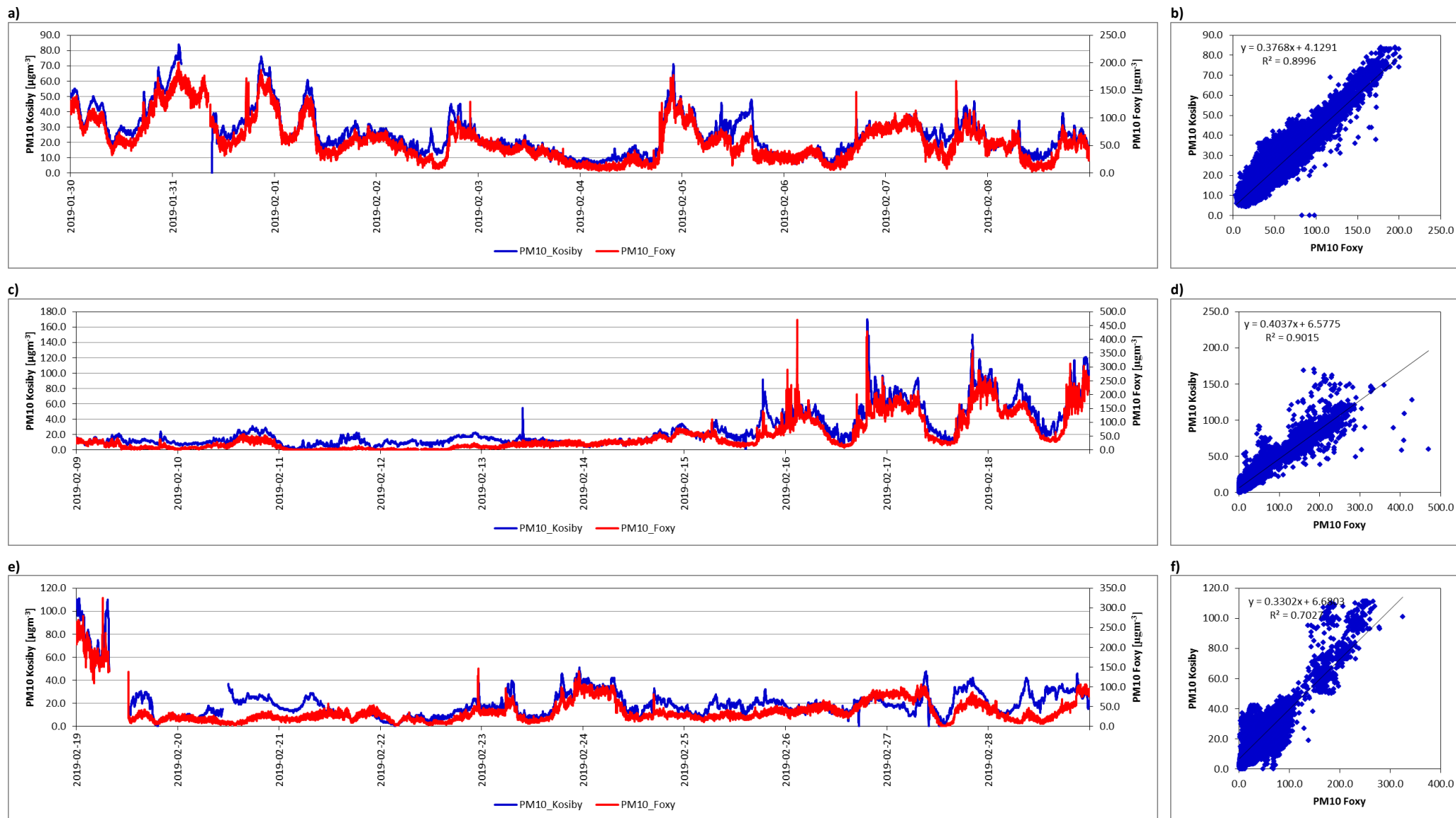


Ryc. V Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀, zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie PM2.5_Kosiby, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie PM2.5_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 31.12.2018-29.01.2019, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 31.12.2018-09.01.2019

c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 10-19.01.2019

e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 20-29.01.2019

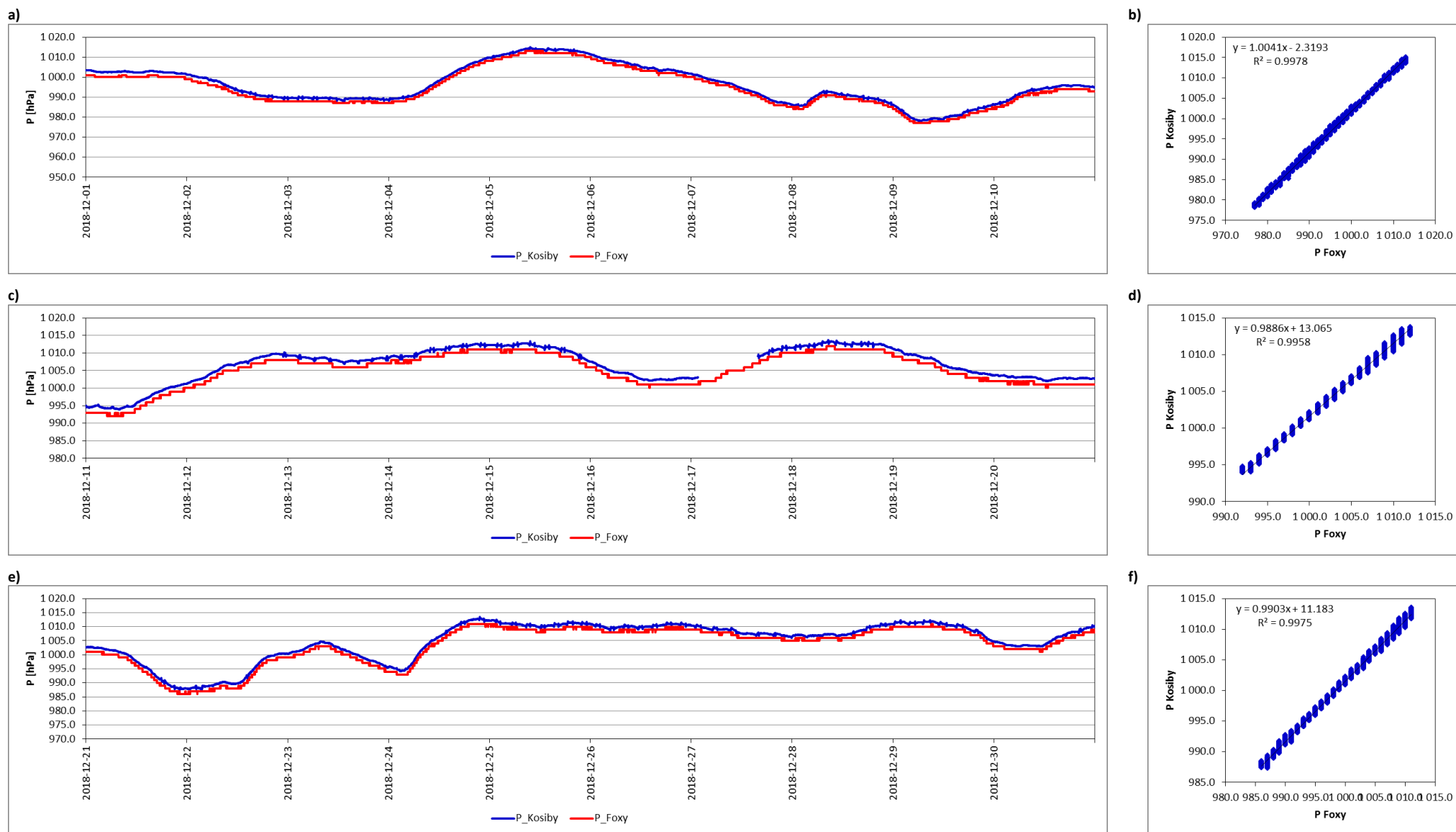


Ryc. VI Przebieg i korelacja stężeń pyłu zawieszonego PM₁₀, zmierzonych pyłomierzem TEOM (oznaczenie PM2.5_Kosiby, kolor niebieski) oraz pyłomierzem AIRFOX Foxytech (oznaczenie PM2.5_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 30.01-28.02.2019, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 30.01-08.02.2019

c) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 09-18.02.2019

e) Porównanie zmienności stężeń dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja stężeń zmierzonych pyłomierzem Foxytech i pyłomierzem TEOM dla okresu 19-28.02.2019

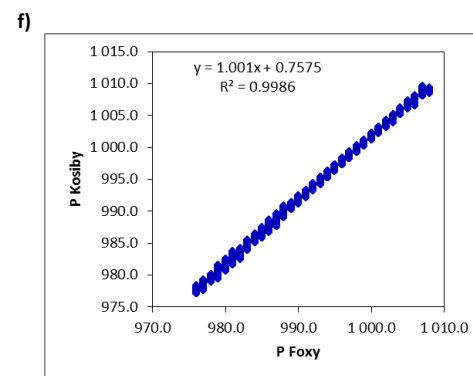
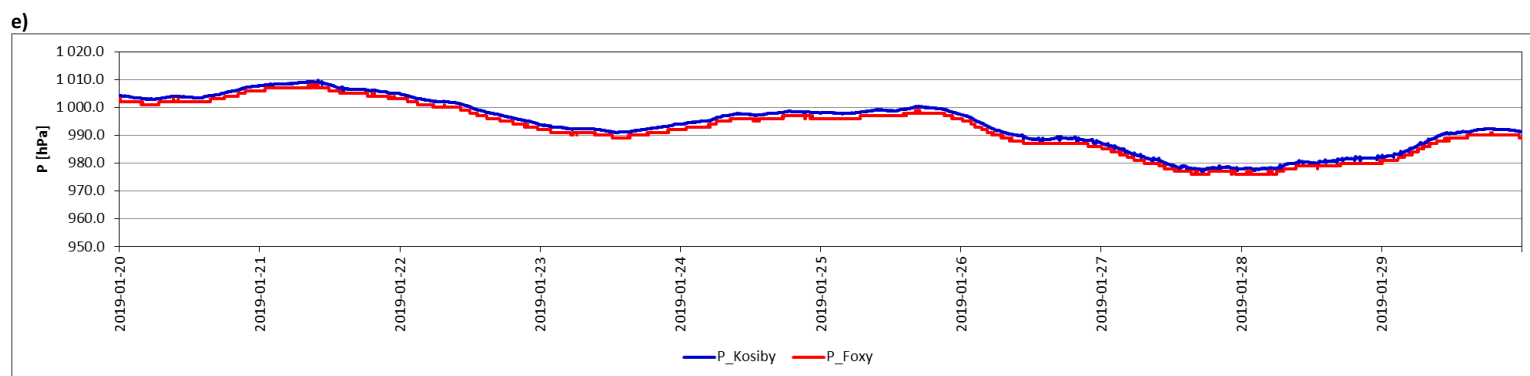
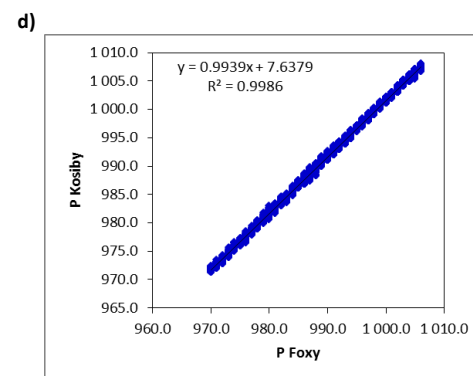
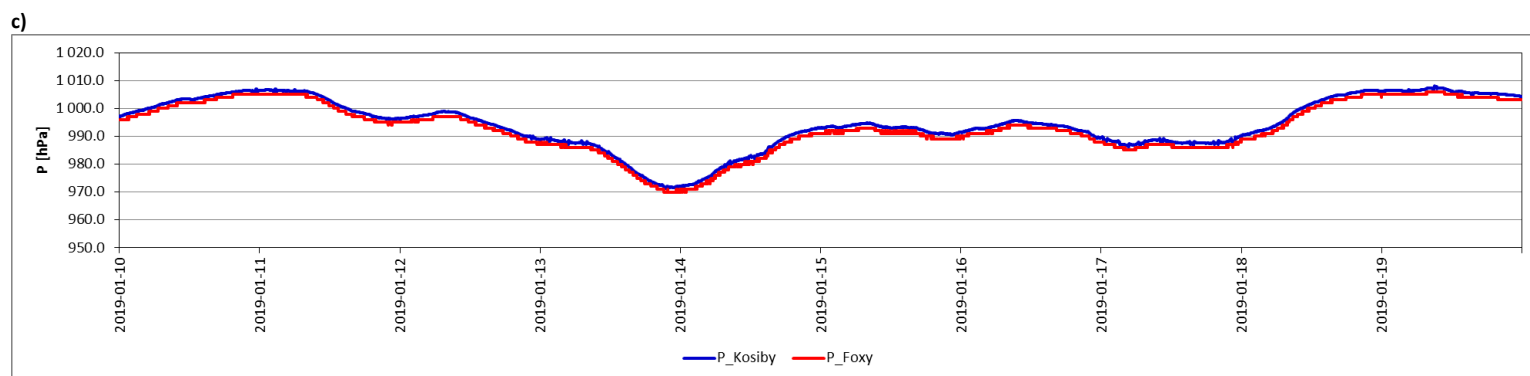
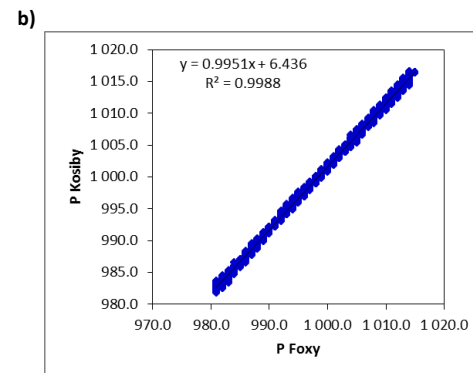
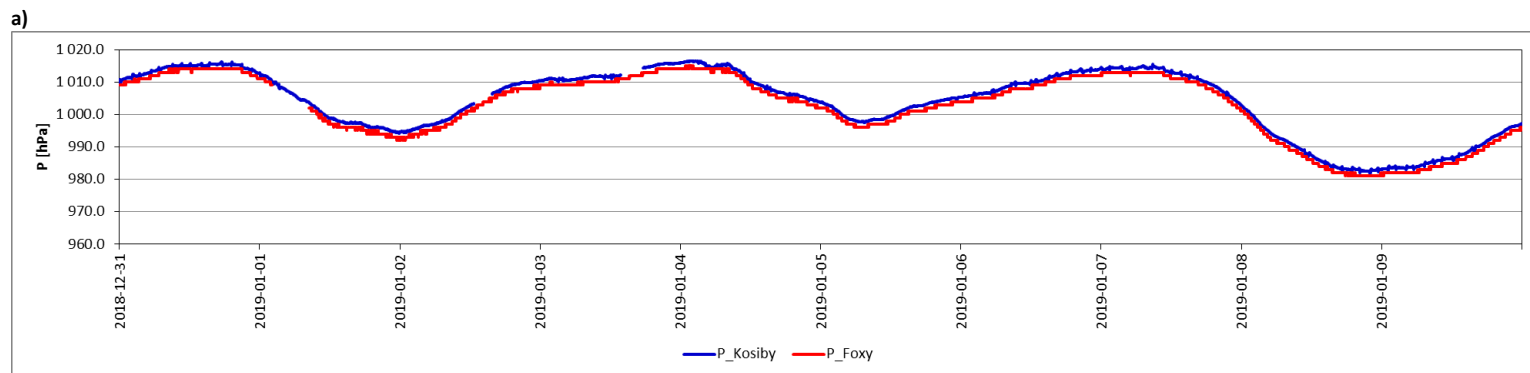


Ryc. VII Przebieg i korelacja wartości ciśnienia atmosferycznego P, zmierzonych czujnikiem Vaisala PTA 427, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie P_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie P_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności P dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności P dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 11-20.12.2018

e) Porównanie zmienności P dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 21-30.12.2018

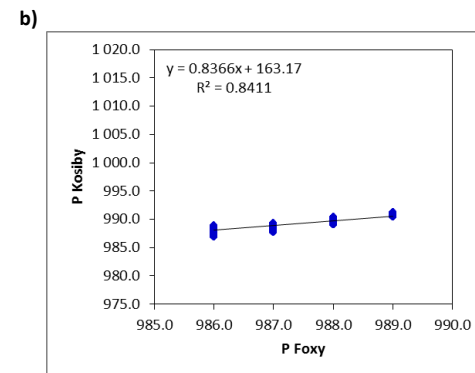
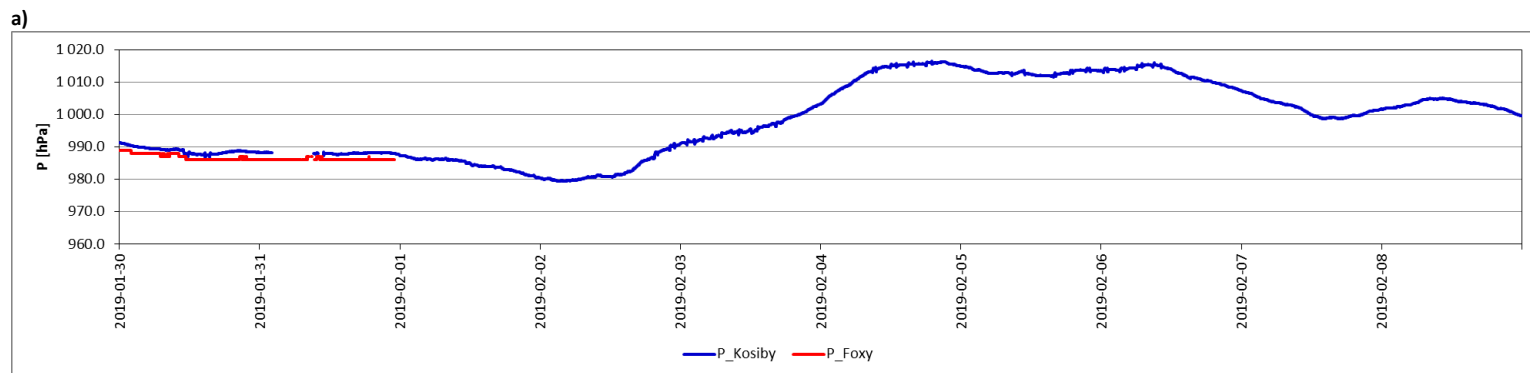


Ryc. VIII Przebieg i korelacja wartości ciśnienia atmosferycznego P, zmierzonych czujnikiem Vaisala PTA 427, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie P_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie P_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 31.12.2018-29.01.2019, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności P dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 31.12.2018-09.01.2019

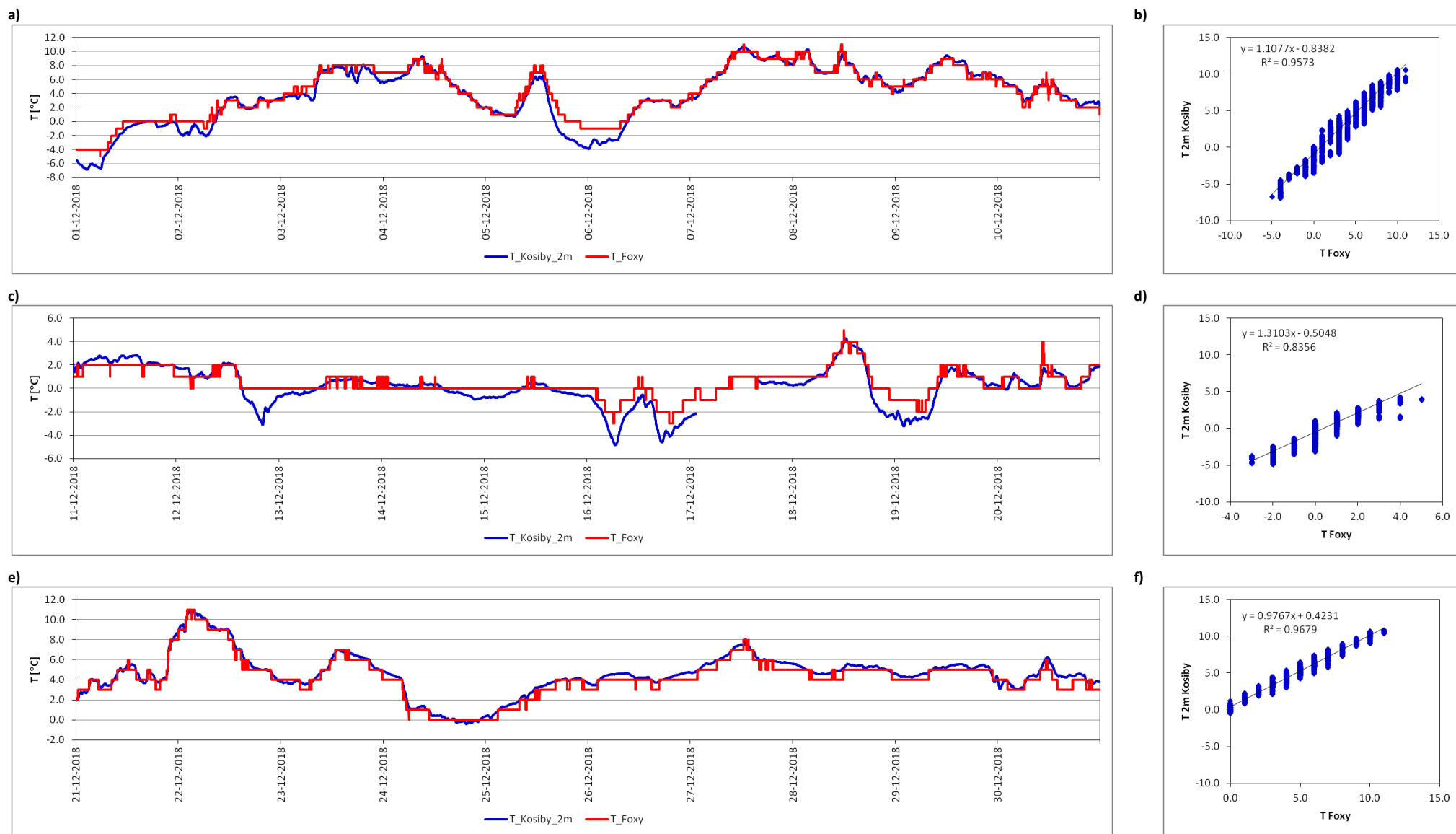
c) Porównanie zmienności P dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 10-19.01.2019

e) Porównanie zmienności P dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 20-29.01.2019



Ryc. IX Przebieg i korelacja wartości ciśnienia atmosferycznego P, zmierzonych czujnikiem Vaisala PTA 427, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie P_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie P_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 30.01-08.02.2019 (dane z urządzenia Foxytech kończą się 31.01.2019)

a) Porównanie zmienności P dla okresu 30.01-08.02.2019; b) Korelacja wartości P zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 31.12.2018-09.01.2019s

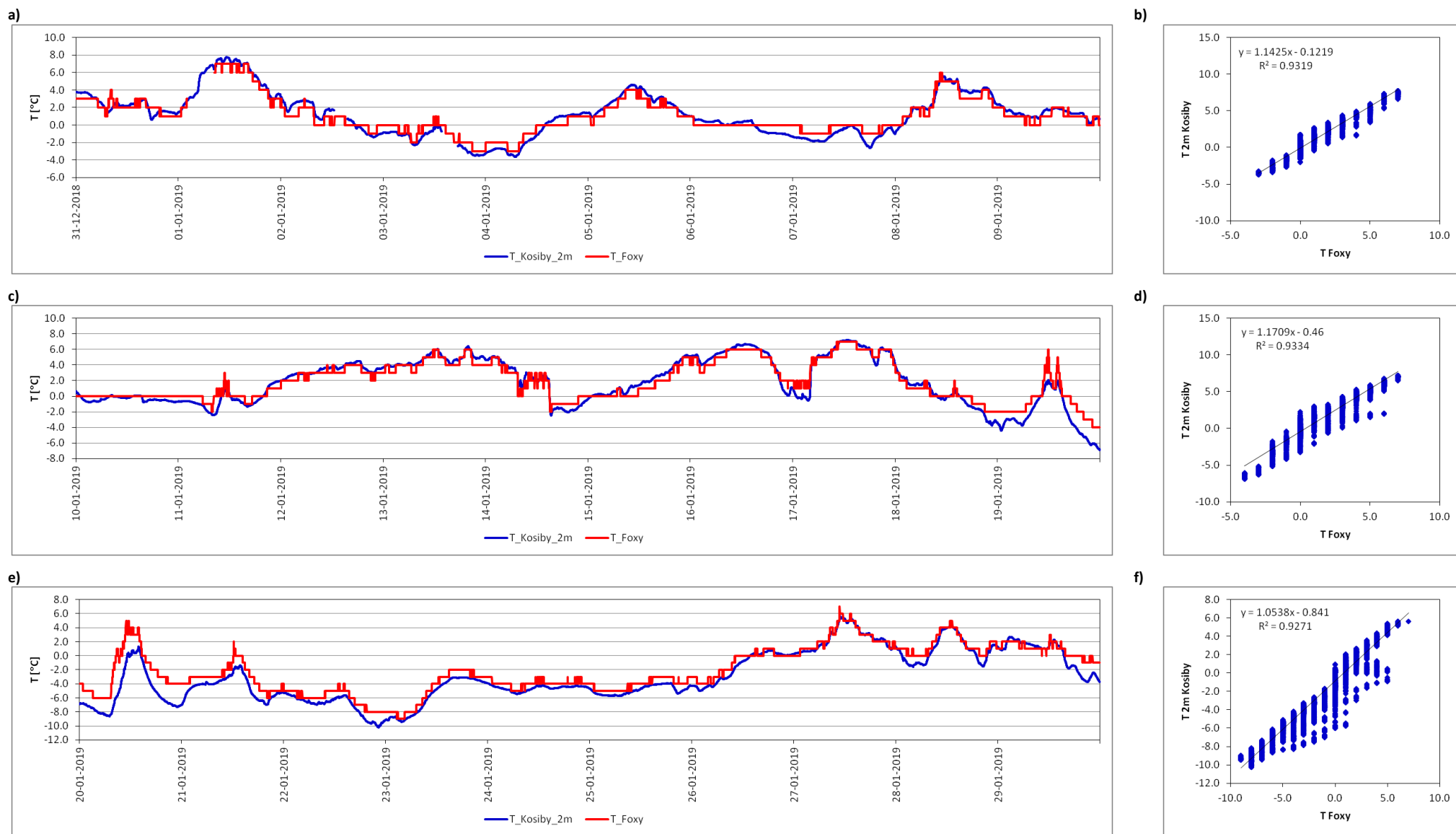


Ryc. X Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T , zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45, zainst. na wys. 2 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie T_{Kosiby_2m} , kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_{Foxy} , kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

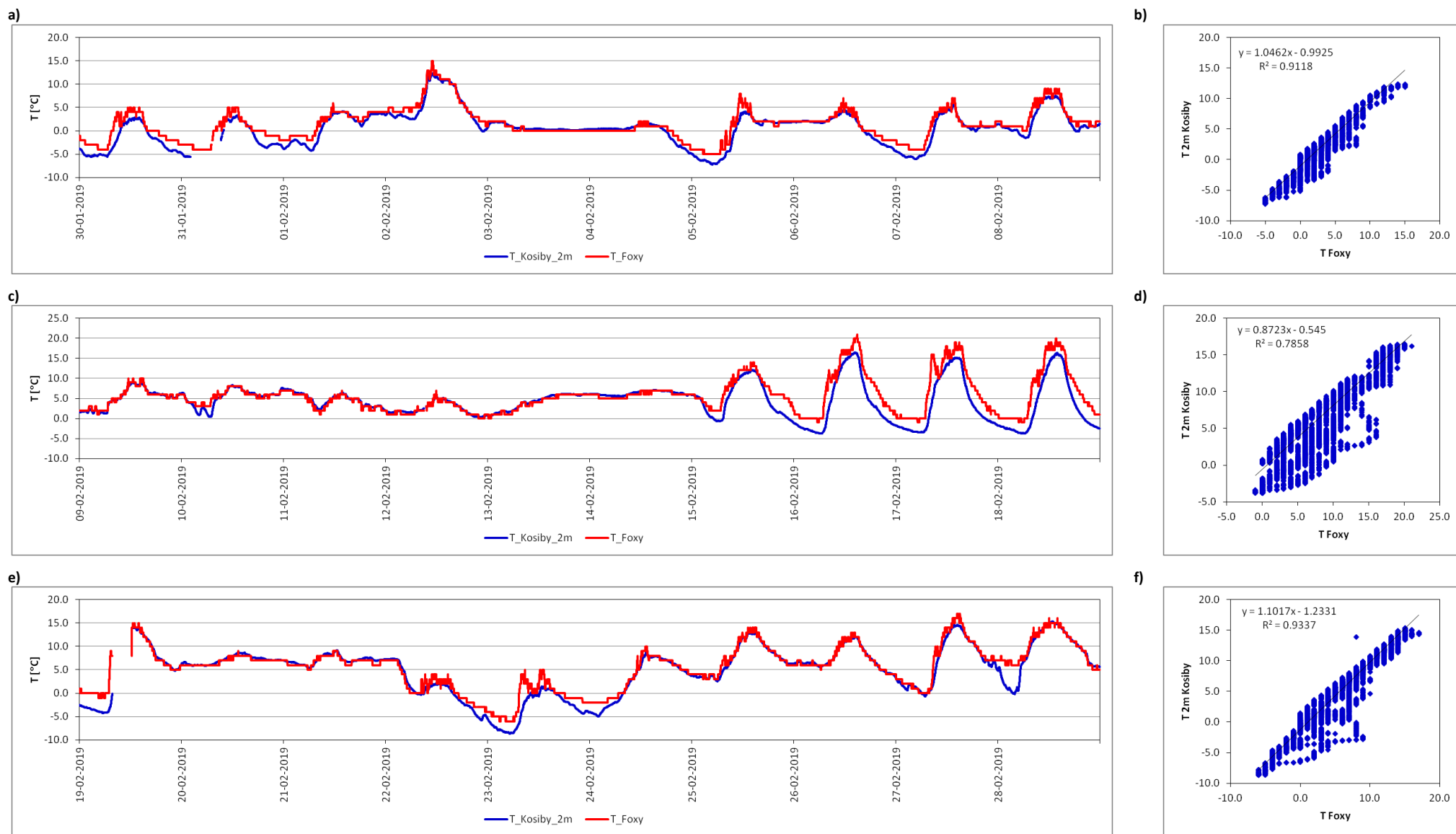
a) Porównanie zmienności T dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności T dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 11-20.12.2018

e) Porównanie zmienności T dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 21-30.12.2018



Ryc. XI Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T , zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45, zainst. na wys. 2 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie T_Kosiby_2m , kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_Foxy , kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe
a) Porównanie zmienności T dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 31.12.2018-09.01.2019
c) Porównanie zmienności T dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 10-19.01.2019
e) Porównanie zmienności T dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 20-29.01.2019

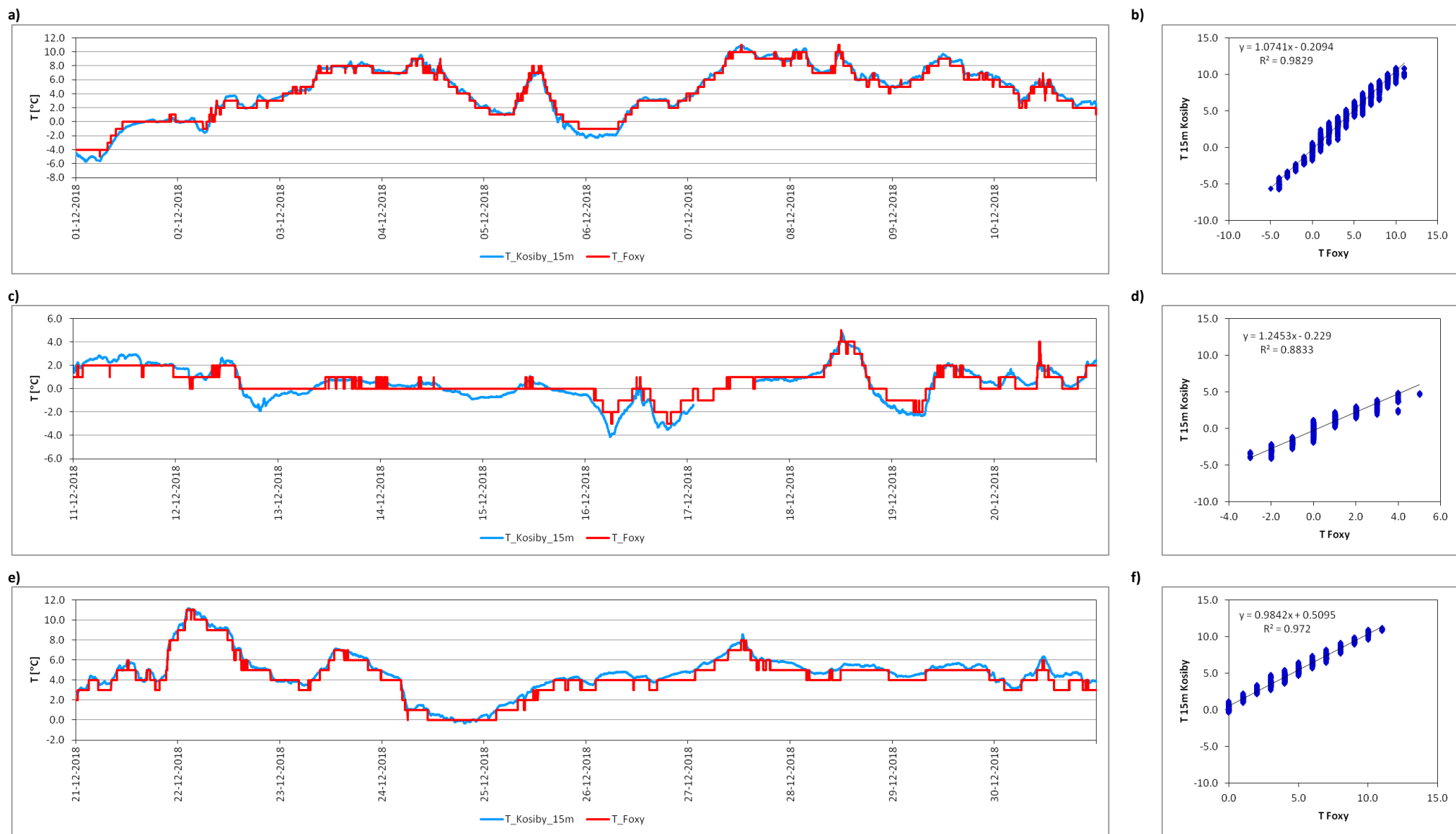


Ryc. XII Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T , zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45, zainst. na wys. 2 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie T_{Kosiby_2m} , kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_{Foxy} , kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności T dla okresu 30.01-08.02.2019; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 30.01-08.02.2019

c) Porównanie zmienności T dla okresu 09-18.02.2019; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 09-18.02.2019

e) Porównanie zmienności T dla okresu 19-28.02.2019; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 19-28.02.2019

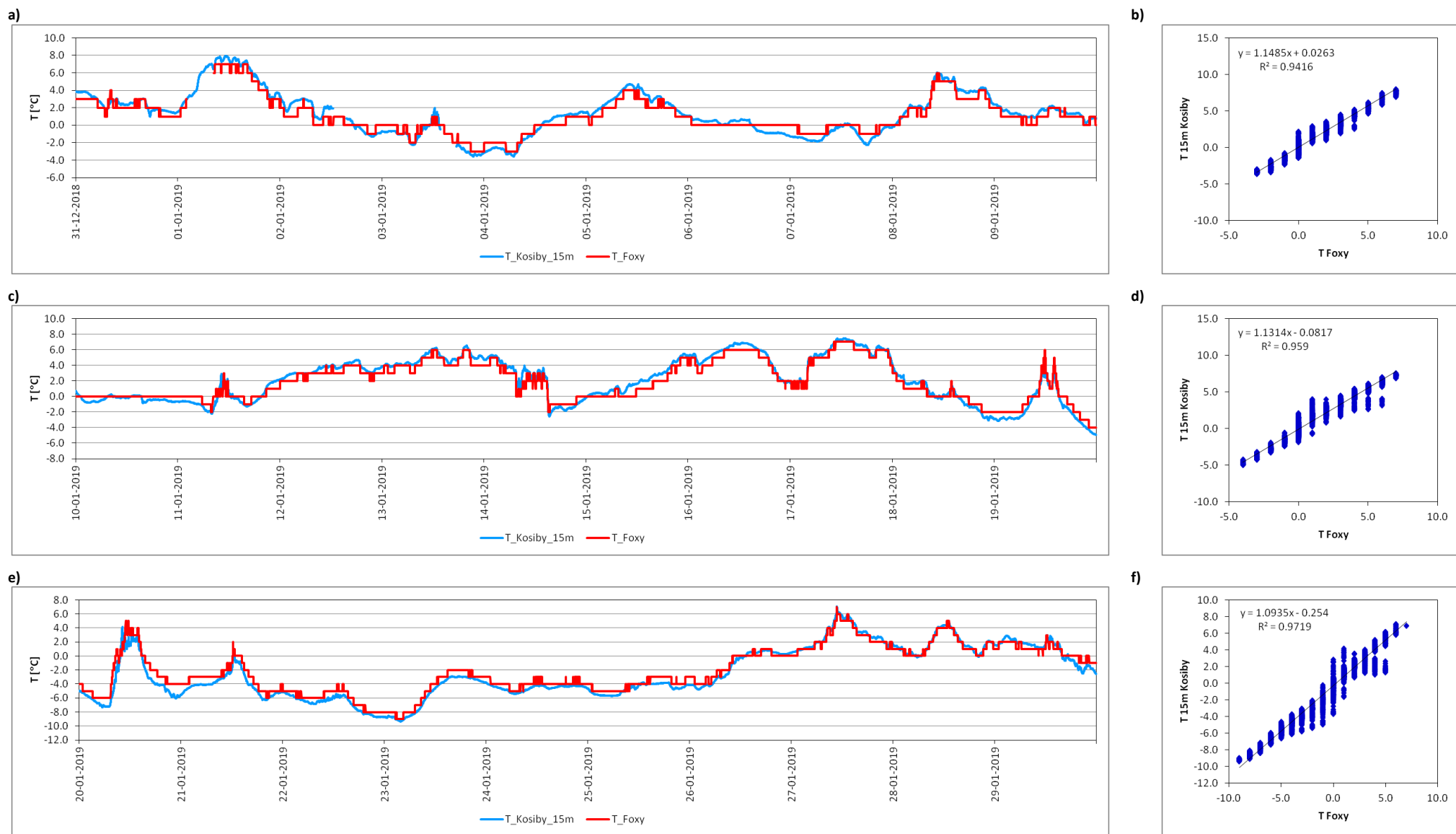


Ryc. XIII Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T , zmierzonych czujnikiem PT 100, zainst. na wys. 15 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie $T_{\text{Kosiby_15m}}$, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_{Foxy} , kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

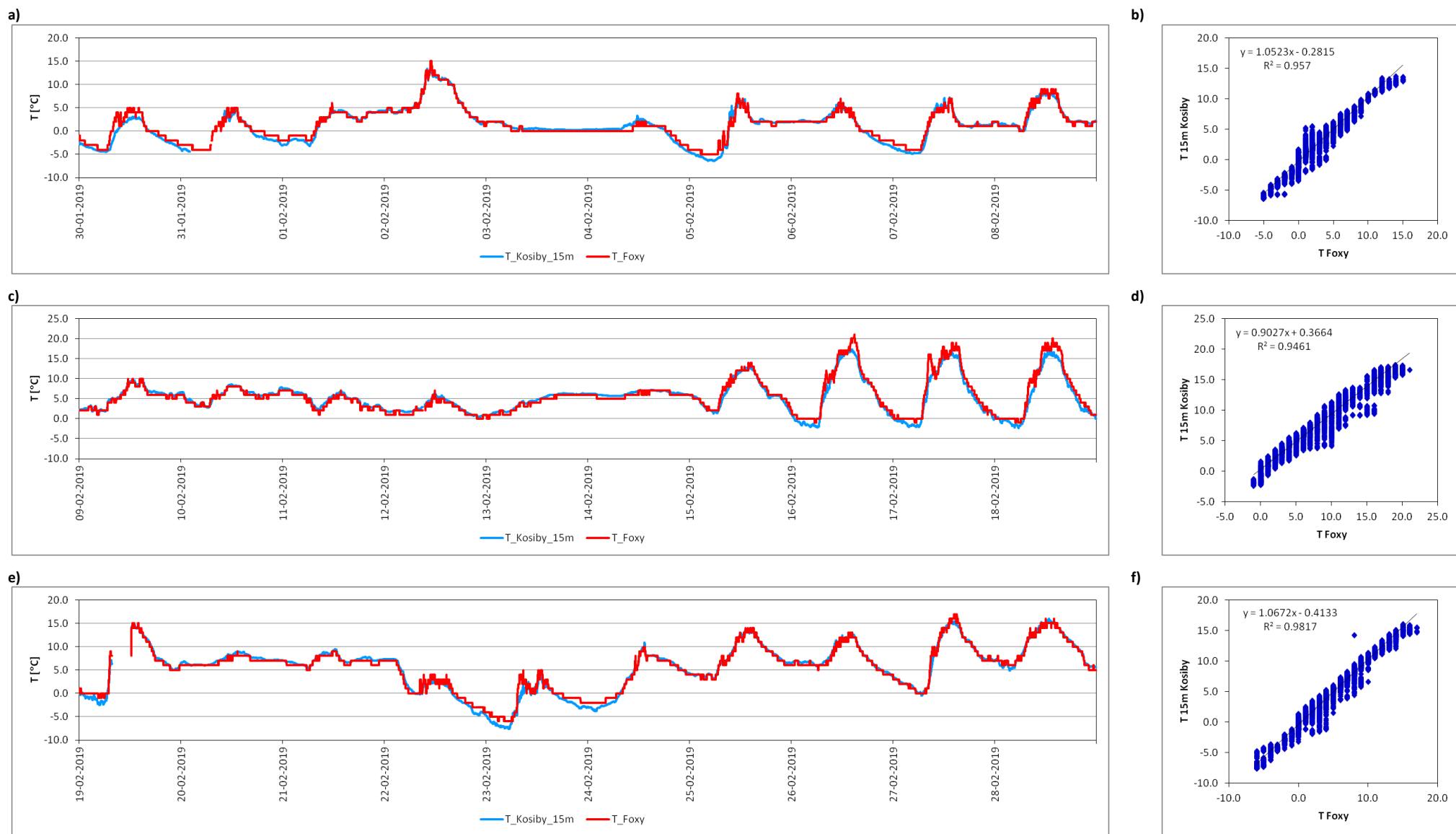
a) Porównanie zmienności T dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności T dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 11-12.2018

e) Porównanie zmienności T dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 21-30.12.2018



Ryc. XIV Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T, zmierzonych czujnikiem PT 100, zainst. na wys. 15 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie T_Kosiby_15m, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe
a) Porównanie zmienności T dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 31.12.2018-09.01.2019
c) Porównanie zmienności T dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 10-19.01.2019
e) Porównanie zmienności T dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 20-29.01.2019

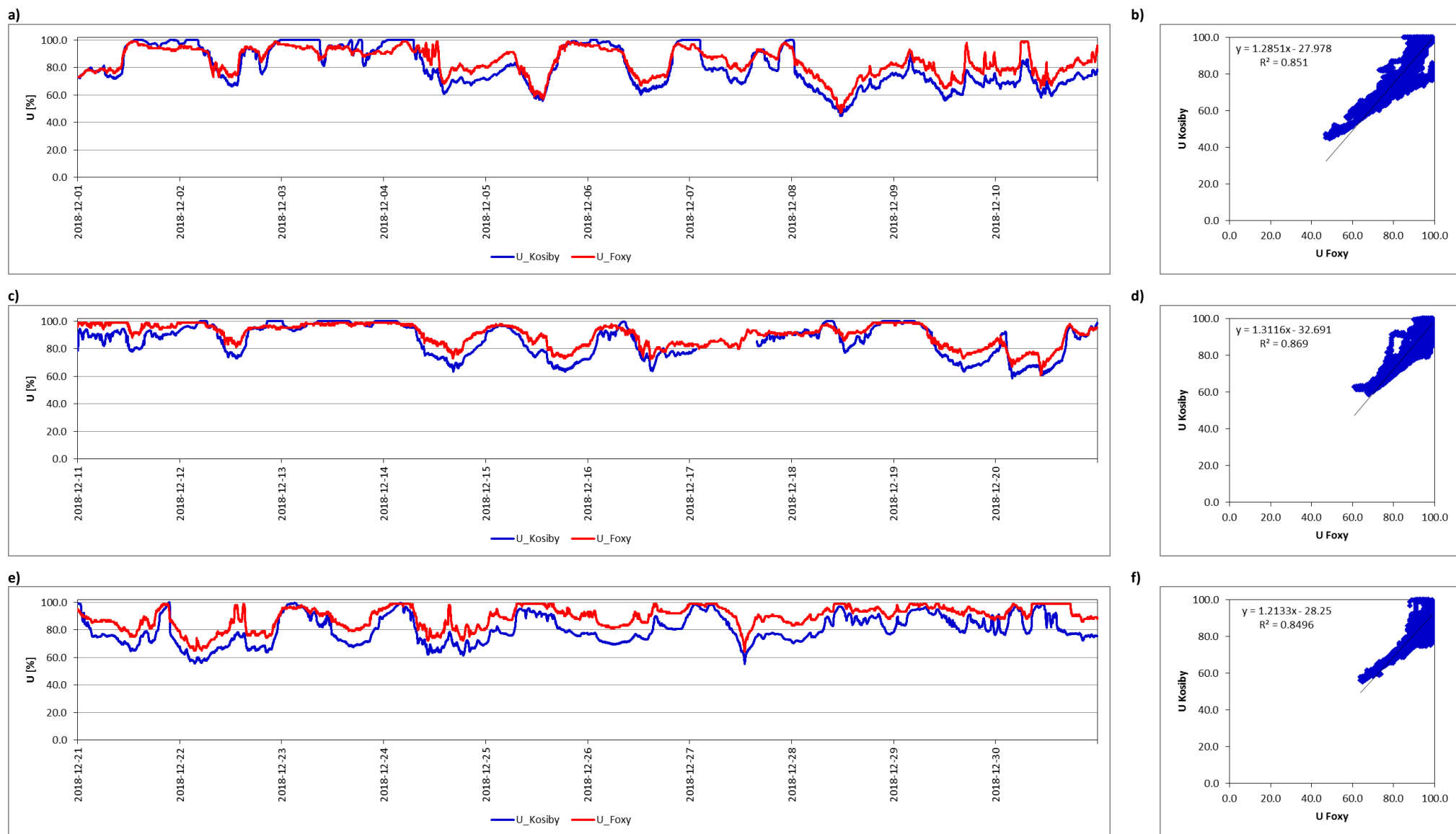


Ryc. XV Przebieg i korelacja wartości temperatury powietrza T, zmierzonych czujnikiem PT 100, zainst. na wys. 15 m, wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW (oznaczenie T_Kosiby_15m, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie T_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności T dla okresu 30.01-08.02.2019; b) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 30.01-08.02.2019

c) Porównanie zmienności T dla okresu 09-18.02.2019; d) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 09-18.02.2019

e) Porównanie zmienności T dla okresu 19-28.02.2019; f) Korelacja wartości T zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 19-28.02.2019

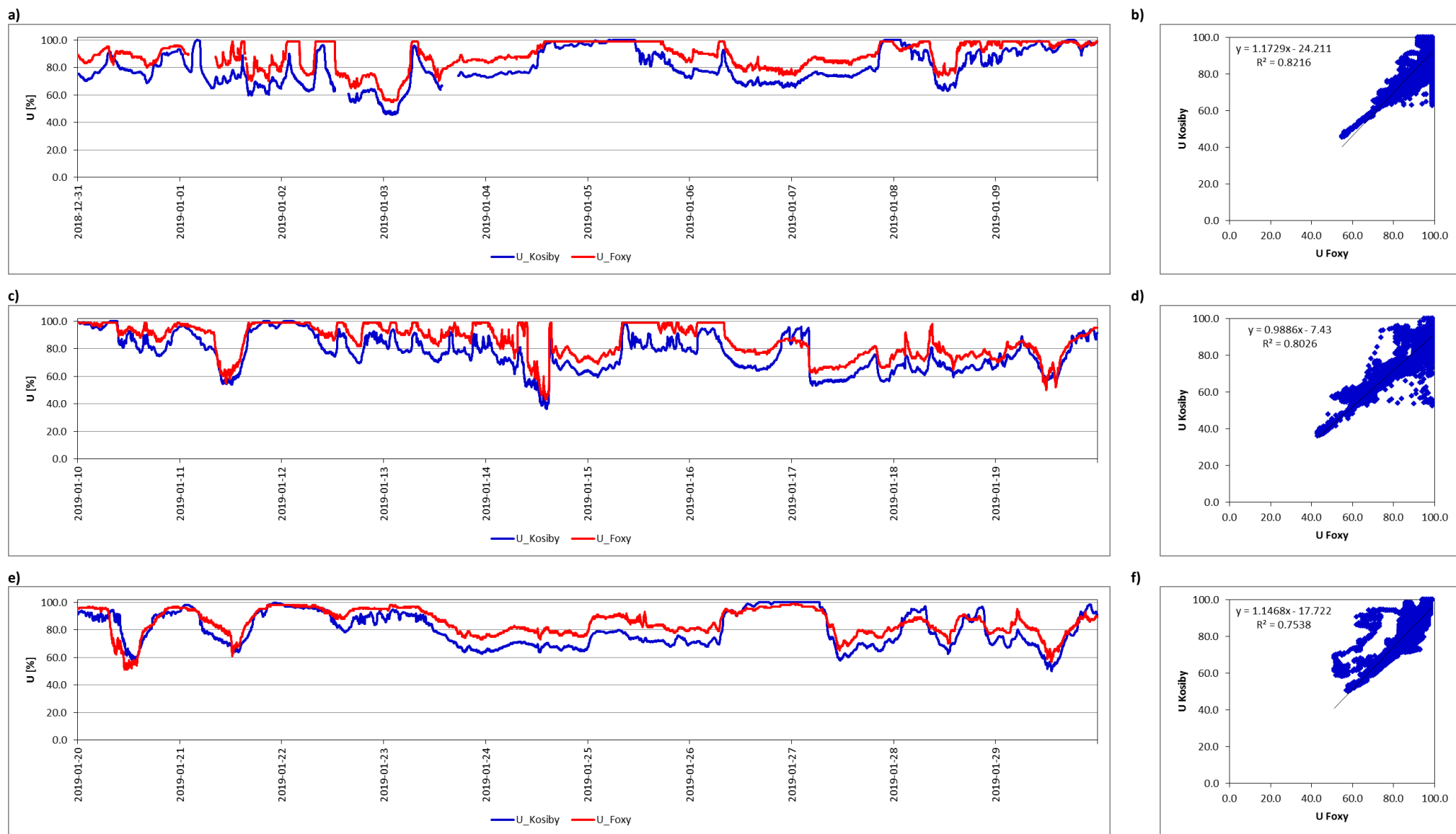


Ryc. XVI Przebieg i korelacja wartości wilgotności względnej powietrza U, zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45 , wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW r (oznaczenie U_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie U_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW r, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności U dla okresu 01-10.12.2018; b) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 01-10.12.2018

c) Porównanie zmienności U dla okresu 11-20.12.2018; d) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 11-20.12.2018

e) Porównanie zmienności U dla okresu 21-30.12.2018; f) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 21-30.12.2018

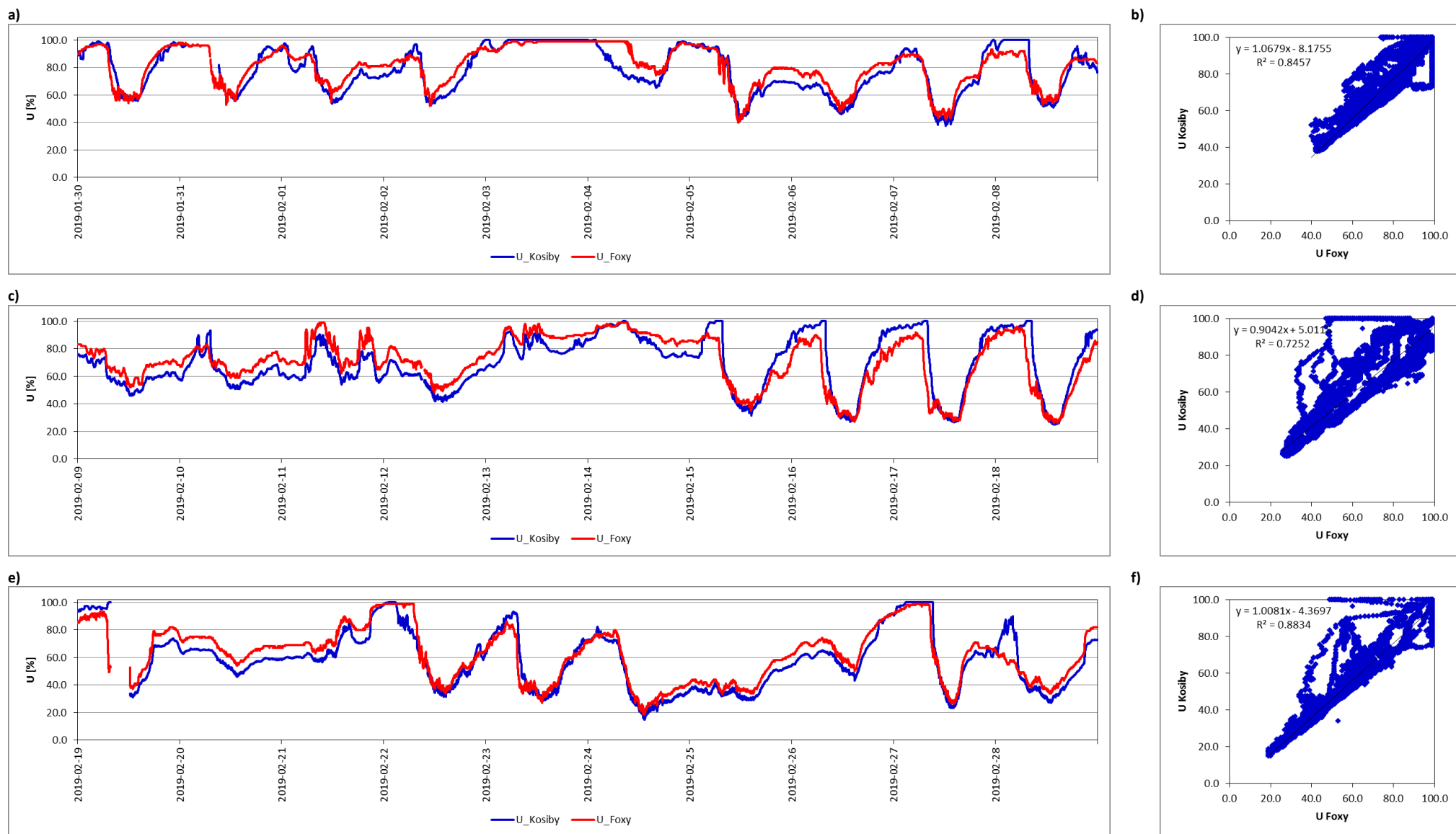


Ryc. XVII Przebieg i korelacja wartości wilgotności względnej powietrza U, zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45 , wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UW r (oznaczenie U_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie U_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UW r, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności U dla okresu 31.12.2018-09.01.2019; b) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 31.12.2018-09.01.2019

c) Porównanie zmienności U dla okresu 10-19.01.2019; d) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 10-19.01.2019

e) Porównanie zmienności U dla okresu 20-29.01.2019; f) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 20-29.01.2019



Ryc. XVIII Przebieg i korelacja wartości wilgotności względnej powietrza U, zmierzonych czujnikiem Vaisala HMP45 , wchodzącym w skład systemu pomiarowego Obserwatorium Zakładu Klimatologii i Ochrony Atmosfery IGRR UWr (oznaczenie U_Kosiby, kolor niebieski) oraz czujnikiem zainstalowanym w pyłomierzu AIRFOX Foxytech (oznaczenie U_Foxy, kolor czerwony), na stanowisku pomiarowym w Obserwatorium ZKiOA IGRR UWr, według surowych danych minutowych, w okresie 01-30.12.2018, w podziale na okresy 10-dniowe

a) Porównanie zmienności U dla okresu 30.01-08.02.2019; b) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 30.01-08.02.2019

c) Porównanie zmienności U dla okresu 09-18.02.2019; d) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 09-18.02.2019

e) Porównanie zmienności U dla okresu 19-28.02.2019; f) Korelacja wartości U zmierzonych pyłomierzem Foxytech i czujnikiem Vaisala dla okresu 19-28.02.2019