

P O L I T E C H N I K A Ś L ą S K A

INSTYTUT FIZYKI
CENTRUM NAUKOWO – DYDAKTYCZNE
ZAKŁAD ZASTOSOWAŃ
RADIOIZOTOPÓW

GADAM Centre of Excellence

KONARSKIEGO 22b
44-100 GLIWICE, POLAND
T: +48 32 237 22 54
Anna.Pazdur@polsl.pl
www.carbon14.pl

NIP: 631-020-07-36 / REGON: 000001637 / ING BANK ŚLĄSKI SA O/GLIWICE / NR RACHUNKU: 60 1050 1230 1000 0002 0211 3056

Gliwice, 20 marca 2017 r.

Recenzja pracy doktorskiej

Mgr inż. Aliny Jasek-Kamińskiej

Tytuł pracy:

Badanie zmienności strumienia i składu izotopowego biogenicznych emisji dwutlenku węgla do atmosfery na terenie aglomeracji krakowskiej

Promotor pracy:

Prof. dr hab. Kazimierz Różański

Promotor pomocniczy: dr inż. Mirosław Zimnoch

Praca została wykonana Zespole Fizyki Środowiska Katedry Zastosowań Fizyki Jądrowej na Wydziale Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej im. Stanisława Staszica w Krakowie

Uwagi ogólne

Tematyka pracy doktorskiej wpisuje się w najbardziej aktualne tematy badawcze realizowane dla potrzeb ochrony środowiska na Ziemi. Są to tematy dotyczące krótkookresowych zmian klimatu zarówno naturalnych, jak i zachodzących pod wpływem działalności człowieka. Działalność ta w sferze produkcji energii z paliw kopalnych, transportu i gospodarki odpadami powoduje emisję dwutlenku węgla do atmosfery. Zaburza to naturalny stan atmosfery z okresu poprzedzającego erę przemysłową, a więc stan sprzed około 200 lat. Dodatkowe emisje CO₂ do atmosfery przyczyniają się do nasilenia efektu cieplarnianego mającego istotny wpływ na zmiany temperatury Ziemi i atmosfery, a więc klimatu. Są to obecnie szeroko dyskutowane zagadnienia zarówno w skali kraju, jak i na świecie, mające

wpływ na strategię rozwoju przemysłu i transportu państw o wysokim stopniu rozwoju gospodarczego, umożliwiającą skuteczną eliminację źródeł emisji CO₂.

Najwięcej źródeł emisji CO₂ znajduje się na obszarach silnie uprzemysłowionych, w szczególności w aglomeracjach miejskich. Stosunkowo dobrze przebadana jest dotychczas całkowita emisja CO₂ pochodząca ze spalania paliw kopalnych podczas produkcji energii w elektrowniach, gospodarstwach domowych oraz transporcie i komunikacji oraz tzw. emisja biogeniczna. Prostymi pomiarami ilości emitowanego CO₂ strumieni tych dwóch rodzajów emisji – ze spalania paliw i emisji biogenicznej nie daje się rozróżnić. Udział poszczególnych rodzajów emisji w emisji całkowitej można wyznaczyć między innymi stosując pomiary składu izotopowego węgla w różnych elementach środowiska Ziemi: atmosferze, biosferze, litosferze oraz odpowiednie modelowanie matematyczne. Autorka zastosowała w swojej pracy doktorskiej inną metodykę badań – bezpośredni pomiar strumienia CO₂ pochodzącego z różnych źródeł, skupiając się przede wszystkim na oszacowaniu wielkości emisji CO₂ pochodzenia biogenicznego z obszarów zurbanizowanych. Wykonane pomiary składu izotopowego węgla (zawartości stabilnego izotopu ¹³C) w biosferycznym CO₂ nie odgrywają istotnej roli w interpretacji wyników badań.

Strumień biogenicznego CO₂ do atmosfery zawiera strumienie cząstkowe pochodzące z respiracji i rozkładu materii organicznej w glebie, rozkładu materii organicznej w wodach powierzchniowych oraz asymilacji CO₂ podczas fotosyntezy. Autorka pracy postawiła sobie jako nadrzędny cel zbadanie zmienności przestrzennej i czasowej tych strumieni w ekosystemie miejskim.

Pomiary strumienia CO₂ wykonała stosując metodę komorową i metodę akumulacji wirów (REA). Teren badań stanowił obszar miasta Krakowa, wody Wisły, teren Puszczy Niepołomickiej. Wyodrębnione do badań stanowiska pomiarowe i metody pomiarowe miały na celu umożliwić zbadanie wpływu stopnia urbanizacji na strumień CO₂ pochodzący z gleby i jego skład izotopowy, strumień CO₂ pochodzący z wód powierzchniowych oraz oszacowanie strumienia związanego z asymilacją w biosferze. Uzyskane wyniki badań i stosowane modele matematyczne miały na celu określenie zmienności krótko- i długoterminowej wartości strumienia netto z terenu miasta oraz oszacowanie bilansu węgla dla miasta Krakowa. Jednym z celów badań była również ocena przydatności metody komorowej pomiaru strumienia CO₂ na obszarze miejskim.

Opis realizacji głównego celu pracy zawiera osiem rozdziałów, w klasycznym układzie pracy doktorskiej, z których pierwsze trzy stanowią omówienie podstaw fizycznych i uzasadnienie podjętego tematu i metodyki badań (rozdziały 1-3), kolejne dwa (rozdziały 4-5) opisują

szczegółowo stosowane metody pomiarowe oraz charakterystykę stanowisk pomiarowych w terenie i uzasadnienie ich wyboru, w rozdziale 6. znajdujemy przedstawienie wyników badań, ich interpretację i dyskusję, rozdział 7. zawiera opis bilansu węgla w atmosferze Krakowa z oszacowaniem emisji antropogenicznej i biogenicznej CO₂. Rozdział 8. stanowi podsumowanie pracy. Dodatkowe dwa rozdziały zawierają materiały uzupełniające w postaci dwóch aneksów dotyczących opracowania wyników i analizy ich niepewności, uzyskanych w metodzie komorowej i metodzie REA, oraz spis literatury.

Podkreślić należy interdyscyplinarność podjętej tematyki badawczej. Zastosowanie fizycznych metod pomiarowych wymagało włączenia elementów wiedzy z nauk o Ziemi zarówno na etapie planowania eksperymentu, jak i później podczas interpretacji i dyskusji wyników badań.

Uwagi szczegółowe dotyczące poszczególnych części pracy

Wprowadzenie i stosowane techniki pomiarowe

1. W rozdziale pierwszym autorka przedstawiła celowość i ważność podjętej tematyki badań zarówno w skali światowej, jak i krajowej. Sformułowała krótko cel swoich badań i sposób ich realizacji od strony metodyki badań, jak i źródeł finansowania. Podkreślić należy, że oprócz dotacji ministerialnej i uczelnianej, źródłem finansowania pracy były projekty europejskie: projekt COST-SIBAE i program ESF TTORCH.
2. Rozdział drugi opisuje obieg węgla w środowisku ze szczególnym uwzględnieniem roli biosfery, omówieniem źródeł antropogenicznego CO₂ oraz mechanizmów transportu CO₂ w atmosferze terenów zabudowanych. Opis ilustrowany jest poglądowymi schematami globalnego bilansu węglowego Ziemi za okres ostatnich 10 000 lat, w czasie których warunków środowiska były w miarę stabilne. Zawiera również schemat globalnego bilansu CO₂ dla atmosfery i bardzo szczegółowy schemat biosferycznej części cyklu węglowego dla obszarów kontynentalnych. Ta część cyklu węglowego, stosunkowo szczegółowo opisująca rolę dwutlenku węgla w biosferze i jego źródła, podkreślająca rolę fotosyntezy, aktywności respiracyjnej gleby, transportu gazów w środowisku glebowym, emisję CO₂ z rzek i strumieni, emisję CO₂ ze spalania paliw kopalnych i innych rodzajów działalności człowieka i jego obecności w biosferze wskazuje na szczegółowe aspekty badań eksperymentalnych, które uwzględnić będzie autorka w swojej pracy. Autorka podkreśla również, ważne dla obszarów zurbanizowanych, własności tzw. warstwy granicznej atmosfery warunkujące transport różnych substancji, w tym CO₂ z różnych źródeł jego pochodzenia. Jest to ważny rozdział ukazujący naturalne i

antropogeniczne uwarunkowania wielkości i roli strumieni CO₂ na styku atmosfery i biosfery.

3. Kolejny rozdział stanowi wprowadzenie do badań środowisk Ziemi wykorzystujących stabilne izotopy węgla. Zjawiskiem fizycznym, które umożliwia ten rodzaj badań jest frakcjonowanie izotopów prowadzące do ich zmiennej zawartości w różnych rodzajach materii ziemskiej. Frakcjonowanie zachodzi podczas różnorodnych procesów chemicznych i biochemicznych wewnątrz danego rezerwuaru węgla, jak i podczas wymiany węgla między rezerwuarami. Autorka opisuje w bardzo skrótowy sposób zmienność składu izotopowego węgla w przyrodzie. Z punktu widzenia tematyki pracy, byłoby cenne bardziej szczegółowe omówienie procesów prowadzących do frakcjonowania izotopowego węgla w oddziaływaniu na styku biosfery z atmosferą.
4. Ze względu na eksperymentalny charakter pracy, ważną częścią manuskryptu jest opis technik i metod pomiarowych strumienia CO₂ do atmosfery pochodzącego z gleby i wód powierzchniowych w rozdziale 4. Autorka wykorzystowała dwie metody pomiaru strumienia: metodę komorową obejmującą powierzchnię pomiaru ok. 1m² o czasowej zdolności rozdzielczej od kilku do kilkudziesięciu minut oraz metodę akumulacji wirów (*REA= Relaxed Eddy Accumulation*) umożliwiającą pomiar strumienia na obszarze rzędu kilku km² w sposób quasi-ciągły. W technice komorowej wykorzystane zostały dwa rodzaje komór pracujących w układzie zamkniętym, w stanie nieustalonym, własnej konstrukcji o różnej geometrii (komora na podstawie kwadratu i komora cylindryczna), zautomatyzowane, za pomocą których określano gęstość strumienia CO₂ na podstawie szybkości zmian stężenia CO₂ pod komorą. Komora cylindryczna umożliwiała ponadto pomiar strumienia netto. Homogeniczność strumienia dla danego punktu pomiarowego zapewniał równoczesny pomiar stężenia w systemie 3-komorowym. Komora prostopadłościenna, wyposażona w odpowiednie pływaki, została zastosowana do wyznaczenia gęstości strumienia CO₂ z wód powierzchniowych Wisły. Do pomiaru stężenia i składu izotopowego CO₂ zastosowano analizator Picarro oraz czujnik stężenia CO₂ w podczerwieni CarboCAP. Drugą z metod pomiaru strumieni była metoda REA polegająca na pomiarze masy (stężenia, energii cieplnej) transportowanej przez turbulencyjny ruch powietrza w określonym przedziale czasu. Zastosowana w pracy odmiana tej metody, tzw. metoda akumulacji wirów ze stałym ze stałym przepływem wymagała pomiarów parametrów powietrza (temperatura i prędkość wiatru) poruszającego się w dwóch zbiornikach w górę i w dół.

Autorka przedstawiła stosunkowo szczegółowe uzasadnienie fizyczne stosowanych metod, metodykę badań terenowych, trudności i ograniczenia wykonanych eksperymentów.

Pomiar składu izotopowego węgla – wyznaczenie zawartości stabilnego izotopu węgla ^{13}C w atmosferycznym CO_2 i węglu organicznym zawartym w glebie został wykonany metodą spektrometrii masowej i spektrometrii laserowej. Praca zawiera bardzo szczegółowy opis preparatyki próbek do analiz spektrometrycznych oraz szczegółowy opis pomiarów metodą spektrometrii laserowej. Szczegółowość opisu tylko tej drugiej metody wynika ze słusznego przekonania autorki, że spektrometria masowa była już wielokrotnie opisywana i jest bardziej znana i rozpowszechniona.

W podsumowaniu oceny części wstępnej pracy zawierającej wprowadzenie do części eksperymentalnej i opis metodyki badań pragnę podkreślić, iż została ona opisana jasno i wyczerpująco.

Metodyka badań terenowych

Ważnym elementem badań, w znacznej mierze decydującym o powodzeniu założonego celu pracy, jest wybór odpowiednich stanowisk pomiarowych w terenie. Wybierając odpowiednie stanowiska autorka uwzględnia ich naturalne właściwości (topografia, mikroklimat, regionalne własności atmosfery, obszar, zaludnienie, własności wód Wisły) przydatne z punktu widzenia możliwości zastosowania odpowiedniej techniki pomiarowej i reprezentatywne dla obszaru zurbanizowanego i jego otoczenia. Stanowisk tych jest wiele. Pomiar komorowe strumienia CO_2 z gleby zostały wykonane na stanowiskach zlokalizowanych w Alei Trzech Wieszców, na Błoniach Krakowskich, w Parku Jordana i Balicach; pomiar komorowe strumienia CO_2 z wód powierzchniowych Wisły na stanowisku w Tyńcu, Nowej Hucie i Niepołomicach. Stanowisko poboru próbek do pomiarów strumienia CO_2 netto zostało zainstalowane na terenie AGH, na specjalnie zbudowanym maszcie, na wysokości ok. 40 m nad powierzchnią ziemi. Rozdział 5. jest poświęcony bardzo szczegółowemu opisowi badanych stanowisk, metodom poboru materiału do badań, instalacji urządzeń pomiarowych w terenie.

Z opisu tego wnioskować można, że autorka pracy dokonała wyboru stanowisk i sposobu poboru materiałów do badań z wielką troskliwością o pozyskanie jak najbardziej reprezentatywnych próbek, aby uzyskać jak najbardziej wiarygodne wyniki, z pełnym wykorzystaniem szerokiej wiedzy na temat naturalnych uwarunkowań i ograniczeń w terenie.

Dyskusja wyników pomiarów

Rozmaitość stosowanych metod pomiarowych, wielość stanowisk terenowych zaowocowało dużą liczbą uzyskanych wyników pomiarów. Rozdział 6. Zatytułowany „Prezentacja i dyskusja wyników badań” jest najobszerniejszym rozdziałem pracy, liczącym 47 stron tekstu (cała praca, bez wykazu literatury zawiera 124 strony). Autorka systematycznie, w sposób przejrzysty uporządkowała i opisała uzyskane wyniki. Wyniki prezentowane są zarówno w tabelach, jak i na rysunkach, z podaniem niepewności pomiarowych.

Glebowy CO₂

Analizując wyniki autorka poszukuje dla różnych terenowych stanowisk badań strumienia glebowego CO₂:

1. Zależności pomiędzy wyznaczanym strumieniem glebowego CO₂ a danymi meteorologicznymi (temperatura powietrza, temperatura gleby, ciśnienie atmosferyczne), w przypadku dobowej zmienności strumienia oraz korelacji pomiędzy jego wielkością a natężeniem promieniowania aktywnego fotosyntetycznie.
2. Zależności pomiędzy synoptyczną (w skali miesiąca czasu) zmiennością glebowego CO₂ a temperaturą powietrza i gleby oraz wilgotnością gleby, ciśnieniem, natężeniem promieniowania aktywnego fotosyntetycznie, składem izotopowym strumienia CO₂.
3. Zmienności sezonowej strumienia jak wyżej od temperatury powietrza, miesięcznej sumy opadu w okresie czterech lat obserwacji (lata 2009-2013 oraz sezonowości w zmienności składu izotopowego węgla strumienia w tym okresie. Dopasowując do wyników pomiarów strumienia funkcję w postaci sumy fourierowskiej pierwszego rzędu autorka obserwuje wyraźną cykliczność zmian strumienia respiracyjnego CO₂ z gleby dla danych pochodzących ze wszystkich stanowisk, przy czym maksymalne wartości strumienia obserwowane są w miesiącach letnich (czerwiec/lipiec), a najmniejsze zimą. Ta obserwacja potwierdza sezonową zmienność aktywności respiracyjnej biosfery, która zależy od temperatury.
4. Zależności pomiędzy składem izotopowym glebowego CO₂ ($\delta^{13}\text{C}$) a wielkością strumienia respiracyjnego CO₂. Autorka nie stwierdza istotnej statystycznie zależności między tymi wielkościami. Stwierdza natomiast istotne różnice pomiędzy wartością $\delta^{13}\text{C}$ w CO₂ pochodzącym z respiracji korzeni roślinnych i z rozkładu materii organicznej.
5. Dobowej zdolności rozdzielczej zmian glebowego strumienia CO₂. W tym celu do wyników eksperymentu z miesięczną zdolnością rozdzielczą stosuje iteracyjny model matematyczny. Dopasowując do danych otrzymanych z modelu funkcję sumy

fourierowskiej otrzymuje bardzo podobny obraz cyklicznych zmian strumieni dla poszczególnych stanowisk.

Wyniki badań nad strumieniem glebowego CO₂ stanowią cenny zbiór danych dokumentujących udział glebowego CO₂ w całkowitej emisji CO₂ do atmosfery z obszaru miejskiego Krakowa w latach 2009-2013. Jest to najważniejszy walor tych badań.

Strumień CO₂ z wód powierzchniowych Wisły

W przypadku badań zmienności krótkookresowej (dobowej) oraz sezonowej (miesięcznej) strumienia CO₂ z wód powierzchniowych Wisły, obraz tych zmian nie jest zbyt klarowny. Uwarunkowania emisji CO₂ czynnikami hydrogeologicznymi (prędkości przepływów, turbulencje, spiętrzenia) powodują bardzo różne przebiegi zmienności strumienia dla poszczególnych stanowisk pomiarowych. Nie zaobserwowano również istotnych sezonowych zmian i różnic w wartościach $\delta^{13}\text{C}$ dla poszczególnych stanowisk oraz w oszacowanych wartościach prędkości transferu CO₂ z wody do atmosfery. Wielkość strumienia CO₂ z Wisły jest porównywalna z wielkością strumieni glebowych.

Powyższe wyniki badań posiadają również ważną wartość dokumentacyjną.

Pomiar strumienia netto CO₂ z obszaru Krakowa

Sz szczególnie cenną wartość pracy stanowią wyniki badań strumienia netto CO₂ z miejskiego obszaru Krakowa. Strumień netto w rozkładzie przestrzenno-czasowym został wyznaczony z półgodzinną zdolnością rozdzielczą w okresie czasu od lipca 2012 roku do końca roku 2014 metodą akumulacji wirów. Zaobserwowano zmienność kierunkową strumienia (zależność od kierunku wiatru) i związaną z tym charakterystyczny sezonowy rozkład strumienia przestrzenny uwarunkowany różną wiatrów w różnych porach roku. Wartości strumienia wykazują również istotne różnice w trzech różnych sektorach zagospodarowani obszaru miejskiego Krakowa: w sektorze zabudowań, ruchu drogowego i zieleni. Autorka stara się powiązać obserwowaną zmienność z asymilacją biosfery, procesami respiracji i rozkładu materii organicznej w glebie stwierdzając zgodność obserwacji metodami akumulacji wirów i komorową. Dokumentuje również krótko okresowe, dobowe zmiany strumienia. Wszystkie wyniki poddaje obróbce statystycznej w celu określenia istotności podobieństwa i różnic uzyskanych wielkości mierzonych.

Stosowany w pomiarach analizator Picarro umożliwił naprzemienne pomiary strumienia CO₂ metodą REA oraz stężenia i zawartości stabilnego izotopu węgla ¹³C w atmosferycznym CO₂. Najwyższą wartość współczynnika korelacji pomiędzy wartością strumienia a stężeniem CO₂ otrzymano dla wartości średnich miesięcznych.

Bilans węgla dla aglomeracji miejskiej Krakowa

Wykorzystując pomiary strumieni CO₂ z różnych źródeł autorka wykonała obliczenia mające na celu ocenę bilansu masy węgla dla Krakowa. Wcześniej dokonywane oceny dla tej aglomeracji miejskiej, opublikowane w wielu artykułach naukowych (pomiary emisji CO₂ do atmosfery są wykonywane systematycznie w Krakowie, w zespole badawczym Fizyki Środowiska od roku 1983), nie dysponowały dokładnymi wynikami pomiarowymi strumienia biogenicznego CO₂ do atmosfery. Całkowita, oszacowana przez autorkę pracy ilość CO₂ emitowana w ciągu jednego roku do atmosfery wynosi około 8,2 megaton, co oznacza emisję 6,8 kg węgla na metr kwadratowy powierzchni ziemi.

Za swoje najważniejsze dokonania w pracy doktorskiej autorka uważa:

1. Stwierdzenie istotnego udziału strumienia glebowego CO₂ w całkowitej ilości CO₂ emitowanego do atmosfery, z wyraźną zmiennością sezonową. W atmosferze Krakowa udział CO₂ pochodzącego z całej biosfery wynosi około 10%, pozostałe 90% stanowią przemysłowe emisje antropogeniczne.
2. Obserwację, że wielkość strumienia CO₂ z wód Wisły jest porównywalna z wielkością strumienia glebowego.
3. Obserwację sezonowości zmian poszczególnych rodzajów emisji. Najmniejsza wartość emisji przypada w okresie maksimum aktywności asymilacyjnej biosfery, tj. w porze letniej. Zmienność dobową jest uwarunkowana natężeniem ruchu drogowego oraz w okresie letnim – intensywnością fotosyntezy.
4. Oszacowanie udziału poszczególnych rodzajów emisji w skali lokalnej, w całkowitej emisji miejskiej. Dla obszaru źródłowego stacji pomiarowej REA-AGH, w bilansie rocznym, strumień biogenicznego CO₂ stanowi 23%, z ruchu drogowego 6%, z zabudowań 52%, z oddechu ludzkiego 19% (pod nieobecność źródeł przemysłowych).

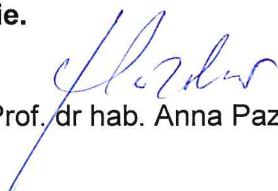
W posumowaniu pracy autorka podjęła próbę określenia strategii dalszych badań, mając świadomość ograniczeń które napotkała realizując swoją pracę doktorską.

Praca jest bardzo obszerna zarówno pod względem różnorodności badań, jak i redakcji tekstu. Główne rozdziały wraz z podsumowaniem zawierają 115 stron tekstu, aneks dodatkowo 9

stron. Zważywszy, że została napisana czcionką Times New Roman 12 pkt., z pojedynczym odstępem (aneks nawet czcionką 11 pkt.) a wykaz literatury obejmuje 169 pozycji od bardzo starych (wykład noblowski Soddy'ego z 1922 roku) po najnowsze z roku 2015, można śmiało powiedzieć, że praca jest bardzo obszerna nie tylko w części merytorycznej, ale również redakcyjnej. Napisana jest jednak poprawnym językiem, chociaż zdarzają się określenia żargonowe. Bardzo przejrzysty jest układ treści, co w połączeniu z ciekawą i bardzo aktualną tematyką badań powoduje, że jest łatwo czytelna.

W podsumowaniu recenzji stwierdzam, że autorka pracy wykonała dużą i rzetelną pracę eksperymentalną. Zgromadziła obszerny materiał dokumentacyjny. Praca ma charakter interdyscyplinarny, na styku nauk o naturalnym i przekształconym przez człowieka środowisku Ziemi, fizyki i chemii, obejmuje zastosowanie metod fizycznych i chemicznych w badaniach gleby, wody i powietrza. Stanowi to niewątpliwie jej cenny walor.

Uważam, iż mgr inż. Alina Jasek-Kamińska w pełni zrealizowała założony cel swojej pracy, a praca spełnia wszelkie wymagania stawiane pracom doktorskim. Za ogromny wkład pracy i rzetelność badań wnoszę o jej wyróżnienie.


Prof. dr hab. Anna Pazdur