

TADEUSZ FLORKOWSKIAkademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
Wydział Fizyki i Techniki Jądrowej

STRUKTURA GAZOWA ATMOSFERY A PRODUKCJA ENERGII

PRODUKCJA ENERGII

Produkcja energii jest miarą wzrostu cywilizacji, a od kosztu produkcji energii zależy wprowadzanie nowych technologii wytwarzania różnych produktów. Produkcja energii w skali światowej rośnie wykładniczo od kilku gigadżuli na głowę na rok dla człowieka prymitywnego do około 350 gigadżuli na głowę na rok dla człowieka współczesnego. Przy gwałtownym wzroście populacji daje to ogromny przyrost produkcji i zużycia energii, szczególnie w okresie ery przemysłowej, to jest w ciągu ostatnich 150 lat. Energia elektryczna jest obecnie najkorzystniejszą formą energii, najłatwiejszą do transportu i przetwarzania. Zużycie jej na głowę ludności jest ważnym parametrem stopnia rozwoju i wynosi obecnie od kilkuset kWh w Afryce do 15000 kWh w Kanadzie i USA.

Produkcja energii odbywa się obecnie głównie przez spalanie paliw kopalnych (tab. 1).

Tabela 1

Procentowy udział poszczególnych źródeł w globalnej produkcji energii
w roku 1987

Rodzaj źródła	Udział %
Olej	37,6
Węgiel	30,5
Gaz	19,9
Woda	6,7
Reakcja jądrowa	5,2

SKŁAD ATMOSFERY I GAZY ŚLADOWE

Azot i tlen stanowią około 99,97% składu atmosfery, gdy dodamy argon (stężenie około 1%) i CO₂ (stężenie około 300 ppm) otrzymamy 99,997% całej

atmosfery. Reszta to gazy śladowe, z których niektóre stanowią wraz z CO₂ gazy cieplarniane.

Z wydobywaniem i spalaniem paliw kopalnych związane są degradacja środowiska i produkcja odpadów. W skali globalnej spalanie paliw kopalnych ma największy wpływ na atmosferę; gazy powstałe przy spalaniu zwiększają swoje stężenie w atmosferze i powodują przez efekt cieplarniany wzrost średniej globalnej temperatury. Mają one także dalekosiężne konsekwencje dla równowagi ekosystemów w skali globalnej.

Tabela 2 ilustruje wzrost stężenia gazów „cieplarnianych” w atmosferze.

Tabela 2

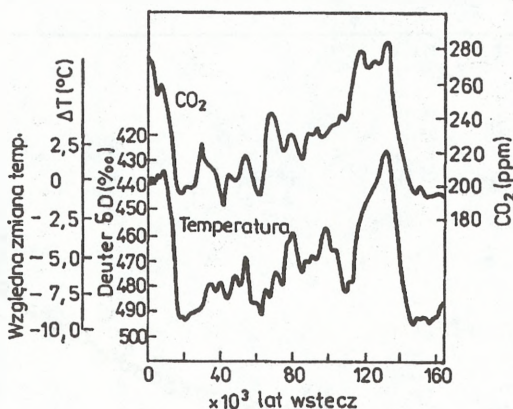
Gazy cieplarniane w atmosferze

Gaz	CO ₂	CH ₄	CFC-11	CFC-12	N ₂ O
	ppmv	ppmv	pptv	pptv	ppbv
Era przedprzemysłowa	280	0,8	0	0	288
Obecnie (1990)	353	1,72	280	484	310
Roczny przyrost %	1,8	0,015	9,5	17	0,8
Średni czas życia w atmosferze (lat)	50-200	10	65	130	150
Udział w efekcie cieplarnianym %	50	20	5	10	4

Istnieje doskonała korelacja pomiędzy stężeniem dwutlenku węgla w powietrzu i średnią temperaturą powietrza. W przeszłości wyższa temperatura powodowała wzrost biomasy i tym samym wzrost stężenia dwutlenku węgla. Obecnie wzrost temperatury jest wywołany wzrostem stężenia dwutlenku węgla (i innych gazów) w atmosferze, aczkolwiek nie wszyscy badacze podzielają ten pogląd.

Na rysunku 1 pokazano korelację pomiędzy średnią temperaturą powietrza i stężeniem dwutlenku węgla w okresie ostatnich 160 tys. lat. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu oraz temperaturę w przeszłości uzyskano analizując bąbelczki powietrza zawarte w lodowcach. Temperaturę odzwierciedla stosunek izotopowy D/H lub 18O/16O w danej warstwie lodu. Wykorzystuje się fakt, że skład izotopowy tlenu i wodoru w opadach atmosferycznych jest zależny od temperatury powietrza. Na rysunku 2 pokazano też wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu w ostatnim dwustuleciu.

Określanie ilościowe możliwych efektów emisji antropogenicznej wymaga dobrego zrozumienia głównych procesów kontrolujących skład atmosfery i mechanizmów sprzężeń zwrotnych, które mają wpływ na zachowanie się systemu (biosfera, hydrosfera, litosfera). Źródła i straty gazów śladowych, jak też ich oddziaływanie z ekosystemem muszą być zidentyfikowane i określone ilościowo. Badanie stężeń oraz przestrzennych i czasowych zmian składu izotopowego gazów śladowych dostarcza informacji dotyczących genezy tych gazów, ich cykli obiegu w systemie oraz procesów transportu i mieszania się atmosfery w skali lokalnej,



Rys. 1. Korelacja pomiędzy średnią temperaturą powietrza i stężeniem dwutlenku węgla w okresie ostatnich 160 tys. lat (Chappellaz i in. 1990).

regionalnej i globalnej. W istniejących międzynarodowych programach naukowych bada się poszczególne składniki atmosfery: dwutlenek węgla, metan, tlenek węgla, tlenki azotu, siarki, freony, ozon i inne. Pozwala to na konstruowanie modeli oraz prognozowanie wzrostu temperatury, zmian klimatycznych i inne wnioski.

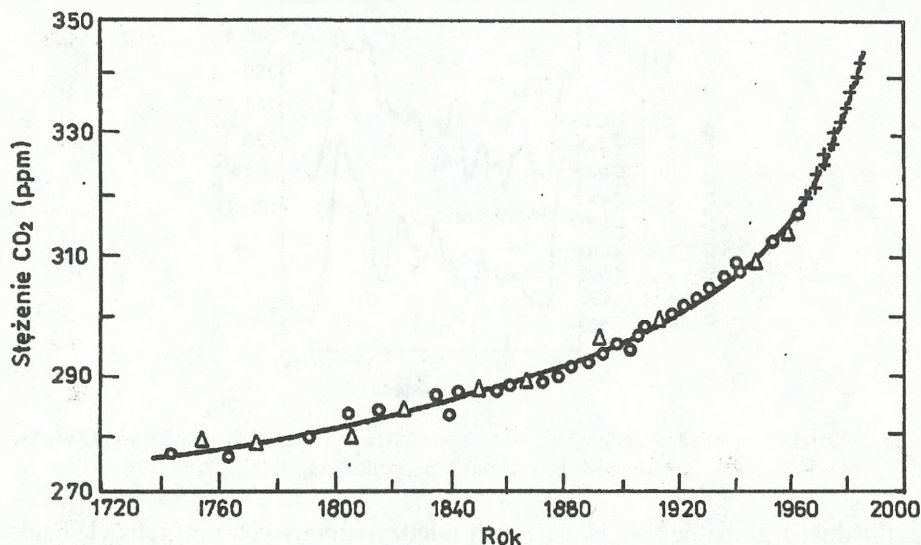
BADANIA SKŁADU IZOTOPOWEGO GAZÓW ŚLADOWYCH

Frakcjonowanie izotopowe takich pierwiastków, jak tlen, wodór, węgiel, siarka, azot w czasie przemian fizykochemicznych lub biochemicznych jest funkcją temperatury, co pozwala przez pomiar składu izotopowego tych pierwiastków określić ich pochodzenie oraz temperaturę, jaka była w czasie tworzenia się odpowiednich związków chemicznych. Mierzony skład izotopowy podaje się jako względną różnicę mierzonej próbki i odpowiedniego międzynarodowego standardu (wartość delta w promilach). Na rysunku 3 pokazano dla przykładu korelację pomiędzy czasowym przebiegiem zmian składu izotopowego opadów i odchyleniami od średniej temperatury powietrza.

Pomiar zawartości radiowęglu w związkach zawierających węgiel pozwala ponadto określać tak zwany wiek radiowęglowy od „współczesnego” do około 50 tys. lat. Rysunek 4 pokazuje dla przykładu skład izotopowy węgla w różnych zbiornikach węgla.

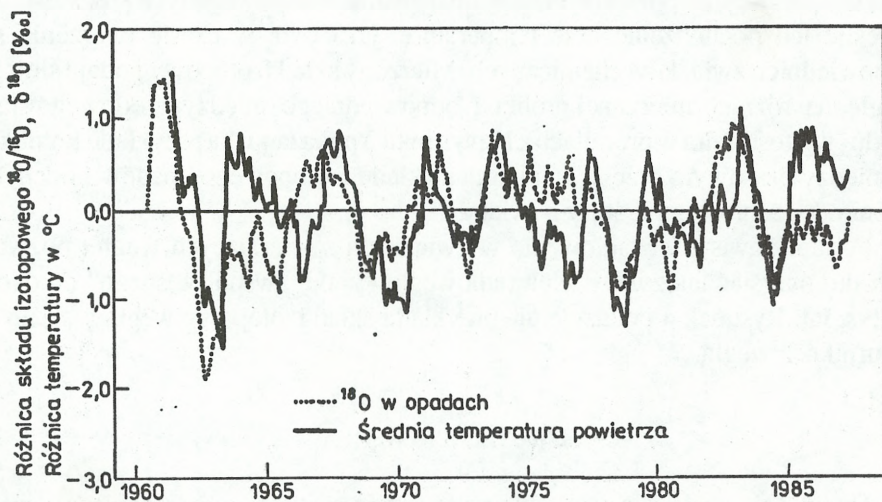
DWUTLENEK WĘGLA

Dwutlenek węgla jest najważniejszym gazem cieplarnianym z powodu dużego stężenia w atmosferze i stałego wzrostu. Najdłuższy zapis stężenia atmosferycznego dwutlenku węgla w obserwatorium Mauna Loa (Hawaje) pokazuje rysunek 5. Wzrost (1,5 ppm rocznie) jest związany nie tylko ze spalaniem paliw kopalnych, ale także

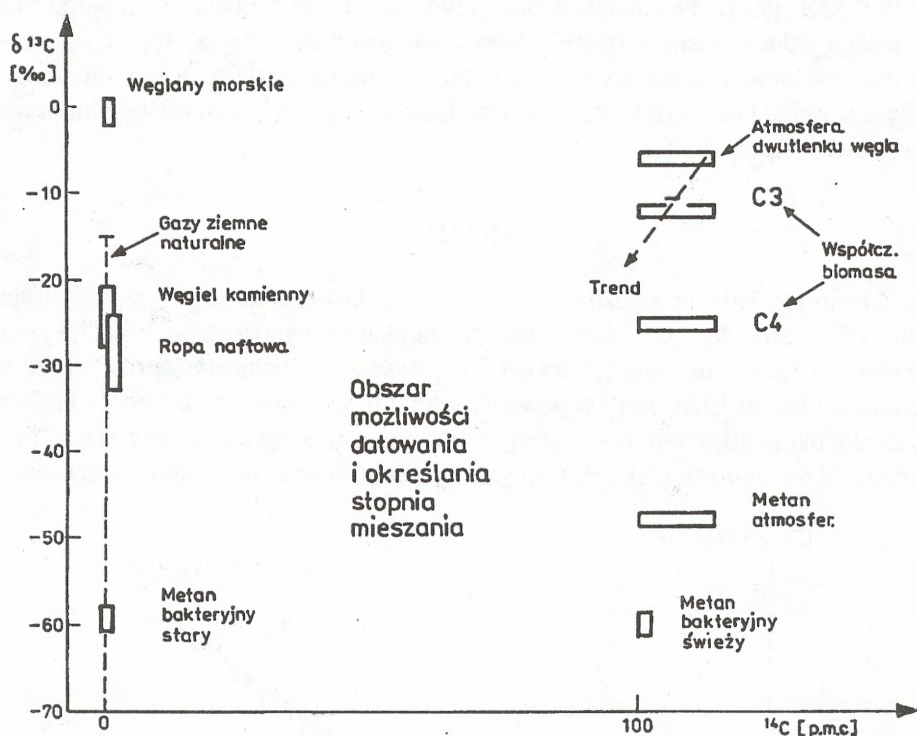


Rys. 2. Wzrost stężenia dwutlenku węgla w powietrzu w ostatnim dwustuleciu (Friedli i in. 1986). Δ — rdzenie lodowe (spektroskopia laserowa), $\circ$ — rdzenie lodowe (chromatografia gazowa), + — dane po roku 1985 z Mauna Loa na Hawajach.

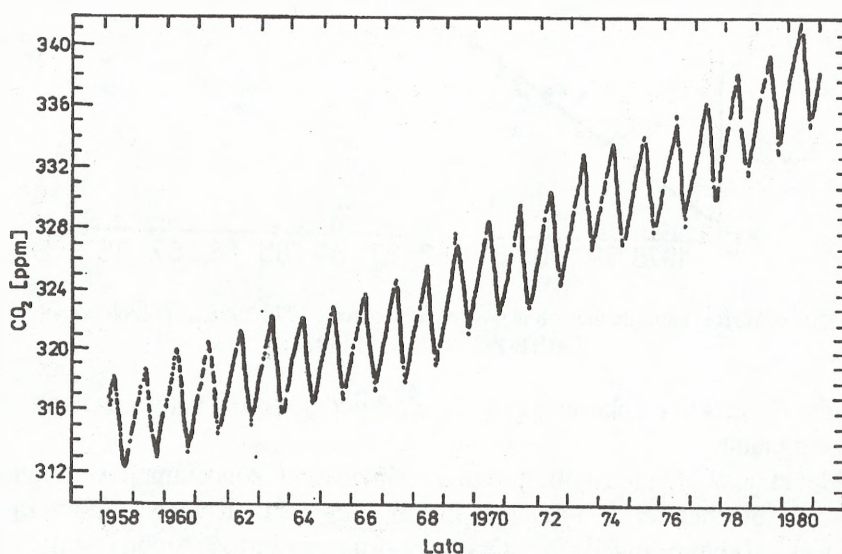
z wycinaniem dżungli tropikalnych, co uwalnia duże ilości dwutlenku węgla z gleby. Oceny udziału tego dwutlenku węgla do dwutlenku węgla ze spalania paliw wahają się od kilku do 25%. Za około 2% wzrost stężenia odpowiedzialna jest produkcja cementu. Około 91% dwutlenku węgla jest produkowane w obszarze



Rys. 3. Korelacja pomiędzy czasowym przebiegiem zmian składu izotopowego opadów atmosferycznych i odchyleniami od średniej temperatury powietrza (Różański i in. 1990).



Rys. 4. Skład izotopowy węgla w różnych zbiornikach węgla.

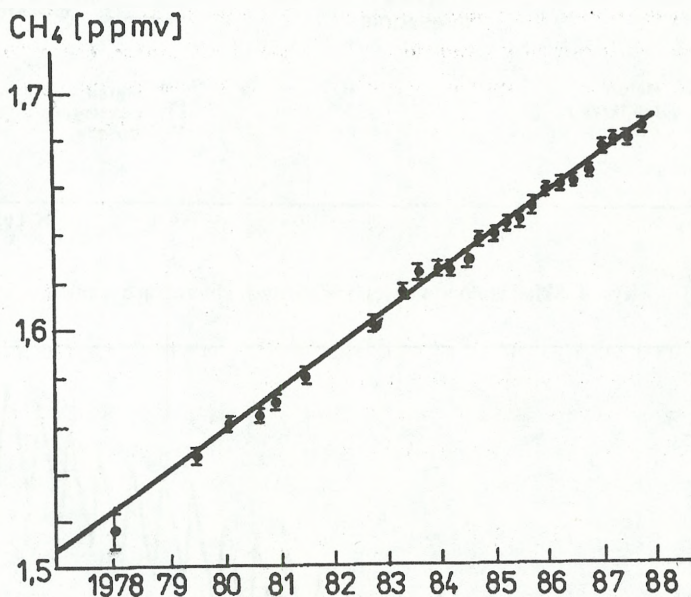


Rys. 5. Stężenie dwutlenku węgla w powietrzu (Obserwatorium w Mauna Loa, Hawaje) (Keeling 1986).

30°–60° szer. geogr. N. Stosunek izotopowy $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ oraz zawartość izotopu ^{14}C pozwalają jednoznacznie określić pochodzenie dwutlenku węgla, stopień mieszanina oraz cyrkulacji pomiędzy różnymi zbiornikami (atmosfera, ocean, biosfera). Paliwa kopalne jako bardzo stare nie posiadają izotopu ^{14}C , podczas gdy biomasa zawiera współczesny ^{14}C .

METAN

Metan jest jednym z gazów śladowych w atmosferze, którego stężenie rośnie około 1% rocznie. Jego udział w efekcie cieplarnianym wynosi około 20% (1,5 ppm metanu zwiększa temperaturę ziemi o 1,3°C). Rysunek 6 pokazuje wzrost stężenia metanu w okresie 1978–1988 w powietrzu półkuli północnej (półkula południowa wykazuje około 10% mniejsze stężenie). Wraz ze wzrostem temperatury i rozmrażaniem się bagiennych gleb arktycznych wydziela się metan (dodatknie sprężenie



Rys. 6. Wzrost stężenia metanu w powietrzu w okresie 1978–1988 na półkuli północnej (Blake, Rowland 1988).

zwrotne dla efektu cieplarnianego). Tabela 3 podaje źródła naturalne i antropogeniczne metanu.

Metan jest organicznym gazem o największej koncentracji w powietrzu. Reakcje fotochemiczne utleniają metan, odgrywa on więc zasadniczą rolę w procesach chemicznych atmosfery i wpływa na zawartość ozonu i tlenku węgla. Pomiary składu izotopowego węgla i wodoru w metanie pozwalają na określenie pochodzenia metanu. Tabela 4 pokazuje przykładowo wartości $\Delta^{13}\text{C}$, Δ deuteru

Tabela 3

Źródła metanu w atmosferze

Rodzaj	Emisja w mln ton/rok
Naturalne:	
Bagna	20–170
Termity	5–30
Oceany	7–13
Fermentacja zwierząt	2–6
Jeziora	2–6
Tundra	1–5
Inne	do 80
Antropogeniczne:	
Spalanie biosfery	30–100
Pola ryżowe	60–140
Inne pola uprawne	30–70
Gazy naturalne	30–70

i zawartość radiowęglu w procentach węgla współczesnego (pmc) dla metanu różnego pochodzenia.

TLENEK WĘGLA

Aczkolwiek tlenek węgla nie jest sam gazem cieplarnianym, ale jego wzrastająca koncentracja ma wpływ na procesy chemiczne w atmosferze (np. koncentracja metanu rośnie ze wzrostem koncentracji tlenu węgla).

Średnie stężenie w atmosferze wynosi około 50 ppb i podlega silnej modulacji sezonowej z tendencją do wzrostu o około 1% na rok. Na półkuli północnej jest go niemal dwa razy więcej niż na południowej. Całkowita produkcja tlenu węgla wynosi około 2400 Tg i jest podzielona między źródła antropogeniczne i dekom-

Tabela 4

Skład izotopowy metanu różnego pochodzenia

	$\Delta^{13}\text{C}$	^{14}C	ΔD
Atmosferyczny	-47	100 pmc	-80
Pierwotny	?	0	?
Termogeniczny	-50	0	-280
Bakteryjny – stary	-60	0	-150
świeży	-60	100 pmc	-150

pozycję węglowodorów. Wpływ produkcji energii występuje w dwóch postaciach: bezpośrednia emisja i emisja metanu.

Głównymi źródłami tlenku węgla są:

- spalanie biomasy,
- utlenianie węglowodorów,
- silniki spalinowe, transport,
- emisja z oceanu,
- produkcja energii,

zaś głównymi studniami:

- utlenianie OH,
- pochłanianie przez glebę,
- ucieczka do stratosfery.

W badaniach procesów powstawania i reakcji tlenku węgla odgrywa rolę pomiar stosunków izotopowych węgla i tlenu, jak też pomiar zawartości promieniotwórczego izotopu ^{14}C .

DWUTLENEK SIARKI

Antropogeniczna produkcja dwutlenku siarki wzrosła od około 3 Tg/rok w roku 1860, przez 40 Tg/rok w 1940 r. do 80 Tg/rok w 1980 r. Dla porównania wulkany produkują około 10 Tg/rok, a spalanie biomasy około 7 Tg/rok.

Tak więc głównym źródłem dwutlenku siarki jest spalanie paliw kopalnych w procesie produkcji energii. Efektem są szkody w środowisku, spowodowane przez tak zwane kwaśne deszcze zwiększające erozję czy eutrofizację jezior.

TLENKI AZOTU

Tlenki azotu (NO , N_2O , NO_2) pełnią istotną rolę w chemizmie troposfery. Produkcja energii dostarcza około 6,5 Tg nadtlenu azotu rocznie, co powoduje wzrost koncentracji ozonu w troposferze.

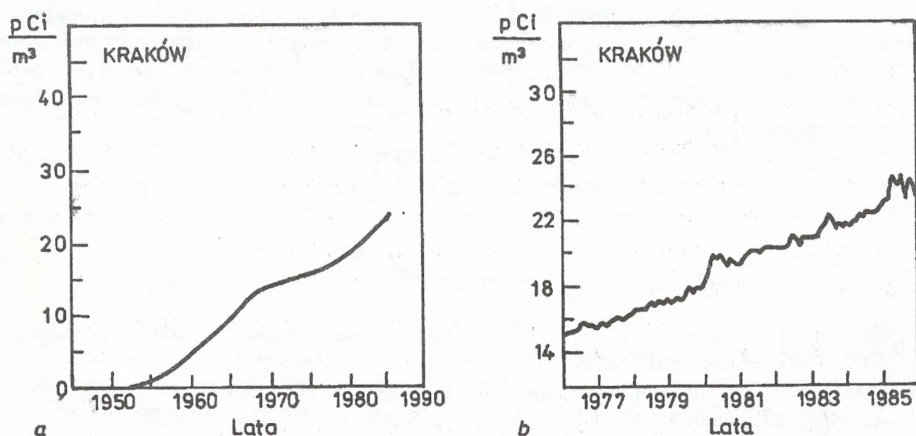
Stężenie N_2O w erze przedprzemysłowej było w pobliżu 285 ppbv, jak wykazują pomiary w rdzeniach lodowych. Obecnie jego średnia koncentracja w powietrzu wynosi około 310 ppbv i wzrasta ok. 0,3% na rok.

PRODUKCJA ENERGII W PRZYSZŁOŚCI I JEJ WPŁYW NA SKŁAD ATMOSFERY

Powolne wyczerpywanie się paliw kopalnych i postęp technologiczny warunkują przyszłe technologie wytwarzania energii. Tak zwane alternatywne sposoby produkcji energii (energia słoneczna, wiatrowa, przyływy morza itp.) nie mogą zapewnić odpowiednio wysokiej produkcji. Udział „przyjaznej” dla środowiska energii z hydroelektrowni lub energii geotermicznej może zapewnić tylko mały ułamek zapotrzebowania. Wzrost produkcji energii w reaktorach jądrowych, a w

przyszłości reaktorach termojądrowych, stwarza nowe aspekty problemu oddziaływania na środowisko. Jądrowe metody wytwarzania energii nie powodują wzrostu stężenia gazów cieplarnianych i pyłów. Jednakże nieuchronny wzrost stężenia gazów promieniotwórczych w atmosferze (^{85}Kr , ^3H), wzrost stężenia trytu w wodach powierzchniowych oraz problem odpadów promieniotwórczych stanowią wyzwanie dla nowych technologii produkcji energii oraz dla zapobiegania skutkom radiologicznym dla ludności i promieniotwórczej kontaminacji środowiska.

Wpływ przemysłu jądrowego na atmosferę w skali globalnej uzewnętrznia się obecnie wzrostem koncentracji promieniotwórczego Kryptonu-85. Rysunek 7 pokazuje przykładowo przebieg wzrostu koncentracji ^{85}Kr w Krakowie.



Rys. 7. Wzrost koncentracji ^{85}Kr w atmosferze Krakowa (Weiss i in. 1986). a — model, b — pomiary

W najbliższej przyszłości zmniejszenie emisji CO_2 może nastąpić przez zastąpienie spalania węgla kamiennych i brunatnych spalaniem gazu ziemnego. Tabela 5 pokazuje jednostkową emisję CO_2 przy spalaniu w elektrowni różnych rodzajów paliw kopalnych.

Tabela 5

Jednostkowa emisja CO_2

Paliwo	kg CO_2 na kWh energii elektrycznej
Węgiel brunatny	1,18
Węgiel kamienny	0,97
Ropa naftowa	0,85
Gaz ziemny	0,53

TRACE GASES IN THE ATMOSPHERE AND THE PRODUCTION OF ENERGY

Summary

Production of energy is an indicator of the rate of developing civilization. Introduction of new technologies in manufacturing of various products depends on the cost of energy production. Energy production in global scale increases exponentially from several joules per head and per year for primitive man to about 350 gigajoules per head and year for modern man. Together with the dramatic population increase it results in great energy production and use, mainly in the industrial era, i.e. during the last 150 years. Production of energy is, at present, by 88 % connected with burning fossil fuels, which leads to the degradation of the environment and production of waste. In the global scale most sensitive is the atmosphere, as gases produced during combustion of fuels result the greenhouse effect, i.e. increase of the mean global temperature. Investigation of concentrations and isotope composition of trace gases in the atmosphere allows for determination of the gas emission and feedback mechanism influencing the behaviour of the ecosystems (biosphere, hydrosphere, lithosphere).

The significance and processes connected with the carbon dioxide, carbon monoxide, methane and other trace gases are discussed in the paper.

LITERATURA

- Blake D. R., Rowland F. S., 1988. *Continuing worldwide increase in tropospheric methane*. 1978–1987, *Science*, 239, 1129–1131.
- Chappellaz J., Baruda J. M., Raynaud D., Kortkevich Y. S., Lorius C., 1990. *Ice-core record of atmospheric methane over the past 160 000 y*. *Nature*, 345, 127–131.
- Friedli H., Löttscher H., Öschger H., Siegenthaler U., Stauffer B., 1986. *Ice core record of $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ratio of atmospheric CO_2 in the past two centuries*. *Nature*, 324, 237–238.
- Keeling C. D., 1986. *Atmospheric CO_2 concentrations — Mauna Loa Observatory, Hawaii, 1958–1986*, NDP-001/R1, Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tenn., USA.
- Róžański K., Gonfiantini, R., 1990. *Isotopes in climatological studies*. IAEA Bull., No. 4, 9–15.
- Weiss W., Stockburger H., Sartorius H., Róžański K., Heras C., Oestlund H.G., 1986. *Mesoscale transport of ^{81}Kr originating from European sources*. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res.*, B17, 571–574.