GEOLOGIA • 2006 • Tom 32 • Zeszyt 2 • 117–139

GŁĘBOKOŚĆ POBORU PRÓBKI GAZU PODGLEBOWEGO W POWIERZCHNIOWYCH BADANIACH GEOCHEMICZNYCH – PRÓBA OPTYMALIZACJI

Sampling of soil gas in surface geochemical surveys – an attempt of depth optimization

Henryk SECHMAN

Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Zakład Surowców Energetycznych; al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; e-mail: sechman@uci.agh.edu.pl

Treść: W pracy przedstawiono wyniki badań nad optymalizacją głębokości poboru próbek gazu podglebowego przy powierzchniowych badaniach geochemicznych. Badania wykonano w dwóch obszarach: w niecce wałbrzyskiej i w rejonie Karlina na Pomorzu Zachodnim. Badania wykonane w niecce wałbrzyskiej nad zlikwidowanymi kopalniami węgla kamiennego wykazały, że najbardziej dogodny dla opróbowań geochemicznych jest interwał głębokościowy 1.0–1.8 m, który położony poniżej strefy aktywnej wymiany sięgającej do głębokości ok. 1 m charakteryzuje się wyrazistym sygnałem geochemicznym pochodzenia wgłębnego. Badania w rejonie Karlina na Pomorzu Zachodnim, wykonane nad akumulacjami naftowymi, polegały na ocenie uzyskanych wielkości stężeń węglowodorów gazowych szeregu metanowego na głębokościach 1.2 m i 1.8 m. Wykazały one, że głębokość 1.2 m jest optymalna dla powierzchniowych opróbowań geochemicznych, realizowanych metodą gazu wolnego w tym obszarze. Analogiczną głębokość opróbowania gazowego można przyjąć dla obszaru niecki wałbrzyskiej. W celu potwierdzenia uzyskanych wyników podobne badania powinny zostać przeprowadzone w innych perspektywicznych złożowo obszarach Polski.

Słowa kluczowe: powierzchniowe badania geochemiczne, głębokość opróbowania, gaz podglebowy, lekkie alkany, strefa aktywnej wymiany

Abstract: The paper presents the results of optimization of sampling depth for soil gas applied in the surface geochemical survey. The studies were carried out in two areas: the Wałbrzych Trough and the Karlino area (Western Pomerania). The studies in the Wałbrzych Trough was carried out over the closed and remediated coal mines. The results demonstrated that sampling depth interval 1.0–1.8 meters is an optimum for surface geochemical survey as it is located beneath the active exchange zone (i.e. beneath 1.0 meter) but provides distinct geochemical response from deep sources. The studies in the Karlino area (Western Pomerania) was carried out over oil and gas pools. It was found that 1.2 meter depth is an optimum for geochemical sampling with the "free" gas method in this area. The same sampling depth can be apply on in the Wałbrzych Trough. Such studies must be passed in other perspective areas of Poland to confirm this depth of sampling.

Key words: surface geochemical survey, sampling depth, soil gas, light alkanes, active exchange zone

WSTĘP

Powierzchniowe gazowe metody geochemiczne, w aspekcie prospekcji naftowej, polegają na rejestracji i analizie w warstwach przypowierzchniowych lekkich węglowodorów nasyconych – od metanu do butanów lub pentanów. Ich obecność jest wynikiem ciągłej emanacji z wgłębnych źródeł (np. złóż węglowodorów) (Karcew *et al*. 1954, Sokołow & Grigoriew 1962, Dzieniewicz & Rusta 1979, Tedesco 1995, Sechman 2003).

Ocena relacji pomiędzy powierzchniowym obrazem geochemicznym a wgłębnym modelem geologiczno-złożowym w oparciu o zarejestrowane, często śladowe ilości składników węglowodorowych w powietrzu podglebowym wymaga bardzo ostrożnego i krytycznego podejścia do uzyskiwanych wyników. Rejestrowany bowiem na powierzchni obraz anomalii gazowej, w idealnym przypadku, powinien być projekcją niżej leżącego źródła. W rzeczywistości jednak sygnał geochemiczny może być zakłócany, nie tylko przez zmieniające się parametry wgłębne całego nadkładu, lecz również przez szereg czynników przypowierzchniowych (Karcew *et al*. 1954, Sokołow & Grigoriew 1962, Klusman 1993, Tedesco 1995, Jones & Burtel 1996, Sechman 2003).

Poprawnie przeprowadzone terenowe opróbowanie geochemiczne ma zagwarantować uzyskanie odpowiedniej ilości reprezentatywnych próbek gazu podglebowego. Jednocześnie, odpowiednia metodyka opróbowania powinna wyeliminować niepożądane, niejednokrotnie trudno przewidywalne, efekty wpływu przypowierzchniowych czynników zaburzających, w tym strefy aktywnej wymiany (Sokołow & Grigoriew 1962, Dzieniewicz *et al*. 1979a).

Sposób opróbowania gazowego, stosowany od 1992 r. przez Pracownię Geochemii Powierzchniowej Zakładu Surowców Energetycznych Akademii Górniczo-Hutniczej (PGP ZSE AGH), został wypracowany w oparciu o badania prowadzone od 1972 roku kolejno przez zespoły: Międzyresortowego Instytutu Geofizyki Stosowanej i Geologii Naftowej AGH, Instytutu Surowców Energetycznych AGH oraz Zakładu Surowców Energetycznych AGH (Dzieniewicz *et al*. 1978, 1979a, b, 1996, Górecki *et al*. 1995b, Dzieniewicz & Sechman 2001, 2002). Polega on na zassaniu mieszaniny gazowej wypełniającej wolne przestrzenie porowe w utworach przypowierzchniowych, dzięki czemu możliwy jest pobór próbki „nieskażonej" bezpośrednio przez atmosferę. W tym świetle, eliminacja wpływów dodatkowych czynników zakłócających może być dokonana przede wszystkim przez dobór odpowiedniej głębokości opróbowania. Należy jednocześnie pamiętać, że zbyt głęboka penetracja geochemiczna jest nieuzasadniona, ponieważ powierzchniowe metody geochemiczne powinny być zarówno szybkie, jak i tanie w realizacji. Rezultaty powierzchniowych badań geochemicznych, interpretowane łącznie z wynikami standardowych badań geofizycznych i otworowych, mogą podnieść efektywność poszukiwań naftowych. W związku z tym optymalny jest wybór takiego głębokościowego wariantu opróbowania, który przy najmniejszych nakładach daje czytelne i wiarygodne efekty.

Wzorując się na badaniach przeprowadzonych przez zespół pod kierunkiem J. Kuśmierka (Dzieniewicz *et al*. 1979a), przyjęto głębokość opróbowania wynoszącą 1.2 m. Jednak z uwagi na stosowaną obecnie przez PGP ZSE AGH metodykę opróbowań geochemicznych (Dzieniewicz & Sechman 2001, 2002), która diametralnie różni się od poprzedniej (Dzieniewicz *et al.* 1978, 1979a, b), od dawna istniała potrzeba zweryfikowania przyjętej i stosowanej rutynowo od 1992 r. głębokości poboru próbki gazu wolnego wynoszącej 1.2 m.

W związku z tym przeprowadzono badania zmian stężeń węglowodorów gazowych wraz z głębokością opróbowania geochemicznego w aspekcie jej zoptymalizowania dla celów prospekcji naftowej. Badania przeprowadzono w obszarach położonych nad istniejącymi, stwierdzonymi wgłębnymi źródłami rozpraszania węglowodorów, z których lekkie składniki migrują do powierzchni. W rezultacie mogą być one zarejestrowane w strefie przypowierzchniowej w postaci wyraźnych, podwyższonych stężeń, co pozwala w sposób wiarygodny ocenić ich rozkład z głębokością (Sechman 2003).

OBSZARY BADAŃ

Badania optymalizujące głębokość opróbowania gazowego przeprowadzono w oparciu o wyniki pomiarów geochemicznych, które uzyskano w dwóch obszarach: w niecce wałbrzyskiej i w rejonie Karlina na Pomorzu Zachodnim. Obszary te różnią się pod względem budowy geologicznej, jednak w obu przypadkach występują procesy aktywnego mikroprzenikania węglowodorów od wgłębnych nagromadzeń do powierzchni. W niecce wałbrzyskiej, po zaprzestaniu eksploatacji węgla kamiennego, źródłami rozpraszania węglowodorów są nagromadzenia gazów złożowych serii węglonośnej. Gazy te są wypychane „tłokowo" z górotworu przez podnoszące się zwierciadło karbońskiego piętra wodonośnego (Kotarba 2002, Dzieniewicz *et al*. 2002, Fiszer *et al*. 2002, Korus *et al*. 2002, Sechman *et al*. 2002). Z kolei w rejonie Karlina akumulacje węglowodorów występują w antyklinalnie uformowanych utworach karbońsko-cechsztyńskich, z których poprzez system uskoków i spękań następuje mikroprzenikanie lekkich alkanów w kierunku powierzchni (Górecki *et al*. 1993, 1995a, Strzetelski *et al*. 1996).

W obu przypadkach luźne utwory strefy przypowierzchniowej, stanowiące przestrzeń pomiarów geochemicznych, są pochodzenia glacjalnego (Galon & Dylik 1967). W ich skład wchodzą żwiry, piaski, piaski zailone, gliny zapiaszczone i gliny. Należy dodać, że np. gliny morenowe na obszarze Polski zachodniej od Bałtyku po Sudety charakteryzują się podobnym uziarnieniem oraz stopniem obtoczenia ziarn, natomiast wyraźne różnice dotyczą ich składu petrograficznego (Karczewski 1963).

ZAKRES I METODYKA BADAŃ TERENOWYCH ORAZ LABORATORYJNYCH

Obszar niecki wałbrzyskiej

Celem badań przeprowadzonych w niecce wałbrzyskiej był wybór optymalnego interwału głębokościowego dla opróbowań geochemicznych. W związku z tym przebadano zmiany stężeń lekkich alkanów i tlenu w zależności od przyjętych głębokościowych interwałów opróbowania.

Oparto się na wynikach badań 769 próbek gazu wolnego, pobranych w rejonie Wałbrzycha i jego okolicach w latach 1997–1998 (Kotarba *et al*. 1999). Stanowią one część wyników powierzchniowych badań geochemicznych, realizowanych w latach 1997–2001 przez zespół Zakładu Surowców Energetycznych AGH, które miały na celu określenie możliwości wystąpienia zagrożeń gazowych w strefie przypowierzchniowej po likwidacji kopalń w Wałbrzyskim Zagłębiu Węglowym (Kotarba 2002).

Do poboru próbek gazu z warstw przypowierzchniowych zastosowano metodykę opróbowania geochemicznego opracowaną przez PGP ZSE AGH (Dzieniewicz & Sechman 2001, 2002). Próbki pobierano w różnych miejscach niecki wałbrzyskiej z głębokości od 0.5 m do 4.3 m, zasysając gaz wypełniający wolne przestrzenie w utworach przypowierzchniowych. Głębokości opróbowań uzależnione były od litologii strefy przypowierzchniowej.

W pobranych próbkach gazu, obok metanu, oznaczano również jego kolejne lekkie homologi (etan, propan, i-butan, n-butan, i-pentan, n-pentan), gazowe alkeny (etylen, propylen, 1-buten) oraz składniki niewęglowodorowe (hel, wodór, tlen, azot, dwutlenek węgla). Wybór optymalnego interwału opróbowania przeprowadzono w oparciu o pomierzone stężenia składników alkanowych i tlenu. Te pierwsze wybrano z uwagi na ich priorytetowe znaczenie w powierzchniowych naftowych badaniach prospekcyjnych, natomiast zarejestrowane stężenia tlenu pozwoliły na określenie stopnia ingerencji atmosfery w warstwy przypowierzchniowe, w celu określenia zasięgu strefy aktywnej wymiany. Oznaczenia przeprowadzone zostały przez autora w laboratorium PGP ZSE AGH metodą chromatografii gazowej. Analizy węglowodorów wykonano chromatografem gazowym firmy FISONS Instruments GC 8160, z wykorzystaniem detekcji płomieniowo-jonizacyjnej (FID), natomiast oznaczenia tlenu prowadzono chromatografem gazowym firmy Carlo Erba Instr. GC 6300, z wykorzystaniem detekcji cieplno-przewodnościowej (TCD).

Obróbkę sygnału z detektorów FID i TCD przeprowadzono za pomocą programu całkującego WINNER. Kalibrację układu analitycznego wykonano za pomocą wzorcowych mieszanek gazowych „Scott II" firmy Supelco i Alltech, stosując metodę standardu zewnętrznego. Błąd stężenia w wykonanych analizach został oszacowany na poziomie 2% wartości mierzonej.

Wyniki uzyskane z pobranych próbek podzielono na pięć grup, ze względu na głębokość opróbowania: do 1 m, 1.0–1.8 m, 1.8–2.5 m, 2.5–3.0 m oraz 3.0–4.3 m. W zakresach tych znalazło się odpowiednio: 57, 264, 291, 92 i 65 próbek gazu wolnego. Taki wybór zakresów głębokościowych podyktowany był w głównej mierze danymi literaturowymi (Karcew *et al*. 1954, 1964, Celary *et al*. 1961, Głogoczowski *et al*. 1962, Sokołow & Grigoriew 1962, Dzieniewicz *et al*. 1979a, Jones & Drozd 1983, Horvitz 1985, McCarthy & Reimer 1986, Brooks & Welte 1987, Saunders *et al*. 1993, Górecki *et al*. 1995b, Grocholski & Szwagrzyk 1996, Dzieniewicz & Sechman 2002) oraz posiadanym doświadczeniem autora.

W wyniku przeprowadzonej porównawczej analizy statystycznej wytypowano optymalny, z punktu widzenia pomiarów geochemicznych, interwał głębokościowy dla obszaru niecki wałbrzyskiej.

Rejon Karlina na Pomorzu Zachodnim

Celem badań przeprowadzonych w rejonie Karlina, położonego w północno-wschodniej części wału pomorskiego (Fig. 1A) była ocena poprawności przyjętej przez PGP ZSE AGH głębokości opróbowania wynoszącej 1.2 m. Z głębokości tej od 1992 roku pobierano próbki gazu podglebowego, prowadząc powierzchniowe badania geochemiczne w wielu różnych pod względem budowy geologicznej obszarach Polski (Pomorze Zachodnie, monoklina przedsudecka, zapadlisko przedkarpackie, rów lubelski, Karpaty, niecka wałbrzyska) (Górecki *et al*. 1993, 1995a, b, Dzieniewicz *et al*. 1996, Strzetelski *et al*. 1996).

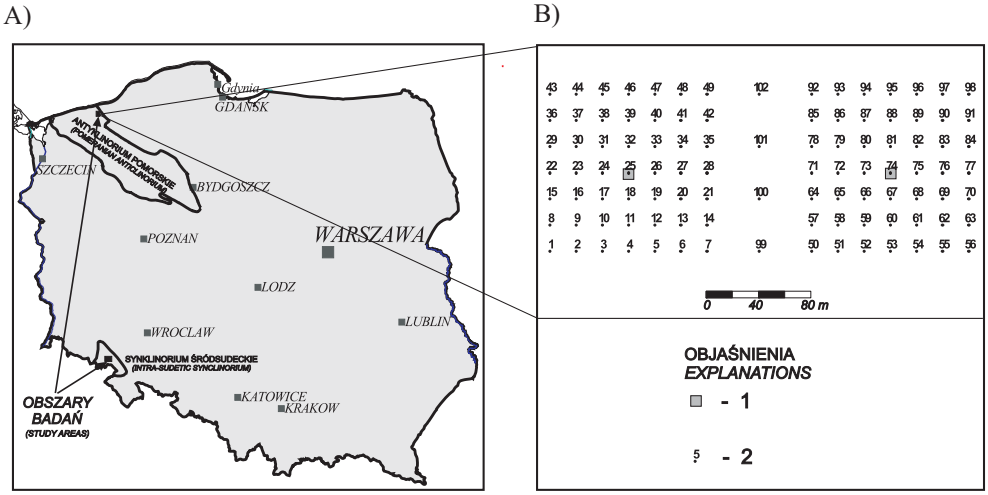

Fig. 1. Lokalizacja obszarów badań (A) oraz rozmieszczenie punktów pomiarów geochemicznych w rejonie Karlina (B): 1 – miejsce anomalii geochemicznej stwierdzonej w 1994 r., 2 – punkt pomiarów geochemicznych

Fig. 1. Localization of study areas (A) and sites of geochemical measurements (B): 1 – geochemical anomaly localized in 1994, 2 – site of geochemical measurement

Stężenia gazów zarejestrowane w próbkach pobranych z głębokości 1.2 m porównano ze stężeniami uzyskanymi z głębokości 1.8 m. Wybór tej ostatniej wynikał z faktu, że badania zmienności stężeń alkanów z głębokością przeprowadzono jedynie na obszarze niecki wałbrzyskiej, gdzie głębokość 1.8 m stanowiła górną granicę wytypowanego, optymalnego interwału opróbowania dla tego obszaru.

Badania polegały na przeprowadzeniu analizy porównawczej stężeń alkanów gazowych pomierzonych na głębokościach 1.2 m i 1.8 m. Przeprowadzono je w strefie anomalnych stężeń węglowodorów, zarejestrowanych w czasie powierzchniowych pomiarów geochemicznych wykonanych na obszarze Pomorza Zachodniego w 1993 r. i 1994 r. (Górecki *et al.* 1993, 1995a).

Wybrana strefa została pokryta siatką badawczą o boku 20 m. W narożach założonej siatki usytuowano punkty poboru próbek. Rozmieszczono je w taki sposób, aby obejmowały przynajmniej dwa, opróbowane wcześniej, punkty pomiarowe, w których stwierdzono anomalne stężenia węglowodorów (Fig. 1B). Próbki pobierano, stosując zestaw i metodykę opracowaną w PGP ZSE AGH (Dzieniewicz & Sechman 2001, 2002), przy czym do opróbowania wspomnianych poziomów głębokościowych wykorzystano dwie sondy pomiarowe, które instalowano w odległości ok. 0.5 m od siebie.

Ogółem do badań pobrano 204 próbki powietrza podglebowego, po 102 z każdej badanej głębokości, które przeanalizowano chromatograficznie pod kątem zawartości metanu i kolejnych lekkich homologów (etan, propan, i-butan, n-butan), stosując metodykę analogiczną jak w badaniach na obszarze niecki wałbrzyskiej.

Przeprowadzono statystyczną analizę porównawczą wyników uzyskanych z dwóch zbiorów próbek, pod kątem określenia horyzontu głębokościowego charakteryzującego się silniejszym sygnałem geochemicznym pochodzenia wgłębnego.

METODYKA ANALIZ STATYSTYCZNYCH I SPOSÓB PRZEDSTAWIENIA UZYSKANYCH WYNIKÓW

Pomierzone stężenia składników węglowodorowych – w wydzielonych zbiorach próbek pobranych z założonych interwałów i horyzontów głębokościowych – przeanalizowano, oceniając podstawowe parametry statystyczne wszystkich oznaczonych składników, postaci rozkładów stężeń metanu, sumy alkanów C_2-C_5 oraz ich statystyczne miary położenia.

Wstępną ocenę statystyczną oznaczonych homologów szeregu metanowego i sumy wyższych alkanów w określonym zbiorze próbek przeprowadzono w oparciu o wyznaczone oraz policzone wartości minimalne, maksymalne, mediany, średnie arytmetyczne oraz udziały próbek z pomierzonymi wartościami danego składnika.

W celu oceny i porównania głównych oraz dodatkowych (anomalnych) populacji pomierzonych stężeń metanu, sumy wyższych alkanów i tlenu w badanych zbiorach próbek, skonstruowano histogramy. W zbudowanych szeregach rozdzielczych ostatnią (a w przypadku tlenu pierwszą) klasę pozostawiono otwartą. Długości klas na histogramach przyjmowano w sposób empiryczny (metodą prób i błędów) tak, aby umożliwić wydzielenie głównych i dodatkowych zakresów wartości dla każdego analizowanego zbioru pomierzonych stężeń. Na osi *OX* opisano górne wartości wydzielonych przedziałów klasowych.

W następnej kolejności porównano wartości wyznaczonych median oraz policzone średnie arytmetyczne dla badanych wskaźników geochemicznych, które zestawiono w tabelach, a także przedstawiono w postaci diagramów słupkowych. Zmiany średnich stężeń poszczególnych homologów szeregu metanowego i tlenu wraz z głębokością opróbowania przedstawiono w postaci wykresu. Na wykresie tym policzone wartości średnie, reprezentujące poszczególne interwały głębokościowe, zaznaczono punktami usytuowanymi w środku każdego interwału. Punkty te połączono liniami. Cały wykres przedstawiono na tle zasięgu badanych interwałów głębokościowych.

W związku z tym, że stężenia badanych składników znacząco odbiegają od rozkładów normalnych, procedurę testowania statystycznego zastosowano jedynie w stosunku do wyznaczonych wartości median. Przy czym stosowano ją tylko wówczas, gdy różnice pomiędzy wyznaczonymi wielkościami median dla badanych zbiorów stężeń były niewielkie.

Założona przy testowaniu hipoteza zerowa (H_0) mówi o tym, że badane zbiory stężeń pochodzą z populacji o identycznej medianie. W teście tym zakładano, że około 50% wszystkich przypadków w każdym ze zbiorów wypada powyżej (lub poniżej) wspólnej mediany (program komputerowy STATISTICA). W oparciu o uzyskane i zestawione w tabelach (Tab. 1), liczebności obserwowane (l_i) i oczekiwane (e_i), obliczano wartość statystyki χ^2 według wzoru

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{k} \frac{(l_i - e_i)^2}{e_i} \tag{1}$$

Tabela (Table) 1

Sposób obliczeń i prezentacji wyników testu mediany: l_1, l_2, l_3, l_4 – wartości (liczebności) obserwowane, e_1, e_2, e_3, e_4 – wartości oczekiwane

The manner of calculations and display of the results of the test of median: l_1, l_2, l_3, l_4 – observed values (number), e_1, e_2, e_3, e_4 – expected values

Pomierzone stężenia *measured concentrations*	Wartości *values*	Zbiór nr 1 *series no 1*	Zbiór nr 2 *series no 2*	Razem *total*
≤ mediany *≤ median*	obserwowane *observed*	l_1	l_2	$l_{1,2} = l_1 + l_2$
	oczekiwane *expected*	$e_1 = \frac{l_{1,3} \times l_{1,2}}{l_R}$	$e_2 = \frac{l_{2,4} \times l_{1,2}}{l_R}$	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	$l_1 - e_1$	$l_2 - e_2$	
> mediany *> median*	obserwowane *observed*	l_3	l_4	$l_{3,4} = l_3 + l_4$
	oczekiwane *expected*	$e_3 = \frac{l_{1,3} \times l_{3,4}}{l_R}$	$e_4 = \frac{l_{2,4} \times l_{3,4}}{l_R}$	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	$l_3 - e_3$	$l_4 - e_4$	
Razem *total*	obserwowane *observed*	$l_{1,3} = l_1 + l_3$	$l_{2,4} = l_2 + l_4$	$l_R = l_1 + l_2 + l_3 + l_4$

Hipotezę zerową odrzucano, gdy obliczona wartość statystyki χ^2 była większa (lub równa) od wartości krytycznej na poziomie istotności równym 0.05.

Wyniki przeprowadzonych testów przedstawiono w tabelach. Pozwoliły one w sposób jednoznaczny ocenić występujące zróżnicowanie badanych miar położenia.

WYNIKI BADAŃ I ICH OCENA

Obszar niecki wałbrzyskiej

Wykorzystany do badań wyjściowy materiał faktograficzny, w postaci wyników analiz chromatograficznych, został przedstawiony w pracy doktorskiej autora (Sechman 2003).

W oparciu o pomierzone wartości stężeń i wyznaczone parametry statystyczne (Tab. 2) należy stwierdzić, że metan występuje we wszystkich badanych próbkach, natomiast jego największe stężenie (25.7%) zanotowano w interwale 1.8–2.5 m. Udziały próbek z pomierzonymi stężeniami etanu zmieniają się od 64.5% w najgłębiej położonym interwale głębokościowym do 84.2% w interwale najpłytszym, przy czym najwyższą jego wartość (990 ppm) zanotowano w interwale 1.8–2.5 m. Stężenia propanu dochodziły do 280 ppm (interwał 1.0–1.8 m), a udziały próbek z pomierzonymi wartościami tego składnika zmieniały się od 50% w interwale 2.5–3.0 m do ponad 70% w interwale 1.0–1.8 m. W tym ostatnim zanotowano również najwyższe stężenie i-butanu (44.1 ppm) oraz najwyższy udział próbek z zarejestrowanymi stężeniami tego składnika.

Tabela (Table) 2

Podstawowe parametry statystyczne obliczone dla stężeń alkanów i tlenu oznaczonych w próbkach gazu podglebowego pobranych w rejonie Wałbrzycha z wydzielonych interwałów głębokościowych: Min – wartość minimalna, Max – wartość maksymalna, m_e – mediana, $x_{śr}$ – wartość średnia, U – udział próbek z pomierzonym składnikiem > 0, * – wartość minimalna, maksymalna, mediana i średnia podana w % obj.

*Principal statistical parameters of alkanes and oxygen concentrations measured in soil gas samples from the selected sampling depth intervals in the Wałbrzych Trough: Min – minimum value, Max – maximum value, m_e – median value, $x_{śr}$ – mean value, U – percentage of samples with measured values > 0, * – minimum, maximum, median and mean values in vol. %*

H [m]	Parametr statystyczny *Statistical parameter*	Alkany / *Alkanes*							Suma alkanów C_2-C_5 *Sum of alkanes C_2-C_5*	Tlen* *Oxygen**
		metan *methane*	etan *ethane*	propan *propane*	i-butan *i-butane*	n-butan *n-butane*	i-pentan *i-pentane*	n-pentan *n-pentane*		
< 1.0	Min [ppm]	0.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.74
	Max [ppm]	50.8	23.8	6.91	0.74	0.52	0.1	0.06	32.04	21.05
	m_e [ppm]	3.1	0.06	0.02	0	0	0	0	0.07	19.88
	$x_{śr}$ [ppm]	5.6	0.60	0.255	0.044	0.039	0.005	0.002	0.95	19.57
	U [%]	100.0	84.2	59.6	22.8	26.3	7.0	5.3	86.0	100.0
1.0–1.8	Min [ppm]	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.82
	Max [ppm]	186000.0	889.0	278.0	44.1	49.5	13.2	7.85	1281.6	21.04
	m_e [ppm]	3.25	0.07	0.04	0	0	0	0	0.13	19.37
	$x_{śr}$ [ppm]	4624.6	10.203	2.665	0.604	0.391	0.121	0.065	14.05	17.84
	U [%]	100.0	83.7	70.1	27.7	32.6	3.8	2.7	89.8	100.0
1.8–2.5	Min [ppm]	0.5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.91
	Max [ppm]	257000.0	990.0	156.0	28.9	29.7	9.25	10	1018.4	21.02
	m_e [ppm]	3.0	0.04	0.02	0	0	0	0	0.07	18.96
	$x_{śr}$ [ppm]	5356.1	10.234	1.646	0.299	0.278	0.128	0.070	12.66	17.51
	U [%]	100.0	75.3	56.4	24.1	22.0	5.8	3.4	79.7	100.0
2.5–3.0	Min [ppm]	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.74
	Max [ppm]	62100.0	146.0	7.75	7.88	1.65	4.0	1.98	151.2	21.04
	m_e [ppm]	3.2	0.03	0.005	0	0	0	0	0.04	18.69
	$x_{śr}$ [ppm]	2329.8	2.584	0.389	0.187	0.067	0.064	0.029	3.32	16.83
	U [%]	100.0	65.2	50.0	23.9	29.3	7.6	4.3	68.5	100.0
3.0–4.3	Min [ppm]	0.7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.99
	Max [ppm]	64200.0	12.1	3.68	0.53	0.67	0.04	0.02	17.1	20.95
	m_e [ppm]	2.75	0.02	0.02	0	0	0	0	0.06	17.21
	$x_{śr}$ [ppm]	3046.2	0.490	0.199	0.034	0.030	0.002	0.0003	0.76	15.84
	U [%]	100.0	64.5	56.5	19.4	22.6	4.8	1.6	72.6	100.0

Z kolei stężenia n-butanu dochodziły do 50 ppm (interwał 1.0–1.8 m), a udziały próbek z pomierzonymi wartościami tego składnika zmieniały się od 22% w interwale 1.8–2.5 m do 32.6% w interwale 1.0–1.8 m. Udziały próbek z pomierzonym i-pentanem zmieniały się od 3.8% w interwale 1.0–1.8 m do 7.6% w interwale 2.5–3.0 m, natomiast najwyższe jego stężenie (13.2 ppm) zanotowano w interwale 1.0–1.8 m. Najwyższe stężenie n-pentanu (10 ppm) zanotowano w interwale głębokościowym 1.8–2.5 m, zaś udziały próbek z pomierzonymi wartościami tego składnika zmieniały się od 1.6% do 5.3% odpowiednio w najgłębszym i najpłytszym wydzielonym interwale głębokościowym (Tab. 2).

Obecność tlenu zarejestrowano w każdej badanej próbce w zakresie 0.74–21.04%, odpowiednio w interwałach 2.5–3.0 m i < 1.0 m (Tab. 2).

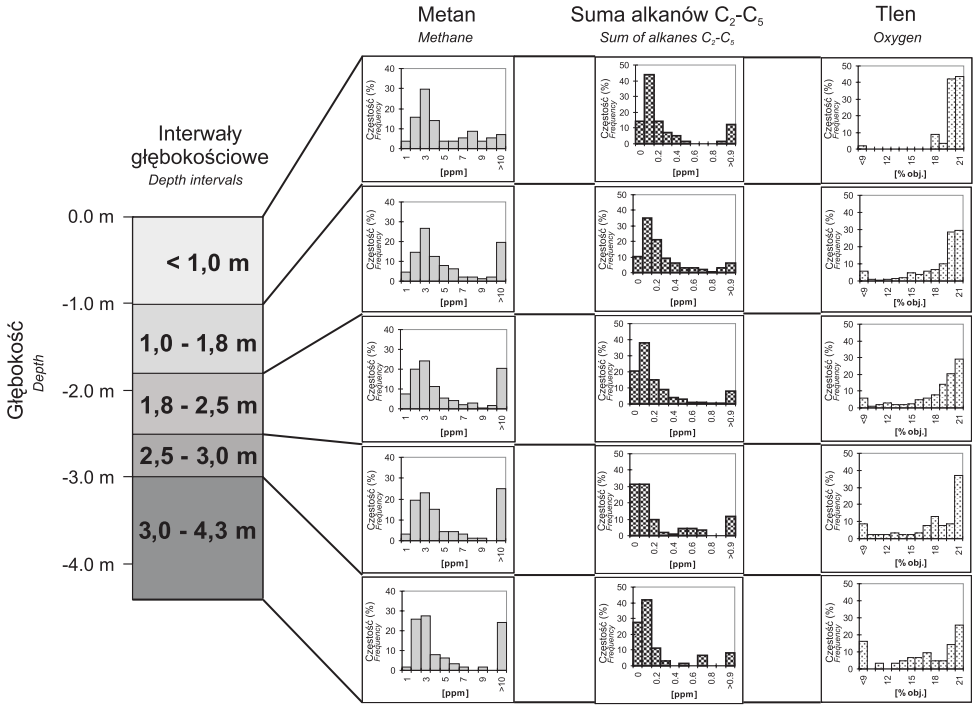

Fig. 2. Histogramy stężeń metanu, sumy alkanów C_2-C_5 i tlenu zarejestrowanych w przyjętych interwałach głębokościowych niecki wałbrzyskiej

Fig. 2. Histograms of methane, total alkanes C_2-C_5 and oxygen concentrations measured in selected depth intervals in the Wałbrzych Trough

Rozkłady (histogramy) pomierzonych wartości metanu (Fig. 2), posiadają pewne wspólne cechy w każdym badanym interwale głębokościowym. Na wszystkich histogramach główne populacje pomierzonych stężeń cechują się rozkładami zbliżonymi do normalnego z identyczną klasą modalną występującą w zakresie 2–3 ppm. Można również przyjąć, że poza najpłytszym interwałem głębokościowym we wszystkich pozostałych pomierzone stęże-

nia metanu tworzą główne populacje w przedziale od wartości minimalnej do ok. 9–10 ppm. Natomiast w interwale głębokościowym do 1 m główną populację tworzą próbki o stężeniach metanu nieprzekraczających 5 ppm.

Rozkłady pomierzonych stężeń sumy alkanów C_2-C_5 dla kolejnych głębokościowych interwałów opróbowania: do 1.0 m, 1.0–1.8 m i 1.8–2.5 m są zdecydowanie podobne (Fig. 2). We wszystkich trzech przypadkach charakteryzują się one obecnością dwóch wyraźnie zaznaczających się populacji. Główna populacja, obejmująca stężenia 0–0.5 ppm (interwał do 1 m) i 0–0.8 ppm (interwały 1.0–1.8 m i 1.8–2.5 m), odznacza się rozkładem mającym cechy rozkładu log-normalnego. Natomiast w pozostałych interwałach głębokościowych: 2.5–3.0 m i 3.0–4.3 m można wyróżnić główną populację o mniejszym zakresie stężenia (ok. 0–0.4 ppm) oraz słabo zaznaczające się pozostałe zbiory wartości.

Histogramy pomierzonych stężeń tlenu (Fig. 2), w każdym głębokościowym interwale opróbowania, charakteryzują się obecnością identycznej klasy modalnej (20–21%). Generalnie, charakter rozkładu stężeń tlenu w najpłytszym interwale opróbowania jest wyraźnie odmienny od pozostałych. Stężenia w tym interwale koncentrują się w zakresie 17–21%. Natomiast w pozostałych interwałach głębokościowych rozkładają się one prawie we wszystkich wydzielonych klasach, tworząc rozkłady o asymetrii lewostronnej. Charakterystyczną cechą prezentowanych rozkładów są stopniowo powiększające się częstości pierwszych, otwartych klas (< 9%), wraz ze wzrostem głębokości opróbowania. Ponadto pojawiają się coraz to większe ilości próbek o obniżonych stężeniach tlenu w miarę wzrostu głębokości, kosztem spadku ilości podwyższonych stężeń.

Przeciętne wartości stężeń metanu, wyrażone w postaci median, nie wykazują wyraźnych kierunków zmienności wraz z głębokością (Tab. 2, Fig. 3A). W związku z tym przyjęto hipotezę zerową zakładającą, że wszystkie próby pochodzą z populacji o identycznej medianie, która w rozważanym przypadku wynosi 3.1 ppm. Wyniki przeprowadzonego testu mediany (Tab. 3) wykazały, że wartość statystyki 2 obliczona zgodnie ze wzorem (1) jest równa 1.9. Natomiast wartość krytyczna rozkładu 2 dla czterech stopni swobody (pięć parametrów oszacowano ze zbiorów) na poziomie istotności 0.05 wynosi 9.49 (Krysicki *et al.* 1994). W związku z tym nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej zakładającej wspólną wartość mediany dla pomierzonych stężeń metanu.

Rozkład wartości median sumy alkanów C_2-C_5 wraz z głębokością opróbowania (Tab. 2, Fig. 3B) praktycznie nie wykazuje wspólnych cech z analogicznym rozkładem dla metanu (Tab. 2, Fig. 3A). Jakkolwiek należy zauważyć, że maksymalną wartość mediany, zarówno dla metanu jak i sumy alkanów C_2-C_5, stwierdzono w tym samym interwale głębokości opróbowania (1.0–1.8 m). Mediany stężeń sumy alkanów C_2-C_5 cechują się znaczną rozpiętością wyznaczonych wielkości, dlatego też w tym przypadku nie było potrzeby przeprowadzania testowania statystycznego.

Mediany i średnie stężenia tlenu obniżają się wraz ze wzrostem głębokości opróbowania odpowiednio w przedziałach 19.88–17.21% obj. i 19.57–15.84% obj. (Tab. 2, Fig. 3C, 4).

Średnie stężenia składników alkanowych mają podobny charakter zmian wraz z głębokością opróbowania. Wyraźnie podwyższone średnie stężenia alkanów występują w interwałach 1.0–1.8 m i 1.8–2.5 m. W interwale 1.0–1.8 m zanotowano najwyższe średnie stężenia propanu, i-butanu i n-butanu, a w interwale 1.8–2.5 m metanu, etanu, i-pentanu i n-pentanu (Tab. 2, Fig. 4).

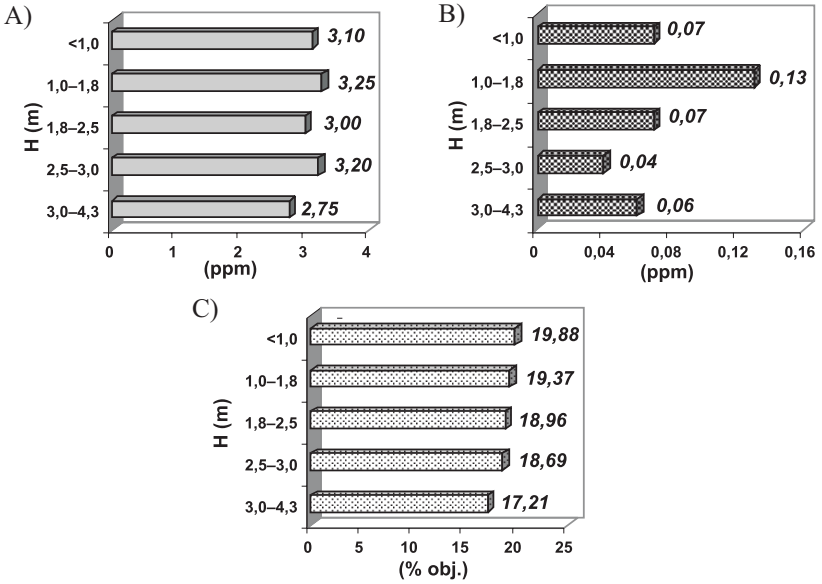

Fig. 3. Zmiany median stężeń metanu (A), sumy alkanów C_2-C_4 (B) i tlenu (C) w przyjętych interwałach głębokościowych w niecce wałbrzyskiej (*H* – wydzielone interwały głębokości opróbowania)

Fig. 3. Changes in median values of methane (A), total alkanes C_2-C_4 (B) and oxygen (C) in selected depth intervals in the Wałbrzych Trough (*H* – selected sampling depth intervals)

Tabela (Table) 3

Wyniki testu mediany dla stężeń metanu pomierzonych w próbkach gazu podglebowego pobranych w rejonie Wałbrzycha z wydzielonych interwałów głębokościowych

Results of the test of median of methane concentrations measured in soil gas samples from the selected sampling depth intervals in the Wałbrzych Trough

Pomierzone stężenia *measured concentrations*	Wartości *values*	Interwały głębokościowe [m] *depth intervals [m]*					Razem *total*
		< 1.0	1.0–1.8	1.8–2.5	2.5–3.0	3.0–4.3	
≤ mediany *≤ median*	obserwowane *observed*	29	127	150	45	37	388
	oczekiwane *expected*	28.76	133.2	146.82	46.42	32.8	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	0.24	–6.2	3.18	–1.42	4.2	
> mediany *> median*	obserwowane *observed*	28	137	141	47	28	381
	oczekiwane *expected*	28.24	130.8	144.18	45.58	32.2	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	–0.24	6.2	–3.18	1.42	–4.2	
Razem *total*	obserwowane *observed*	57	264	291	92	65	769

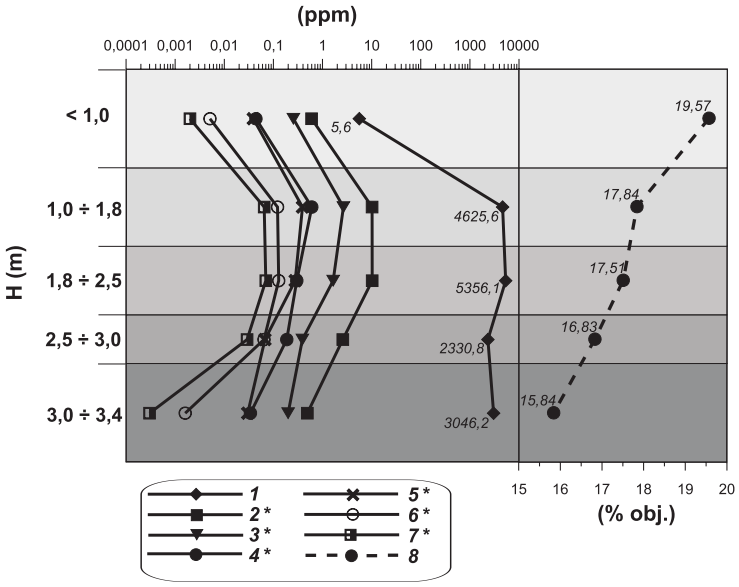

Fig. 4. Zmiany średnich stężeń lekkich alkanów i tlenu w przyjętych interwałach głębokościowych w niecce wałbrzyskiej: *H* – wydzielone interwały głębokości opróbowania, 1 – metan, 2 – etan, 3 – propan, 4 – i-butan, 5 – n-butan, 6 – i-pentan, 7 – n-pentan, 8 – tlen, * – średnie stężenia – tabela 1

Fig. 4. Changes in mean concentrations of light alkanes and oxygen in selected depth intervals in the Wałbrzych Trough: H – selected sampling depth intervals, 1 – methane, 2 – ethane, 3 – propane, 4 – i-butane, 5 – n-butane, 6 – i-pentane, 7 – n-pentane, 8 – oxygen, * – mean concentration – Table 1

W oparciu o policzone parametry statystyczne dla analizowanych składników alkanowych (Tab. 2) należy stwierdzić, że wartości maksymalne, średnie oraz udziały procentowe próbek z pomierzonymi wartościami, w obrębie każdego z wydzielonych interwałów głębokościowych maleją wraz ze wzrostem liczby atomów węgla w cząsteczce. Konsekwentny ich spadek w kierunku coraz to cięższych homologów wynika z naturalnej dyferencjacji zachodzącej w czasie przenikania z głębi ku powierzchni (Sokołow & Grigoriew 1962). Zatem należy zakładać, że stężenia składników alkanowych zarejestrowane w strefie przypowierzchniowej są głównie efektem przenikania gazów złożowych do powierzchni.

W przypadku metanu wspólna wartość mediany (Tab. 2, 3, Fig. 3A) oraz podobny charakter rozkładu głównych populacji pomierzonych stężeń (Fig. 2) oznacza, iż w każdym interwale głębokościowym może występować podobny poziom wielkości przeciętnych tego składnika. Zatem zmiana głębokości opróbowania nie powinna wpływać na wartość przyjmowanego tła dla metanu, która w prospekcyjnych badaniach geochemicznych zwykle waha się w zakresie od ok. 1 ppm do ok. 5 ppm (Dzieniewicz *et al*. 1996).

Natomiast w przypadku sumy alkanów C_2-C_5 wyraźne zróżnicowanie wartości median (Tab. 2, Fig. 3B) występujące w badanych interwałach wskazuje, że zmiana głębokości opróbowania może wpływać na poziom przyjmowanego tła. Jest to niezwykle ważne, ze względu na priorytetowe znaczenie sumy alkanów cięższych od metanu w geochemicznej, powierzchniowej prospekcji naftowej (Saunders *et al*. 1993, 1999, Tedesco 1995, Philp 1997).

Uwzględniając fakt, że nieomal w każdym przypadku osady przypowierzchniowe, charakteryzują się specyficznym uwarstwieniem poziomym (Tedesco 1995), na podstawie skonstruowanych histogramów dla sumy alkanów C_2-C_5 (Fig. 2) należy stwierdzić, że w obrębie badanych osadów przypowierzchniowych wyróżniają się dwie odmienne strefy głębokościowe. Pierwsza obejmuje trzy wydzielone interwały opróbowania sięgające od powierzchni terenu do głębokości 2.5 m, natomiast druga – pozostałą część badanych utworów (2.5–4.3 m). Rozkład średnich stężeń badanych składników alkanowych cięższych od metanu wraz z głębokością opróbowania (Fig. 4) świadczy o tym, że strefy te cechują się odmiennymi własnościami retencyjnymi w stosunku do migrujących z głębi węglowodorów. Płytsza strefa utworów przypowierzchniowych – sięgająca do głębokości 2.5 m – może mieć niską przepuszczalność i nasycenie wodą kapilarną. Natomiast druga – o głębokości od 2.5 m do 4.3 m – cechuje się wyższą przepuszczalnością i może być w znacznie większym stopniu nasycona wodą. Taka zmienność utworów w badanym głębokościowym profilu opróbowań powoduje, że migrujące z głębi cząsteczki węglowodorów zostają w znacznie większym stopniu „przechwytywane" w obrębie słabo przepuszczalnych utworów występujących w płytszej strefie opróbowań. Dodatkowym czynnikiem wspomagającym zatrzymywanie węglowodorów w tej strefie jest najprawdopodobniej obecność wody kapilarnej, tworzącej specyficzny ekran. Ostatecznie powoduje to wzbogacenie w węglowodory płytszej części badanego profilu głębokościowego, wyrażające się wyraźnymi wzrostami ich stężeń w interwale 1.0–2.5 m.

Innym czynnikiem wpływającym na rozkład średnich stężeń węglowodorów wraz z głębokością (Fig. 4) jest złożona i skomplikowana dynamika procesów ich przenikania od wgłębnych nagromadzeń do powierzchni. Należy sądzić, że stosunkowo szybkie przemieszczanie się węglowodorów, np. drogą efuzji od akumulacji wgłębnej do powierzchni (Karcew *et al*. 1954, Sokołow & Grigoriew 1962, McElvain 1969, Duchscherer 1980, Starobiniec 1986, Arp 1992, Tedesco 1995, Jones & Burtel 1996, Matthews 1996, Saunders *et al*. 1999), zostaje w końcowym etapie drastycznie ograniczone. W rezultacie szybka efuzyjna migracja węglowodorów zostaje zastąpiona ich ostatecznym, bardzo powolnym, dyfuzyjnym rozpraszaniem ze strefy przypowierzchniowej do atmosfery (Chapelle 1993, Klusman 1993, Matthews 1996). W wyniku takich procesów w profilu utworów przypowierzchniowych niecki wałbrzyskiej mogą pojawiać się lokalne nagromadzenia gazu (Sechman *et al*. 2002).

Spadek wartości median oraz średnich stężeń tlenu wraz ze wzrostem głębokości opróbowania (Tab. 2, Fig. 3C, 4) świadczy o stopniowym zubażaniu badanego profilu w tlen, a ponadto potwierdza poprawność wykonanych opróbowań, wymagających przede wszystkim odpowiednio sterylnych warunków poboru gazowej próbki geochemicznej. Natomiast największy spadek średniego stężenia tlenu, występujący przy przejściu z najpłytszego do następnego w kolejności interwału głębokości opróbowania, oraz odmienny od pozostałych charakter rozkładu pomierzonych stężeń tlenu w najpłytszym interwale (Fig. 2) wskazują na bardzo silną ingerencję atmosfery, sięgającą do głębokości 1 m. W konsekwencji obniżają się średnie stężenia wszystkich badanych składników węglowodorowych. Najsilniejszy spadek dotyczy najlżejszego metanu, którego średnie stężenie zarejestrowane w obrębie najpłytszego interwału było najmniejsze i wynosiło zaledwie 5.6 ppm. Może to świadczyć o tym, że strefa aktywnej wymiany może sięgać do głębokości ok. 1 m. Dodatkowym czynnikiem wpływającym na wielkość stężeń metanu w najpłytszym interwale, może być

działalność bakterii aerobowych. Bakterie te rozwijając się w środowisku o odpowiedniej wilgotności, którą zapewnia infiltracja wód opadowych, a także posiadając dostateczną ilość wolnego tlenu, mają zdolności rozwoju i asymilowania znacznych ilości migrującego z głębi metanu (Waleńczak 1987, Klusman 1993, Schumacher 1996, Kotelnikova 2002).

Uwzględniając rezultaty przeprowadzonych badań statystycznych, obejmujących porównania, analizy, testy statystyczne i rozkłady wraz z głębokością parametrów charakteryzujących pomierzone stężenia badanych składników węglowodorowych i tlenu, należy stwierdzić, że najkorzystniejszy dla opróbowań geochemicznych jest interwał 1.0–1.8 m. Wynika to z faktu, że zarejestrowany w nim sygnał geochemiczny jest najsilniejszy, a ponadto jest to najpłytszy z badanych interwałów, które znajdują się poza oddziaływaniem strefy aktywnej wymiany, sięgającej do głębokości 1.0 m. Należy zaznaczyć, że podobne wyniki w tym zakresie uzyskano wcześniej (Dzieniewicz *et al*. 1979a), pomimo iż ówczesne badania prowadzone były na obszarze Karpat, przy zastosowaniu innej techniki poboru próbki gazu podglebowego.

Rejon Karlina na Pomorzu Zachodnim

W oparciu o pomierzone wartości stężeń (Sechman 2003) i wyznaczone parametry statystyczne (Tab. 4) należy stwierdzić, że metan występuje we wszystkich 204 badanych próbkach, przy czym na głębokości 1.2 m jego stężenie waha się w zakresie od 0.4 ppm do 64 ppm, natomiast na głębokości 1.8 m w zakresie od 0.6 ppm do 5.3 ppm. Etan zarejestrowano w 73.5% wszystkich próbek pobranych z głębokości 1.2 m, w zakresie stężeń od 0 do ponad 1.6 ppm oraz w prawie 67% próbek pobranych z głębokości 1.8 m, w zakresie stężeń również od 0 do 0.07 ppm. Propan stwierdzono w ponad 10.8% wszystkich próbek pobranych z głębokości 1.2 m oraz w 7.8% wszystkich próbek pobranych z głębokości 1.8 m. Na głębokości opróbowania 1.2 m maksymalnie stężenie propanu wynosiło 0.29 ppm, natomiast na głębokości 1.8 m było ono o ponad cały rząd wielkości mniejsze tj. ok. 0.02 ppm. Obecność i-butanu stwierdzono tylko w 1 próbce na głębokości 1.2 m, w której stężenie wynosiło 0.05 ppm. Z kolei występowanie n-butanu zarejestrowano wyłącznie na głębokości 1.2 m w prawie 4% analizowanych próbek, przy maksymalnym stężeniu wynoszącym 0.08 ppm (Tab. 4).

Histogramy dla pomierzonych stężeń metanu (Fig. 5A, B), oznaczonych w próbkach powietrza podglebowego, pobranych z głębokości 1.2 m i 1.8 m, są zbliżone do rozkładów log-normalnych. Charakteryzują się one asymetrią prawostronną, na co wskazują obliczone współczynniki skośności (Brandt 2002), które dla zbiorów stężeń pochodzących z głębokości 1.2 m i 1.8 m wynoszą odpowiednio 9.8 i 1.2.

Histogramy stężeń sumy alkanów cięższych od metanu, mają identyczne klasy modalne i rozkłady zbliżone do logarytmicznych (Fig. 6A, B). Podobnie jak w przypadku metanu, charakteryzują się one asymetrią prawostronną. W tym przypadku policzone współczynniki skośności dla próbek pochodzących z głębokości 1.2 m i 1.8 m wynoszą odpowiednio 9.8 i 2.5.

Na głębokości 1.2 m zanotowano wyższą wartość średniego stężenia metanu oraz nieco niższą wartość mediany w porównaniu z głębokością 1.8 m (Tab. 4, Fig. 7A). W związku z tym przyjęto hipotezę zerową zakładającą, że wszystkie próby pochodzą z populacji o identycznej medianie, która w rozważanym przypadku wynosi 1.66 ppm.

Tabela (Table) 4

Podstawowe parametry statystyczne obliczone dla stężeń alkanów oznaczonych w próbkach gazu podglebowego pobranych w rejonie Karlina z głębokości 1.2 i 1.8 m: *h* – głębokości opróbowań, Min – wartość minimalna, Max – wartość maksymalna, m_e – mediana, $x_{śr}$ – wartość średnia, *U* – udział próbek z pomierzoną wartością składnika > 0 ppm

Principal statistical parameters of alkanes measured in soil gas samples collected from the Karlino area at depth intervals 1.2 and 1.8 meters: h – sampling depths, Min – minimum value, Max – maximum value, m_e – median value, $x_{śr}$ – mean value, U – percentage of samples with measured values > 0 ppm

H [m]	Parametr statystyczny *Statistical parameter*	Alkany / *Alkanes*					Suma alkanów C_2-C_4 *Sum of alkanes C_2-C_4*
		metan *methane*	etan *ethane*	propan *propane*	i-butan *i-butane*	n-butan *n-butane*	
1.2	Min [ppm]	0.4	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max [ppm]	64.0	1.65	0.29	0.05	0.08	2.07
	m_e [ppm]	1.54	0.01	0	0	0	0.01
	$x_{śr}$ [ppm]	2.37	0.031	0.004	0.001	0.001	0.036
	U [%]	100.0	73.5	10.8	1.0	3.9	73.5
1.8	Min [ppm]	0.6	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	Max [ppm]	5.3	0.07	0.02	0	0	0.09
	m_e [ppm]	1.78	0.01	0	0	0	0.01
	$x_{śr}$ [ppm]	1.98	0.011	0.001	0.000	0.000	0.012
	U [%]	100.0	66.7	7.8	0.0	0.0	66.7

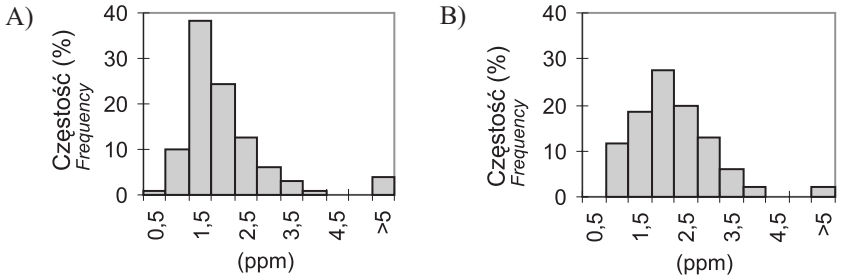

Fig. 5. Histogramy pomierzonych stężeń metanu na głębokościach 1.2 m (A) i 1.8 m (B) w rejonie Karlina

Fig. 5. Histograms of methane concentrations measured at depths 1.2 (A) and 1.8 (B) meters in the Karlino area

Wyniki przeprowadzonego testu mediany (Tab. 5) wykazały, że wartość statystyki χ^2 obliczona zgodnie ze wzorem (1) jest równa 7.84. Natomiast wartość krytyczna rozkładu χ^2 dla pierwszego stopnia swobody (dwa parametry oszacowano ze zbiorów) na poziomie istotności 0.05 wynosi 3.84 (Krysicki *et al*. 1994). Wobec tego należy odrzucić hipotezę zerową zakładającą, że metan w próbkach pobranych z obydwu badanych głębokości ma identyczną medianę.

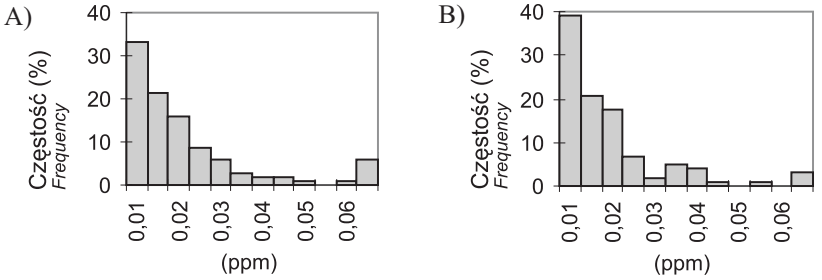

Fig. 6. Histogramy pomierzonych stężeń sumy alkanów C_2-C_4 na głębokościach 1.2 m (A) i 1.8 m (B) w rejonie Karlina

Fig. 6. Histograms of sum of alkanes C_2-C_4 concentrations measured at depths 1.2 (A) and 1.8 (B) meters in the Karlino area

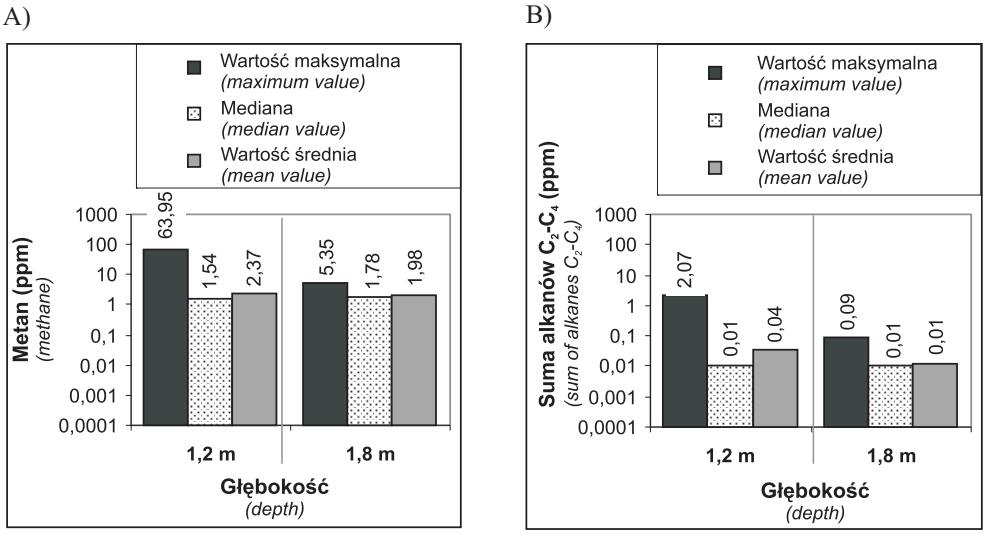

Fig. 7. Porównanie wartości maksymalnych, median i średnich dla stężeń metanu (A) i sumy alkanów C_2-C_4 (B) pomierzonych na głębokościach 1.2 m i 1.8 m w rejonie Karlina

Fig. 7. Comparison of maximum, median and mean values of methane (A) and sum of alkanes C_2-C_4 (B) concentrations at sampling depths 1.2 and 1.8 meters in the Karlino area

W przypadku sumy alkanów C_2-C_4 zarejestrowano identyczne wartości median na obu badanych głębokościach opróbowań oraz aż trzykrotnie wyższą wartość średnią na głębokości 1.2 m (Tab. 4, Fig. 7B).

Podobne kształty rozkładów stężeń metanu i sumy alkanów C_2-C_4 pochodzących z głębokości 1.2 m i 1.8 m (Fig. 5, 6) mogą świadczyć o tym, że pomierzone stężenia analizowanych składników węglowodorowych są w głównej mierze efektem emanacji z wgłębnego źródła rozpraszania. Uzyskane wyniki sugerują również, że próbki pobrane z obu badanych głębokości można uznać za reprezentatywne.

Tabela (Table) 5

Wyniki testu mediany dla stężeń metanu pomierzonych w próbkach gazu podglebowego pobranych w rejonie Karlina z głębokości 1.2 i 1.8 m

Results of the test of median of methane concentrations measured in soil gas samples collected from the Karlino area at depth intervals 1.2 and 1.8 meters

Pomierzone stężenia *measured concentrations*	Wartości *values*	Głębokość *depth*		Razem *total*
		1.2 m	1.8 m	
≤ mediany *≤ median*	obserwowane *observed*	41	61	102
	oczekiwane *expected*	51	51	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	–10	10	
> mediany *> median*	obserwowane *observed*	61	41	102
	oczekiwane *expected*	51	51	
	obserwowane – oczekiwane *observed – expected*	10	–10	
Razem *total*	obserwowane *observed*	102	102	204

Niższa wartość mediany dla metanu, stwierdzona na głębokości 1.2 m (Tab. 4, 5, Fig. 7A) może wynikać z nieco łatwiejszego przenikania tego gazu do atmosfery niż z głębokości 1.8 m lub jego częściowej asymilacji przez bakterie tlenowe (Waleńczak 1987, Klusman 1993, Schumacher 1996, Kotelnikova 2002). Jednak wyższe wartości maksymalne i średnie dla metanu oraz sumy alkanów C_2-C_4 stwierdzone na głębokości 1.2 m (Tab. 4, Fig. 7A) wskazują, że głębokość ta charakteryzuje się silniejszym powierzchniowym sygnałem geochemicznym pochodzenia wgłębnego. Ponadto charakter obserwowanych rozkładów stężeń (silniejsza asymetria prawostronna) świadczy dobitnie o tym, iż badany horyzont opróbowania (1.2 m) położony jest poza zasięgiem strefy aktywnej wymiany.

Uwzględniając wyniki wszystkich przeprowadzonych analiz, a także biorąc pod uwagę ekonomikę prowadzonych badań terenowych, należy stwierdzić, że na obszarze Pomorza Zachodniego głębokość 1.2 m jest optymalna dla opróbowań geochemicznych, realizowanych metodą gazu wolnego.

PODSUMOWANIE

Wyniki badań wykazały, że na obszarze niecki wałbrzyskiej najdogodniejszy dla opróbowań geochemicznych prowadzonych metodą gazu wolnego jest interwał 1.0–1.8 m, który zalega poniżej strefy aktywnej wymiany sięgającej do głębokości ok. 1.0 m. Podobny zasięg strefy aktywnej wymiany należy przyjąć dla obszaru Pomorza Zachodniego. Wskazują na to wyniki przeprowadzonych badań w rejonie Karlina, które dowiodły, że głębo-

kość 1.2 m znajduje się poza znaczącym oddziaływaniem atmosfery. W badaniach tych wykazano również, że stężenia węglowodorów gazowych szeregu metanowego, zarejestrowane na głębokościach 1.2 m i 1.8 m poniżej powierzchni terenu, są reprezentatywne dla wgłębnych źródeł rozpraszania. W związku z tym – uwzględniając uzyskane wyniki, a także biorąc pod uwagę ekonomikę prowadzonych badań – należy stwierdzić, że realizując powierzchniowe badania geochemiczne na obszarze Pomorza Zachodniego, próbki gazu podglebowego należy pobierać z głębokości 1.2 m. Podobną głębokość opróbowania gazowego można przyjąć dla obszaru niecki wałbrzyskiej.

Głębokość gazowego opróbowania geochemicznego, przyjęta w 1992 r. przez PGP ZSE AGH w oparciu o badania zespołu kierowanego przez J. Kuśmierka (Dzieniewicz *et al*. 1979a), które przeprowadzono w Karpatach, została zweryfikowana badaniami wykonanymi na obszarze Pomorza Zachodniego i niecki wałbrzyskiej. Podobne wyniki badań uzyskane w tak różnych, pod względem budowy geologicznej, obszarach sugerują, że również w innych perspektywicznych złożowo regionach Polski (np. zapadlisko przedkarpackie, monoklina przedsudecka) głębokość 1.2 m może być stosowana dla poboru próbek gazu podglebowego w prospekcyjnych powierzchniowych badaniach geochemicznych. Wymaga to jednak potwierdzenia przez wyniki analogicznych badań optymalizujących głębokość opróbowania gazowego, które należy przeprowadzić we wspomnianych obszarach.

Składam serdeczne podziękowania dr. inż. Markowi Dzieniewiczowi za pomoc w realizacji badań terenowych oraz cenne wskazówki podczas redagowania tekstu. Za cenne uwagi krytyczne pragnę szczególnie podziękować dr. hab. inż. Andrzejowi Krawczykowi, prof. AGH, oraz dr. inż. Markowi Muszyńskiemu. Dziękuję dr. hab. inż., Wojciechowi Strzetelskiemu, prof. AGH – promotorowi mojej pracy doktorskiej, której część wyników została zaprezentowana w niniejszym artykule. Dziękuję również prof. dr. hab. inż. Maciejowi Kotarbie za udostępnienie wyników badań z niecki wałbrzyskiej, zaś zespołowi pracowników terenowych w składzie: A. Chrząstowski, P. Dzieniewicz, M. Kotulski, M. Kozieł, P. Sechman, A. Wójcik – za wykonanie opróbowań geochemicznych w rejonie Karlina.

LITERATURA

Arp G.K., 1992. Effusive microseepage: a first approximation model for light hydrocarbons movement in the subsurface. *Assoc. of Petrol. Geoch. Exploration Bull*., 8, 1–17

Brandt S., 2002. *Analiza danych. Metody statystyczne i obliczeniowe*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1–730.

Brooks J.M. & Welte D., 1987. *Advances in petroleum geochemistry. Vol. 2*. Academic Press, London.

Celary M., Lenk T. & Szura T., 1961. Przykład powierzchniowego zdjęcia gazowego w warunkach karpackich. *Nafta*, 8, 209–211.

Chapelle F.H., 1993. *Ground-water Microbiology and Geochemistry*. John Wiley & Sons, Nowy Jork, 1–424.

Duchscherer W., 1980. Geochemical methods of prospecting for hydrocarbons. *Oil and Gas Journal*, 78, 48, 194–209.

Dzieniewicz M., Kuśmierek J., Potera J. & Semyrka R., 1978. Perspektywy naftowe fałdu Suchych Rzek w świetle badań geochemicznych (Bieszczady). *Kwart. AGH Geologia*, 4, 3, 37–51.

Dzieniewicz M., Kuśmierek J. & Rusta T., 1979a. Optymalizacja techniki prowadzenia zdjęć gazowych w świetle badań eksperymentalnych. *Techn. Posz. Geol*., 1, 37–42.

Dzieniewicz M., Kuśmierek J. & Rusta T., 1979b. Porównanie wyników powierzchniowych badań geochemicznych z budową struktur podmagurskich w południowo-zachodnim obrzeżeniu „okna tektonicznego" Mszany Dolnej. *Nafta*, 5, 145–149.

Dzieniewicz M. & Rusta T., 1979. *Możliwości prospekcyjne powierzchniowych metod geochemicznych dla określenia w Karpatach ropogazonośności stref o skomplikowanej budowie geologicznej*. Biblioteka Główna AGH, Kraków (praca doktorska).

Dzieniewicz M., Sechman H. & Górecki W., 1996. *Zastosowanie powierzchniowego zdjęcia geochemicznego w prospekcji naftowej*. Projekt badawczy Komitetu Badań Naukowych w Warszawie nr 9 9238 92 03, Arch. ZSE AGH, Kraków (praca niepublikowana).

Dzieniewicz M. & Sechman H., 2001. Kowadło sondy udarowej do badania gruntu. Wzór użytkowy RP nr 58584, *WUP*, 05/2001.

Dzieniewicz M. & Sechman H., 2002. Zestaw do ręcznego pobierania próbek gazowych z warstw przypowierzchniowych. Patent RP nr 184080, *WUP*, 08/2002.

Dzieniewicz M., Sechman H., Kotarba M.J. & Korus A., 2002. Surface geochemical surveying of methane and carbon dioxide in the selected areas of the Wałbrzych Coal District. Rozdział 8 w: Kotarba M.J. (red.), Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls, 95–106, Society of Research on Environmental Changes "GEOSPHERE", Kraków.

Fiszer J., Kotarba M.J. & Kominowski K., 2002. Recovery of Carboniferous aquifers caused by coal mine closure in Wałbrzych Coal District. Rozdział 3 w: Kotarba M.J. (red.), Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls, 25–42, Society of Research on Environmental Changes "GEOSPHERE", Kraków.

Galon R. & Dylik J., 1967. *Czwartorzęd polski*. PWN, Warszawa, 1–527.

Głogoczowski J.J., Gumółka J., Karaskiewicz J., Karpiński T. & Szura T., 1962. Badanie zależności występowania powierzchniowych anomalii geochemicznych od istnienia złoża węglowodorów w okolicy Lubaczowa. *Prace Inst. Naft*., 73, Wyd. Górniczo-Hutnicze, Katowice, 3–16.

Górecki W., Strzetelski W., Dzieniewicz M. & Sechman H., 1993. *Wykonanie zdjęcia geochemicznego wzdłuż profilu Gościno-Sarbinowo. Wykonanie zdjęcia geochemicznego wzdłuż profilu Karlino-Mścice. Interpretacja zbiorcza wyników zdjęcia geochemicznego w korelacji z sejsmicznym obrazem strukturalnym na obszarze Pomorza Zachodniego w strefie Gościno-Mścice*. Arch. ZSE AGH, Kraków (praca niepublikowana).

Górecki W., Strzetelski W., Dzieniewicz M. & Sechman H., 1995a. *Powierzchniowe zdjęcie geochemiczne w prospekcji naftowej w rejonie Karlino-Ustronie Morskie-Sarbinowo*. Arch. Zesp. Specj. Tow. "Geos", Kraków (praca niepublikowana).

Górecki W., Strzetelski W., Dzieniewicz M. & Sechman H., 1995b. Methods and results of surface geochemical survey as adopted to petroleum exploration in permian structures of Polish lowland. *Abstr. Conference and Exhibition "East meets west"*, Kraków, 12–15 Sept. 1995, PC–10.

Grocholski S. & Szwagrzyk A., 1996. Nowa możliwość wykorzystania powierzchniowego zdjęcia gazowego. *Nafta Gaz*, 11, 480–485.

Horvitz L., 1985. Geochemical exploration for petroleum. *Science*, 229, 821–827.

Jones V.T. & Burtell S.G., 1996. Hydrocarbon flux variations in natural and anthropogenic seeps. W: Schumacher D. & Abrams M.A. (red.), Hydrocarbon migration and its near-surface expression, *AAPG Memoir*, 66, 203–221.

Jones V.T. & Drozd R.J., 1983. Prediction of oil or gas potential by near-surface geochemistry. *AAPG Bull*., 67, 6, 932–952.

Karcew A.A., Tabasaranskij Z.M., Subbota M.I. & Mogilewskij G.A., 1954. *Geochimiczeskije metody poiskow i razwiedki nieftianych i gazowych miestorożdienii*. *Gostoptiechizdat*, Moskwa, 1–430.

Karcew A.A., 1964. *Gieochimiczeskije mietody isliedowanijpri poiskach niefti i gaza*. Niedra, Moskwa.

Karczewski A., 1963. Morfologia, struktura i tekstura moreny dennej na obszarze Polski zachodniej. *Nauk. Prace Komisji Geogr.-Geol*., Pozn. Tow. Przyj., IV, 2.

Klusman R.W., 1993. *Soil Gas and Related Methods for Natural Resource Exploration*. John Wiley & Sons, New York, 1–483.

Korus A., Kotarba M.J., Dzieniewicz M. & Sechman H., 2002. Evaluation of methane and carbon dioxide flux from Upper Carboniferous coal-bearing strata to near-surface zone in the Wałbrzych Coal District. Rozdział 12 w: Kotarba M.J. (red.), Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls, 175–188, Society of Research on Environmental Changes "GEOSPHERE", Kraków.

Kotarba M.J., 2002. Post-mining gas hazards: the purpose of near-surface geochemical surveys in the Wałbrzych Coal District. Rozdział 1 w: Kotarba M.J. (red.): Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls, 1–10, Society of Research on Environmental Changes "GEOSPHERE", Kraków.

Kotarba M.J., Dzieniewicz M., Korus A. & Sechman H., 1999. M*onitoring geochemiczny zagrożeń gazowych w strefie przypowierzchniowej na wybranych obszarach niecki wałbrzyskiej (ok. 9.0 km^2) związanych z likwidacją kopalń węgla kamiennego w celu wyznaczenia anomalnych zawartości gazów, dopływu węglowych gazów złożowych do strefy przypowierzchniowej oraz zbadania kinetyki intensywności gazów dla oszacowania szybkości narastania stężeń metanu i ditlenku węgla, a tym samym oceny występowania zagrożeń w dolnych kondygnacjach budynków położonych w pobliżu stref anomalnych koncentracji gazów*. Arch. ZSE AGH, Kraków (praca niepublikowana).

Kotelnikova S., 2002. Microbial production and oxidation of methane in deep subsurface. *Earth-Science Reviews*, 58, 367–395.

Krysicki W., Bartos J., Dyczka W., Królikowska K. & Wasilewski M., 1994. *Rachunek prawdopodobieństwa i statystyka matematyczna w zadaniach. Część II – statystyka matematyczna*. Wyd. Naukowe PWN, Warszawa, 1–328.

Matthews M.D., 1996. Migration – a view from the top. W: Schumacher D. & Abrams M.A. (red.), Hydrocarbon migration and its near-surface expression, *AAPG Memoir*, 66, 139–155.

McCarthy J.H. & Reimer G.M., 1986. Advances in soil geochemical exploration for natural resourses: some current examples and practices. *Jour. of Geoph. Res*., 91, B12, 123-27–12338.

MacElvain R., 1969. Mechanics of gaseous ascension through sedimentary column. W: Heroy W.B. (ed), Unconventional methods in exploration for petroleum and natural gas, *Symposium 1*, Dallas, Texas, Southern Methodist University Press, 15–28.

Philp R.P., 1987. Surface Prospecting Methods for Hydrocarbon Accumulations. W: Brooks J., Welte D. (red.), Advances in Petroleum Geochemistry, vol. 2, 209–250, Academic Press, London.

Saunders D.F., Burson K.R., Brown J.J., Thompson C.K., 1993. Combined geological and surface geochemical mathods discovered Agaritta and Bradyty Creek fields, Concho Country, Texas. AAPG Bull., 77, 1219–1240.

Saunders D.F., Burson K.R. & Thompson C.K., 1999. Model for hydrocarbon microseepage and related near-surface alterations. *AAPG Bull*., 83, 1, 170–184.

Schumacher D., 1996. Hydrocarbon-inducted alteration of soils and sediments. W: Schumacher D. & Abrams M.A. (red.), Hydrocarbon migration and its near-surface expression, *AAPG Memoir*, 66, 71–89.

Sechman H., Dzieniewicz M. & Kotarba, M.J., 2002. Depth changes in methane and carbon dioxide contents in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District. Rozdział 10 w: Kotarba M.J. (red.), Gas hazard in the near-surface zone of the Wałbrzych Coal District caused by coal mine closure: geological and geochemical controls, 137–152, Society of Research on Environmental Changes "GEOSPHERE", Kraków.

Sechman H., 2003. *Wpływ wybranych parametrów środowiska opróbowania na gazowe wskaźniki przypowierzchniowe w prospekcyjnych naftowych badaniach geochemicznych*. Biblioteka Główna AGH, Kraków (praca doktorska).

Sokołow W.A. & Grigoriew G.G., 1962. *Mietodika i riezultaty gazowych gieochimiczeskich nieftiegazopoiskowych rabot*. Gostoptiechizdat, Moskwa, 1–403.

Starobiniec I.S., 1986. *Gazochimiczeskije pokazatieli nieftiegazonosti i prognoz sostawa ugliewodorodnych skoplienij*. Niedra, Moskwa, 1–200.

Strzetelski W., Górecki W., Dzieniewicz M., Sechman H. & Falkiewicz A., 1996. Surface geochemical anomalies as related to the structure of variscan elevation in West Pomerania (NW Poland). *Oil and Gas News from Poland*, 6, Geosynoptics Society GEOS, Warszawa – Kraków, 187–196.

Tedesco S.A. (red.), 1995. *Surface Geochemistry in Petroleum Exploration*. Chapman & Hall Int. Thomson Publ. Co., New York, 1–206.

Waleńczak Z., 1987. *Geochemia organiczna*. Wyd. Geol., Warszawa, 1–160.

Summary

The following study aimed to determine the optimum sampling depth of soil gas which would lead to credible identification of geochemical anomalies originating from hydrocarbon deposits. The project was provided in two areas. The optimum sampling interval was proposed basing upon the changes in concentrations of light gaseous alkanes and oxygen with the depth, as revealed by surface geochemical survey run in the Wałbrzych Trough over the closed and remediated hard coal mines (Fig. 1). The statistical comparative analysis was run for effects detected in samples collected from two selected depth horizons (1.2 and 1.8 meters) belonging to the optimum depth interval. This study was undertaken in the Karlino area (western Pomerania, Fig. 1).

Studies of the Wałbrzych Trough indicated that maximum and mean concentrations as well as percentages of samples with measured values of analyzed elements decrease with the increasing number of carbon atoms in a molecule. This is valid for each of considered sampling depth intervals (< 1, 1.0–1.8, 1.8–2.5, 2.5–3.0 and 3.0–4.3 meters) (Tab. 2). Such a decreasing trend of analyzed values towards the heavier homologues corresponds to natural differentiation during ascension of hydrocarbons, which suggests their deep source. The range of active exchange zone may reach down to 1.0 meter depth, as revealed by different distribution patterns of measured methane and oxygen concentrations in the shallowest interval related to such patterns at depth (Fig. 2). Median values of methane were about 3 ppm and do not show statistically important differences (Tabs 1, 3, Fig. 3A). The strong influence of atmosphere (down to about 1 meter depth) is documented by highest median values (Tab. 2, Fig. 3C) and mean value of oxygen concentration (Tab. 2, Fig. 4) detected in this interval: 19.88% and 19.57%, respectively. As a result, the distinct decrease is observed of median value for total alkanes C_2-C_5 (Fig. 3B) and mean concentrations of all analyzed hydrocarbons (Fig. 4) in the shallowest sampling interval. Apparently, increased mean concentrations of all analyzed alkanes were found in the intervals 1.0–1.8 and 1.8–2.5 meters (Tab. 2, Fig. 4). Finally, it was assumed that the interval 1.0–1.8 meters is an optimum for geochemical survey.

In the Karlino area (Western Pomerania) similar decreasing trend was observed of statistical parameters for successive homologues of methane series with the increasing number of carbon atoms in a molecule for both selected depth horizons (1.2 and 1.8 meters) (Tab. 4). Such relationship may suggest the deep source of alkanes in both samples horizons. The lack of distinct disturbances in distribution patterns of methane and total alkanes C_2-C_4 collected from depth intervals 1.2 and 1.8 meters (Figs 5, 6) points to the representativeness of samples collected from these intervals. Median values of methane were higher at 1.2 meters depth in comparison with those from 1.8 meters depth and show statistically important differences (Tabs 1, 5). However, the higher maximum and mean concentrations of methane and total alkanes C_2-C_4 observed at 1.2 meters depth in comparison with those from 1.8 meters depth (Tab. 4, Fig. 7) indicate the influence of a deep component.

Taking into account all the obtained results, and considering the economy of field studies is proposed that 1.2 meters depth is an optimum for geochemical sampling with the "free" gas method on Wałbrzych Trough and Western Pomerania areas. Such studies must be passed in other perspective areas of Poland to confirm this depth of sampling.