

Rozpuszczone związki węgla organicznego wpływają na funkcjonowanie ekosystemów wodnych – na właściwości fizyczne i chemiczne wód i na ich organizmy [Górniak 1996; Szpakowska 1999]. W wodach powierzchniowych pochodzą one ze źródeł autochtonicznych i allochtonicznych. Ważną drogą zasilania zewnętrznego zbiorników w substancję organiczną jest jej dopływ ze zlewni lądowej ze spływem wód podziemnych. Wraz z rozpuszczonymi związkami węgla organicznego do wód powierzchniowych migrują różne składniki (w tym toksyczne), bowiem substancje humusowe łatwo tworzą z nimi połączenia kompleksowe [Szpakowska 1999].

Związki węgla organicznego w wodach podziemnych pochodzą z wód infiltracyjnych, wzbogaconych produktami przemian glebowej materii organicznej [Górniak 1996; Kalbitz i in. 2000]. Zasilanie rzek i jezior zachodzi głównie drogą spływu wód glebowo-gruntowych. Stąd badanie rozpuszczonej substancji organicznej w wodach podziemnych, zwłaszcza strefy przybrzeżnej zlewni jezior, może dostarczyć informacji o ich wpływie na substancję organiczną w wodach jezior.

Celem przeprowadzonych badań było określenie ilości i jakości rozpuszczonego węgla organicznego oraz sezonowej zmienności jego stężeń w płytkich wodach gruntowych terenu pól uprawnych i w wodach strefy litoralnej jeziora Piaseczno. Podjęto także próbę określenia wpływu wód podziemnych rolniczej części zlewni na ten składnik w wodach jeziora.

METODY

Badania przeprowadzono w zlewni mezotroficznego Jeziora Piaseczno na terenie Pojezierza Łęczyńsko-Włodawskiego. Zlewnia użytkowana rolniczo (grunty orne), bezpośrednio przylegająca do jeziora, stanowi znaczną jej część, tj. 24,3% powierzchni zlewni lądowej [Miształ i in. 1992]. Gleby pól uprawnych należą do rzędu gleb bielicoziemnych wytworzonych z piasków polodowcowych. Mają kwaśny odczyn, niską zawartość węgla organicznego i małą pojemność sorpcyjną [Miształ, Smal 1991].

Analizowano płytkie wody gruntowe pod polem uprawnym oraz wody jeziorne strefy litoralu, przyległego do zlewni rolniczej. Próbkę wód gruntowych pobierano ze studzienki pomiarowo-kontrolnej, zainstalowanej w odległości kilkunastu metrów od linii brzegowej jeziora, na granicy pól uprawnych i plaży oddzielającej je od zbiornika. Wody gruntowe i jeziorne pobierano przez siedem lat (1992–1998), łącznie w 25 terminach, w okresie wiosennym (IV, V), letnim (VI, VII) oraz jesiennym (IX, X).

Zawartość rozpuszczonego węgla organicznego (DOC) oznaczono w wodzie filtrowanej przez twardy sączeł (średnica porów 0,5–0,6 μm). Analizę jego składu jakościowego przeprowadzono według metody opisanej przez Misztala i Górniaka [1993], Górniaka [1996]. Próbkę wody o objętości 5–10 dm^3 zagęszczano w temp. do 40°C w kolbie przy użyciu wyparki próżniowej, odparowując ją do sucha przy ostatniej porcji. W suchym osadzie prowadzono ekstrakcję związków węgla roztworem NaOH o stężeniu 0,5 mol dm^{-3} (frakcja kwasów humusowych), po czym roztworem H_2SO_4 o stężeniu 0,5 mol dm^{-3} (węgiel hydrolizujący – hemicelulozy). Całkowitą zawartość rozpuszczonego węgla organicznego (DOC) w próbce wyjściowej i w otrzymanych po ekstrakcji wyciągach oznaczono metodą Tiurina w modyfikacji Simakowa. Zawartość C frakcji nieulegającej ekstrakcji, tzw. „pozostałości”, obliczono, odejmując od całkowitej ilości DOC zawartość C frakcji kwasów humusowych i C frakcji hemiceluloz.

WYNIKI

Stężenie DOC w badanych wodach gruntowych wynosiło średnio 11,3 mg C dm^{-3} , przy wahaniami od 5,3 do 37,2 mg C dm^{-3} (tab. 1). Podobne zawartości DOC w wodach gruntowych pod polami uprawnymi na glebach płowych wytworzonych z piasków i gliny zwałowej (5,0–38,0; średnio 13,6 mg C dm^{-3}) uzyskali Szpakowska i Życzyńska-Bałoniak [1996]. Otrzymane wyniki korespondują również ze stężeniem DOC w roztworach glebowych gleb lekkich poziomów skały macierzystej (18,0–44,8 mg C dm^{-3}), stwierdzonym przez Smal [1999].

Zawartość DOC w wodach jeziornych litoralu była mniejsza niż w wodach gruntowych (tab. 3) i średnio w okresie badań wynosiła 7,7 mg C dm^{-3} . Były to wartości zbliżone do danych Górniaka [1996] dla wód jezior mezotroficznych wschodniej Polski (6,77 mg C dm^{-3}). Niższe stężenia rozpuszczonych związków węgla w badanych wodach litoralu niż gruntowych mogą wynikać z ich rozcieńczenia po dopłynięciu do jeziora, z koagulacji i wytrącania do osadów, a także z rozkładu mikrobiologicznego [Cook, Allan 1992; Szpakowska 1999]. Warto dodać, że wody powierzchniowe i gruntowe terenów całkowicie rolniczych mogą wykazywać zależności odwrotne, tj. wyższe stężenia DOC w pierwszych w porównaniu z drugimi. Relacje takie obserwowała Szpakowska i Życzyńska-Bałoniak [1996], porównując wody stawu śródpolnego i rowu odwadniającego z wodami gruntowymi pod polami. Autorki wyjaśniają to wzbogaceniem wód stawu i rowu w substancje humusowe pochodzące z rozkładu zasiedlających je makrofitów.

Tabela 1. Stężenie i skład frakcyjny rozpuszczonego węgla organicznego (DOC) w badanych wodach

Table 1. The concentration and fractions of dissolved organic carbon (DOC) in the studied waters

Frakcja węgla Carbon fraction		Woda gruntowa Ground water				Woda jeziorna Lake water			
		okres badań study period n=25	wiosna spring n=7	lato summer n=10	jesień autumn n=8	okres badań study period n=25	wiosna spring n=8	lato summer n=9	jesień autumn n=8
DOC mg C dm ⁻³	min	5,3	5,4	5,4	5,3	4,2	4,2	4,8	6,0
	max	37,2	24,0	22,0	37,2	12,6	10,8	10,4	12,6
	\bar{x} ^a	11,3	10,0	11,3	12,5	7,7	7,2	7,4	8,5
	SD ^b	7,3	6,3	5,7	9,2	2,2	2,2	1,9	2,3
	V% ^c	65	63	50	74	29	31	26	27
Kwasy humusowe Humus acids mg C dm ⁻³	min	3,0	3,0	3,6	4,0	3,0	3,2	3,1	3,0
	max	10,1	9,0	10,1	10,0	5,6	4,7	5,0	5,6
	\bar{x}	6,0	5,3	5,8	6,9	4,2	4,0	4,1	4,4
	SD	2,1	1,9	2,1	2,0	0,7	0,6	0,7	0,8
	V%	35	36	36	29	17	15	17	18
Hemicelulozy Hemicelluloses mg C dm ⁻³	min	0,3	0,4	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
	max	1,7	1,6	1,0	1,7	0,8	0,8	0,7	0,8
	\bar{x}	0,7	0,7	0,6	0,8	0,6	0,5	0,6	0,6
	SD	0,4	0,4	0,2	0,4	0,1	0,1	0,1	0,2
	V%	57	57	33	50	17	20	17	33
Pozostałość Residue mg C dm ⁻³	min	0,1	0,4	0,4	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3
	max	25,5	13,4	13,2	25,5	8,7	5,5	5,1	8,7
	\bar{x}	4,6	3,9	4,9	4,9	2,8	2,7	2,4	3,4
	SD	5,7	4,3	4,5	7,4	2,2	2,2	1,7	2,4
	V%	124	110	92	151	79	81	71	71

^a Średnia Mean, ^b Odchylenie standardowe Standard deviation, ^c Współczynnik zmienności Variability coefficient

Wśród wydzielonych frakcji węgla, zarówno w wodach gruntowych jak i jeziornych, największe jego ilości w mg C dm⁻³ stwierdzono we frakcji kwasów humusowych, następnie frakcji „pozostałości”, natomiast najmniejsze we frakcji hemiceluloz. Takie prawidłowości w składzie grupowym DOC wód ekosystemów lądowych zaobserwował również Górniak [1996].

Podobnie do DOC, zawartość C wszystkich jego frakcji była większa w wodach gruntowych niż jeziornych. W okresie badań średnie stężenie C kwasów humusowych w wodach gruntowych wynosiło 6,0 mg C dm⁻³ i było znacznie większe niż w jeziornych (4,2 mg C dm⁻³), przy czym różnice te były istotne statystycznie (tab. 3). Jednak w odniesieniu do całkowitego stężenia DOC w próbce były to wartości bardzo podobne, wynosiły bowiem odpowiednio 62,48 i 61,65% (tab. 2). Procentowy udział węgla kwasów humusowych w całej puli rozpuszczonego węgla organicznego w wodach był zbliżony do danych

Górniaka [1996] (60,98%), natomiast niższy w porównaniu ze stwierdzonym w wodach gruntowych przez Szpakowską i Życzyńską-Bałoniak [1996] (średnio 70%), Szpakowską [1999] (85,2%) czy też Wallisa i in. [1981] (90%).

Związki węgla frakcji hemiceluloz występowały w badanych wodach w ilościach poniżej 2 mg C dm⁻³. Średnie ich stężenia w okresie badań w wodzie gruntowej wynosiły 0,7 i jeziornej 0,6 mg C dm⁻³, co stanowiło odpowiednio 7,29 i 7,90% DOC. Niewielki procentowy udział węgla tej frakcji w ogólnej ilości rozpuszczonego węgla organicznego wynika prawdopodobnie stąd, że jest on stosunkowo łatwodostępny dla mikroorganizmów i może być przez nie szybko rozkładany [Górniak 1996].

Badania wykazały duże wahania stężeń zarówno DOC, jak i jego frakcji, o czym świadczą wartości odchylenia standardowego i współczynniki zmienności (tab. 1). Większe wahania wyników wystąpiły w wodach gruntowych niż w jeziornych. Prawidłowość ta odnosiła się do wszystkich grup związków węgla jak i do pór roku. Najmniejszą zmienność stężeń w okresie badań wykazały kwasy humusowe (V równy 35 i 17% odpowiednio w wodach gruntowych i wodach litoralnych), natomiast największą – „pozostałość” (V równy odpowiednio 124 i 79%). Uzyskane rezultaty analizy statystycznej mogą świadczyć o stosunkowo dużej stabilności frakcji kwasów humusowych w badanych wodach.

Tabela 2. Udział frakcji węgla w stosunku do całkowitej zawartości DOC w badanych wodach
Table 2. Contribution of C fractions to total DOC concentration in the studied waters

Frakcja węgla Carbon fraction		Woda gruntowa Ground water				Woda jeziorna Lake water			
		okres badań study period	wiosna spring	lato summer	jesień autumn	okres badań study period	wiosna spring	lato summer	jesień autumn
Kwasy humusowe	min	23,49	47,12	23,46	52,42	27,38	35,00	37,14	27,38
	max	88,46	84,85	84,05	88,46	87,04	84,54	87,04	85,38
Humus acids	\bar{x}	62,48	61,42	57,12	70,42	61,65	64,01	61,18	59,82
	SD	16,96	14,53	20,40	13,09	18,24	19,83	18,91	18,53
% DOC	V%	27	24	36	19	30	31	31	31
Hemice-lulozy	min	3,00	3,98	3,00	3,85	3,56	3,56	4,05	3,87
	max	16,28	12,69	12,24	16,28	12,92	12,38	12,92	10,46
Hemice-lluloses	\bar{x}	7,27	7,59	5,79	8,86	7,90	8,46	8,16	7,05
	SD	3,49	2,72	2,99	4,34	2,89	3,27	3,14	2,41
% DOC	V%	48	36	52	49	37	39	38	34
Pozostałość	min	2,27	4,80	7,79	2,27	3,11	3,54	3,11	4,15
	max	72,96	47,59	72,96	40,91	68,75	61,44	53,33	68,75
Residue	\bar{x}	30,10	29,17	37,08	22,06	28,76	27,51	26,03	33,12
	SD	19,49	18,69	22,83	14,13	19,27	22,67	17,41	19,94
% DOC	V%	65	64	62	64	67	82	67	60

^{a, b, c} Objasnienia jak w tabeli 1 Explanations like in Table 1

Tabela 3. Różnice w zawartości węgla (mg C dm^{-3}) we frakcjach mierzone testem t-Studenta
 Table 3. Differences in the content of carbon (mg C dm^{-3}) in fractions measured with t-Student test

Porównywane wartości Compared values	Wartość t-testu Value of t-test
Zawartość C we frakcjach w wodach gruntowych z zawartością w wodach jeziornych (okres badań, n=25)	
DOC	2,517*
Kwasy humusowe	4,300*
Zawartość C we frakcjach w wodach gruntowych z zawartością w wodach jeziornych w sezonach	
Kwasy humusowe, sezon letni	2,436*
Kwasy humusowe, sezon jesienny	3,055*
Zawartość C we frakcjach w sezonach	
Wody gruntowe	ni ns
Wody jeziorne	ni ns

*Istotne dla $p < 0,05$ – Significant at $p < 0.05$; ni Różnice nieistotne – ns Not significant

Tabela 4. Współczynniki korelacji liniowej (R) między zawartością DOC i C w wydzielonych
 frakcjach w wodach jeziornych a ich zawartością w wodach gruntowych w mg C dm^{-3}
 Table 4. Linear correlation coefficients (R) between concentration of DOC and C fractions in lake
 waters and ground waters in mg C dm^{-3}

Frakcja C C fraction	DOC	Kwasy humusowe Humus acids	Hemicelulozy Hemicelluloses	Pozostałość Residue
DOC	0,70*			
Kwasy humusowe Humus acids		0,10		
Hemicelulozy Hemicelluloses			0,52*	
Pozostałość Residue				0,62*

* Significant at $p < 0.05$

Maksymalne stężenia DOC w wodach gruntowych i jeziornych wystąpiły jesienią (tab. 1). Także jego średnie stężenia w tym sezonie były nieco wyższe niż wiosną i latem, jednak różnice te były statystycznie nieistotne (tab. 3). W literaturze dane na temat sezonowej dynamiki stężeń DOC w wodach różnego rodzaju nie są jednoznaczne. Większość autorów taką zmienność obserwowała. Górniak [1996] stwierdził wahania stężeń substancji humusowych w wodach gruntowych w zależności od pory roku. Okres jesienno-zimowy charakteryzował się dużą zmiennością stężeń, co nawiązuje do zmiennego reżimu termicznego oraz wielkości opadów w tym okresie. Według danych autora najwyższe stężenia substancji humusowych w wodach gruntowych występowały w sezonie wiosennym

i wówczas w największym stopniu mogły one zasilać w nie wody powierzchniowe. Również Szpakowska [1999] odnotowała wysokie stężenia rozpuszczonych związków węgla w wodach gruntowych wiosną, podczas roztopów, a także po ulewnych deszczach. W drugim przypadku wzrost stężeń wystąpił z dwumiesięcznym opóźnieniem. Ponadto także jesień może być okresem najwyższych stężeń DOC w wodach, co wykazał Lundström [1993], badając przecieki lizymetryczne. Z kolei Dosskey i Bertsch [1997] analizując roztwory glebowe, wody lizymetryczne i wody gruntowe, nie stwierdzili w nich wyraźnej sezonowej dynamiki stężeń DOC. Autorzy zauważyli jedynie tendencję niższej zawartości tego składnika w okresie zimowym w porównaniu z pozostałymi.

Analiza statystyczna wyników wykazała istotną zależność między stężeniem DOC i C jego frakcji (z wyjątkiem kwasów humusowych) w wodzie jeziornej i w wodzie gruntowej (tab. 4). Może to świadczyć o wpływie rolniczej części zlewni i jej wód gruntowych na rozpuszczoną substancję organiczną w wodzie jeziora. O takim wpływie można również wnioskować ze zdecydowanie wyższej zawartości rozpuszczonego węgla organicznego w wodach gruntowych niż jeziornych oraz jego podobnego składu jakościowego w obydwu rodzajach wód. Ponadto, jak wykazały wcześniejsze badania wieloletnie [Miształ i in. 1992], prawie połowa rocznego dopływu podziemnego wód do jeziora Piaseczno pochodzi właśnie z terenów uprawnych zlewni.

WNIOSKI

1. Przeprowadzone badania wykazały, że stężenia DOC i C frakcji kwasów humusowych w wodach gruntowych pól uprawnych były wyższe (różnice statystycznie istotne) niż w wodach litoralu jeziora.

2. Nie stwierdzono różnic w składzie jakościowym rozpuszczonego węgla organicznego między analizowanymi wodami. Zarówno w wodach gruntowych, jak i jeziornych największą jego część stanowiły kwasy humusowe (ok. 60%), najmniejszą hemicelulozy (ok. 7–8%) i pośrednią (ok. 30%) „pozostałość”.

3. Znaczna zmienność stężeń DOC w wodach gruntowych w badanym okresie ($V=65\%$) i o połowę mniejsza w wodach litoralu świadczy o większej stabilności rozpuszczonej materii organicznej w wodach jeziora w porównaniu z płytkimi wodami podziemnymi.

4. Analiza statystyczna nie wykazała istotnego zróżnicowania stężeń DOC i C wydzielonych frakcji w wodach w zależności od pory roku. Zauważono jednak tendencję wyższych ich wartości w wodach jesienią w porównaniu z latem i wiosną.

5. Na podstawie uzyskanych wyników i wcześniejszych danych o udziale różnych części zlewni lądowej w całkowitym dopływie podziemnym wód do jeziora Piaseczno można przypuszczać, że płytkie wody gruntowe zlewni użytkowanej rolniczo mają znaczący wpływ na jakość i ilość związków rozpuszczonego węgla organicznego w jego wodach.

PIŚMIENNICTWO

- Cook B.D., Allan D.L. 1992. Dissolved organic carbon in old field soils: total amounts as a measure of available resources for soil mineralisation. *Soil Biol. Biotech.* 24, 6, 585–594.
- Dosskey M.G., Bertsch P. 1997. Transport of dissolved organic matter through a sandy forest soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 61, 920–927.
- Górniak A. 1996. Substancje humusowe i ich rola w funkcjonowaniu ekosystemów słodkowodnych. Rozprawa habilitacyjna, Dział Wydawnictw Filii Uniwersytetu Warszawskiego w Białymstoku, 1–151.
- Kalbitz K., Solinger S., Park J.H., Michalzik B., Matzner E. 2000. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils: a review. *Soil Sci.* 165, 4, 277–304.
- Lundström U. S. 1993. The role of organic acids in the soil solution chemistry of a podzolized soil. *J. Soil Sci.* 44, 121–133.
- Misztal M., Górniak A. 1993. Preliminary estimate of the organic substances of lake waters and bottom sediments. *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 25, 175–176.
- Misztal M., Smal H. 1991. Ocena dopływu wybranych pierwiastków do jezior z różnie zagospodarowanych części zlewni na tle warunków glebowych. *Studia ODF*, 19, 193–207.
- Misztal M., Smal H., Górniak A. 1992. Ground water inflow of nutrients to a lake from differently utilized catchments. *Wat. Res.* 26, 9, 1237–1242.
- Smal H. 1999. Właściwości chemiczne roztworów glebowych gleb lekkich i ich zmiany pod wpływem zakwaszenia. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Lublinie, 1–108.
- Szpakowska B. 1999. Występowanie i rola substancji organicznych rozpuszczonych w wodach powierzchniowych i gruntowych krajobrazu rolniczego. Rozprawa habilitacyjna, Wydawnictwo Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, Toruń, 1–110.
- Szpakowska B., Życzyńska-Bałoniak I. 1996. Migration of dissolved humic substances in agricultural landscape. *Polish J. Soil Sci.* 2, 139–147.
- Wallis P.M., Hynes H.B.N., Telang S.A. 1981. The importance of groundwater in the transportation of allochthonous dissolved organic matter to the streams draining a small mountain basin. *Hydrobiologia* 79, 1, 77–90.