

JERZY JONCZAK, KRZYSZTOF SZTABKOWSKI

Specjacja fosforu w leśnych glebach glejbielicowych terasy nadzalewowej Słupi

Phosphorus fractionation in forest Gleyic Podzols of the supra-flood terrace of the Słupia River

ABSTRACT

Jonczak J., Sztabkowski K. 2017. Specjacja fosforu w leśnych glebach glejbielicowych terasy nadzalewowej Słupi. Sylwan 161 (9): 772-780.

The studies focused on phosphorus speciation in Gleyic Podzols of the supra-flood terrace of the Słupia River, south from Słupsk (N Poland). The content and within profile distribution of phosphorus were considered in the context of parent material origin and the influence of podsolization, high groundwater level, forest vegetation and vicinity of the town. Four soil profiles representing Gleyic Albic Ortsteinic Podzols and Umbric Gleyic Albic Ortsteinic Podzols developed from aeolian sand were described. Samples were taken from distinguished horizons and physical and chemical properties were analyzed using standard procedures. Sequential extraction of phosphorus was performed by the method of Hedley et al. [1982]. The soils were characterized by strong acidic reaction, high abundance of organic matter and low degree of mineral substrates weathering. Profile distribution of free iron oxides was typical for Podzols. The content of total phosphorus in parent materials varied from 142.2 to 365.0 mg/kg, whereas in solum from 103.0 to 1035.6 mg/kg, reaching the highest values in B horizons and the lowest in E horizons. The noted concentration was high as compared to the soils of the same type within the area of Poland. Increased phosphorus concentration can be caused by the influence of high groundwater level and vicinity of the town, as a source of biogenic substances. The predominance of residual fraction in solum evidences young age of the studied soils, which is confirmed also by the results of thermoluminescence dating. Profile distribution patterns of total phosphorus and its fractions reflects the influence of groundwater, vegetation and soil-forming processes in turnover of this element. The results confirm also strong linkage between iron and phosphorus in the soils.

KEY WORDS

phosphorus, sequential extraction, podsolization, groundwater, human impact

ADDRESSES

Jerzy Jonczak ⁽¹⁾ – e-mail: jerzy.jonczak@gmail.com

Krzysztof Sztabkowski ⁽²⁾ – e-mail: K.Sztabkowski@ibles.waw.pl

⁽¹⁾ Katedra Nauk o Środowisku Glebowym, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Instytut Badawczy Leśnictwa; Sękocin Stary, ul. Braci Leśnej 3, 05-090 Raszyn

Wstęp

Gleby, jako strefy dynamicznego współdziałania litosfery, hydrosfery, atmosfery i biosfery, odgrywają kluczową rolę w obiegu pierwiastków w ekosystemach lądowych. Zawartość poszczególnych pierwiastków jest zróżnicowana przestrzennie i w czasie, odzwierciedlając pierwotne cechy materiałów macierzystych oraz ich przekształcenia postsedymentacyjne, w tym procesy glebotwórcze. Na tle pozostałych makroelementów udział fosforu w glebach jest zazwyczaj niewielki. W glebach leśnych jest on składnikiem deficytowym, silnie wpływającym na rozwój zbiorowisk roślinnych [Vincent i in. 2012], czego dowodzą czynne, oparte na produkcji fosfataz, mechanizmy pobierania, a także intensywne wycofywanie z organów asymilacyjnych przed ich zrzuceniem [Jonczak 2011]. W efekcie opad roślinny charakteryzuje się na ogół małą zasobnością w fosfor, nawet na siedliskach o wysokim trofizmie [Jonczak i in. 2016]. Niska koncentracja fosforu stanowi również czynnik ograniczający rozwój mikroorganizmów odpowiedzialnych za rozkład szczątków organicznych [Jonczak i in. 2015]. Fosfor w ekosystemach leśnych podlega intensywnemu obiegowi wewnętrznemu. Wyfukiwanie jego labilnych frakcji poza ryzosferę jest bardzo ograniczone, nie stwarza ryzyka eutrofizacji wód podziemnych i powierzchniowych [Parzych i in. 2016]. Problem ten jest natomiast powszechny w agrokosystemach, gdzie na przestrzeni ostatniego wieku stosowano nawożenie fosforem w dawkach często znacznie przewyższających zapotrzebowanie roślin uprawnych i możliwości retencyjne gleb [Sapek 2007].

Zawarty w glebach fosfor występuje zarówno w postaci związków mineralnych, jak i organicznych, w różnym stopniu powiązanych z pozostałymi komponentami gleb [Sharpley 1995; Missong i in. 2016]. Udział poszczególnych frakcji jest zróżnicowany czasoprzestrzennie, odzwierciedlając właściwości fizyczne i chemiczne gleb, w szczególności stopień zwiertzenia mineralnych substratów i zawartość wolnych półoratlenków [Darke, Walbridge 2000], zawartość i cechy jakościowe materii organicznej [Kodama, Schnitzer 1979], zawartość węglanów [Jonczak i in. 2015], odczyn [Devau i in. 2009; Achat i in. 2013], a także charakter gospodarki wodnej i uwilgotnienie gleb [Sah, Mikkelsen 1986; Wang i in. 1991] oraz różne przejawy antropopresji [Lauer i in. 2013]. Profilowe zróżnicowanie składu frakcyjnego fosforu odzwierciedla kierunki i stopień zaawansowania procesów pedogenicznych [Xiao i in. 1991; Łachacz, Szymkiewicz-Dąbrowska 2008], stanowiąc podstawę względnego datowania chronosekwencji gleb [Walker, Syers 1976; Turner i in. 2007]. Specjacja fosforu w badaniach nad genezą i ewolucją gleb może więc mieć podobną wartość interpretacyjną jak tlenki żelaza i glinu.

Celem prezentowanych w niniejszej pracy badań było określenie zawartości oraz schematów profilowego rozmieszczenia frakcji fosforu w glebach glejobielicowych terasy nadzalewowej Słupi w kontekście pochodzenia materiałów macierzystych oraz wpływu procesu bielicowania, płytko zalegających wód gruntowych, roślinności leśnej i sąsiedztwa miasta.

Materiał i metody

Badania przeprowadzono na niższej terasie nadzalewowej Słupi położonej w obrębie granic administracyjnych Słupska, w południowej jego części. Jest to teren o wysokości wynoszącej 17,5-20,5 m n.p.m., zbudowany z piasków fluwioglacjalnych o miąższości do 4 m [Florek 1989] i zalegających na nich miejscami płatów piasków eolicznych o miąższości nieprzekraczającej 2 m, których wiek termoluminescencyjny wynosi 4200-5100 lat BP. Piaski te miejscami przykryte są 20-30-centymetrowymi warstwami młodszych osadów eolicznych w wieku 200-400 lat [Jonczak i in. 2013]. W centralnej części terasy znajduje się zagłębienie terenu wypełnione osadami bagiennymi, które na początku XX wieku zostało częściowo odwodnione. Prace melioracyjne spowodowały

również obniżenie zwierciadła wód gruntowych w otoczeniu zagłębienia. Współcześnie niemal cały obszar terasy jest pokryty lasami o zróżnicowanym przestrzennie składzie gatunkowym, na ogół z dominacją sosny, z domieszkami dębu, brzozy i świerka. Typem siedliskowym lasu jest BMśw. W związku z wpływem Bałtyku warunki klimatyczne badanego obszaru są stosunkowo łagodne. Średnia roczna temperatura dla lat 1950-2007 wynosiła od 6,0 do 9,7°C (średnio 7,8°C), a roczne sumy opadów 521,7-1260,5 mm (średnio 793,8 mm) [Kirschenstein, Baranowski 2008].

Głównymi składnikami pokrywy glebowej badanej terasy są gleby rdzawe związane z piaskami fluwiogłacjalnymi oraz gleby glejbielicowe występujące w obrębie pokryw eolicznych. Badania nad specjacją fosforu przeprowadzono w czterech lokalizacjach gleb, które zaliczono do glejbielicowych orsztynowych (profile 1, 2, 3) i glejbielicowych murszastych (profil 4) [Systematyka... 2011], a według klasyfikacji WRB były to odpowiednio Gleyic Albic Ortsteinie Podzols i Umbric Gleyic Albic Ortsteinie Podzols [World... 2014]. W każdej lokalizacji wykonano odkrywkę, opisano morfologię gleb i pobrano próbki do analiz laboratoryjnych. Z wyróżnionych poziomów genetycznych pobrano po dwie próbki o strukturze nienaruszonej do pierścieni stałych o objętości 100 cm³ oraz próbkę o strukturze naruszonej o masie około 1 kg. Próbki o strukturze naruszonej po usunięciu fragmentów roślin i elementów obcych suszono w temperaturze 40°C i przesiano przez sito o średnicy oczka 2 mm celem usunięcia frakcji szkieletowej. Próbki z poziomów organicznych po usunięciu żywych fragmentów roślin suszono w temperaturze 65°C i mielono w młynku laboratoryjnym. Wykonano następujące oznaczenia:

- gęstość objętościową (S_o) w próbkach o nienaruszonej strukturze metodą suszarkowo-wagową,
- uziarnienie metodą pipetową i sitową, stosując podział na frakcje i grupy granulometryczne [Klasyfikacja... 2009],
- odczyn metodą potencjometryczną w zawiesinie z wodą (pH_{H_2O}), stosując proporcje wagowe gleba:woda 1:2,5,
- zawartość węgla organicznego (C_{org}) metodą Tiurina,
- zawartość azotu ogółem (N_t) metodą Kjeldahla,
- zawartość fosforu ogółem (P_t) metodą kolorymetryczną z molibdenianem amonu po mineralizacji próbek w mieszaninie 40% HF i 60% HClO₄,
- zawartość żelaza ogółem (Fe_t) metodą kolorymetryczną z o-fenantroliną po mineralizacji w mieszaninie kwasów 40% HF i 60% HClO₄ oraz jego wolnych tlenków (Fe_d) w wyciągu Jacksona [Mehra, Jackson 1960],
- sekwencyjną ekstrakcję fosforu metodą Hedleya i in. [1982] w modyfikacji O'Hallorana i in. [1987]. Na podstawie uzyskanych wyników obliczono zawartość głównych frakcji tego pierwiastka – rozpuszczalnej i wymiennej (P_w), organicznej labilnej (P_{ol}), organicznej stabilnej (P_{os}), związanej z półtoratlenkami (P_{Fe}), związanej z jonami Ca i apatytami (P_{Ca}) oraz rezydualnej (P_{rez}).

Wyniki i dyskusja

Badane gleby należą do średnio głębokich i głębokich, o miąższości solum 76-140 cm. Zbudowane są ze słabo i średnio wysortowanych eolicznych piasków luźnych średnioziarnistych o zawartości szkieletu rzadko przekraczającej 1%, zalegających na piaskach fluwiogłacjalnych (tab. 1). Charakteryzują się typową dla gleb piaszczystych gęstością objętościową, wynoszącą 1,19-1,57 g/cm³, z wartościami minimalnymi w poziomach próchnicznych. Ich odczyn mieści się w granicach od bardzo silnie kwaśnego do kwaśnego, z pH_{H_2O} od 3,5 do 4,7 w ektopróchnicy i od 3,8 do 5,8 w poziomach mineralnych. We wszystkich profilach wartość pH wzrastała z głębokością, odzwier-

Tabela 1.

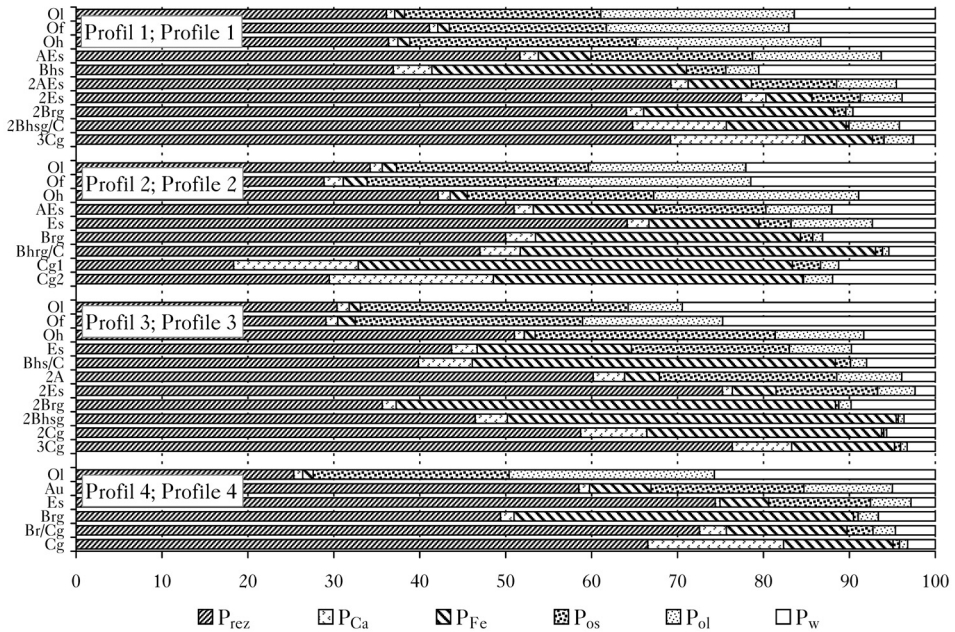
Wybrane właściwości fizyczne i chemiczne badanych gleb
Selected physical and chemical properties of the studied soils

Głębokość Depth [cm]	Gatunek gleby Textural group	So [g/cm ³]	pH- H ₂ O	C _{org.} [g/kg]	N _t [g/kg]	C:N	Fe _t [g/kg]	Fe _d [g/kg]	Fe _d /Fe _t
Profil 1 – Gleba glejbielicowa orsztynowa									
Profile 1 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol									
Ol	6-4		4,3	477,6	10,49	45,5	0,27		
Of	4-3		4,4	415,7	13,36	31,1	0,77		
Oh	3-0		3,8	274,5	11,50	23,9	2,21		
AEs	0-6	pl sr	1,26	3,8	23,5	1,40	16,7	2,35	0,94
Bhs	6-18	pl sr	1,47	4,3	7,2	0,37	19,2	3,13	1,25
2AEs	18-31	pl sr	1,37	4,1	35,2	1,03	34,3	1,00	0,56
2Es	31-40	pl sr	1,39	4,3	5,4	0,18	30,6	0,54	0,16
2Brg	40-58	pl sr	1,48	4,4	35,6	1,26	28,3	2,00	1,30
2Bhsg/C	58-92	pl sr	1,51	5,0	3,3	0,16	20,4	2,32	0,41
3Cg	92-130	pl gr	1,55	4,9			1,83	0,24	0,13
Profil 2 – Gleba glejbielicowa orsztynowa									
Profile 2 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol									
Ol	5-4		4,1	430,7	11,23	38,3	0,27		
Of	4-2		3,9	268,1	9,39	28,6	1,28		
Oh	2-0		3,5	327,4	12,94	25,3	1,94		
AEs	0-20	pl sr	1,37	4,0	30,9	0,95	32,7	1,42	0,61
Es	20-31	pl sr	1,47	4,3	6,8	0,19	35,9	1,19	0,31
Brg	31-39	pl sr	1,38	4,3	25,6	0,92	27,8	4,60	2,79
Bhrg/C	39-80	pl sr	1,38	4,8	4,4	0,24	18,6	3,91	1,55
Cg1	80-114	pl sr	1,49	4,9			2,42	0,36	0,15
Cg2	114-150	pl sr	1,49	5,0			2,17	0,13	0,06
Profil 3 – Gleba glejbielicowa orsztynowa									
Profile 3 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol									
Ol	12-10		4,6	463,7	14,08	32,9	0,36		
Of	10-3		3,9	348,2	13,74	25,3	1,57		
Oh	3-0		3,6	302,9	11,31	26,8	2,85		
Es	0-7	pl sr	1,39	4,0	16,6	1,03	16,0	3,42	1,56
Bhs/C	7-13	pl sr	1,45	4,9	1,7	0,14	12,0	2,91	0,65
2A	13-20	pl sr	1,19	4,0	77,0	1,70	45,2	1,55	0,99
2Es	20-32	pl sr	1,42	4,4	5,4	0,14	39,5	0,78	0,15
2Brg	32-51	pl sr	1,54	4,4	20,9	0,71	29,3	2,33	0,93
2Bhsg	51-76	pl sr	1,44	4,7	3,7	0,22	16,8	2,60	0,58
2Cg	76-123	pl sr	1,56	4,8			3,30	0,59	0,18
3Cg	123-150	pl sr	1,57	4,9			1,65	0,21	0,13
Profil 4 – Gleba glejbielicowa murszasta									
Profile 4 – Umbric Gleyic Albic Ortsteinic Podzol									
Ol	3-0		4,7	489,7	15,63	31,3	0,38		
Au	0-31	pl sr	1,21	4,0	32,3	1,07	30,3	1,62	0,91
Es	31-42	pl sr	1,32	4,8	5,2	0,19	27,1	0,83	0,11
Brg	42-73	pl sr	1,52	5,2	13,0	0,47	27,3	1,80	0,57
Br/Cg	73-140	pl sr	1,50	5,5	4,6	0,23	20,3	1,93	0,09
Cg	140-200	pl sr	1,52	5,8			3,15	0,25	0,08

ciędlając wpływ przemysłowej gospodarki wodnej oraz płytko zalegających wód gruntowych, których zwierciadło współcześnie występuje na głębokości około 1,5 m. Układ czynników środowiskowych sprzyjał akumulacji znacznych ilości materii organicznej w poziomach próchnicznych oraz wzbogacania (tab. 1). Zasobność gleb w azot jest zróżnicowana przestrzennie i w poszczególnych poziomach genetycznych, co znajduje odzwierciedlenie w zróżnicowaniu wartości stosunku C:N – od umiarkowanie szerokiego do bardzo szerokiego w ektopróchnicy i od umiarkowanie wąskiego do bardzo szerokiego w poziomach mineralnych. Badane gleby są mało zasobne w żelazo ogółem (0,27-4,60 g/kg), a jego wolne tlenki stanowią 5-61% tej puli. Profilowe rozmieszczenie wolnych tlenków jest typowe dla procesu bielnicowania.

Zmienność przestrzenna oraz schematy profilowego rozmieszczenia fosforu w glebach kształtowane są przez czynniki o charakterze lito-morfogenetycznym, warunkujące pierwotną zasobność materiałów macierzystych oraz procesy postsedymenacyjne, w szczególności glebotwórcze, prowadzące do ilościowej i jakościowej transformacji związków fosforu oraz ich przemieszczania [Czępińska-Kamińska 1992; Okołowicz i in. 2003; Łachacz, Szymkiewicz-Dąbrowska 2008; Lair i in. 2009]. Zawartość fosforu ogółem w materiałach macierzystych badanych gleb wynosiła od 142,2 do 365,0 mg/kg, zaś w solum od 103,0 do 1035,6 mg/kg, z wartościami minimalnymi w poziomach eluwalnych i maksimami w poziomach wzbogacania. Jest ona wysoka na tle notowanych przez Brożka i Zwydaka [2010] dla tego samego typu gleb na obszarze Polski. Relatywnie wysoka koncentracja może być efektem bardzo młodego wieku gleb, wpływu wód gruntowych oraz sąsiedztwa miasta jako obszarowego źródła zanieczyszczeń biogenych. Precyzyjne ustalenie roli poszczególnych czynników jest jednak trudne. Stosunkowo wysoką koncentrację P_e , wynoszącą od 616,4 do 1214,9 mg/kg, stwierdzono również w poziomach organicznych gleb. W tym przypadku uwarunkowana jest ona głównie wpływem współczesnej roślinności jako źródła opadu roślinnego. Koncentracja fosforu w glebach leśnych i związanej z nimi roślinności jest na ogół dodatnio skorelowana [Parzych i in. 2017]. Kilkukrotnie wyższa zawartość pierwiastka w poziomach organicznych badanych gleb na tle skał macierzystych dowodzi dużej roli roślinności leśnej w jego obiegu. Z kolei schematy profilowego rozmieszczenia fosforu w solum wskazują na przemieszczanie labilnych frakcji z filtrującymi wodami. Intensywność tego procesu jest uwarunkowana właściwościami fizycznymi i chemicznymi gleb, w szczególności odczynem oraz zawartością związków humusowych [Kodama, Schnitzer 1979; Pokojka 1979; Devau i in. 2009].

Pierwotnym źródłem zawartego w glebach fosforu są minerały. Nieodłącznie związane z rozwojem gleb ich wietrzenie prowadzi do stopniowego obniżania koncentracji oraz zasobów pierwiastka i zmian proporcji pomiędzy poszczególnymi jego frakcjami [Alexander, Robertson 1968; Walker, Syers 1976; Turner i in. 2007]. Duży udział fosforu rezydualnego (pierwotnego) jest charakterystyczny dla gleb słabo zaawansowanych w rozwoju, zbudowanych ze słabo zwietrzalnych materiałów macierzystych [Jonczak i in. 2015]. W badanych glebach udział tej frakcji w P_t wynosił 18,3-76,4% w skałach macierzystych, 35,6-77,4% P_t w solum i 25,3-51,0% w poziomach organicznych (ryc.). Stosunkowo mały udział P_{rez} w skałach macierzystych, nieidący w parze z niską wartością stosunku Fe_d/Fe_t (tab. 1), wskazuje na wpływ innego czynnika niż wietrzenie. Są to prawdopodobnie płytko zalegające, przepływające podpowierzchniowo z wysoczyzny w kierunku dna doliny Słupi wody gruntowe, zasilające gleby w labilne frakcje pierwiastka. W solum największym udziałem frakcji rezydualnej charakteryzują się poziomy eluwalne, zaś najmniejszym poziomy wzbogacania. Rozmieszczenie takie jest typowe dla procesu bielnicowania. W przypadku poziomów organicznych frakcję rezydualną stanowi w większości fosfor zawarty w huminach, które nie przechodzą do roztworu w żadnym z etapów sekwencyjnej ekstrakcji. Frakcja ta powinna więc być traktowana jako podfrakcja fosforu organicznego.



Ryc.

Profilowa zmienność udziału procentowego frakcji fosforu w ogólnej zawartości pierwiastka

Profile variability in contribution of phosphorus fractions as % of total content of the element

P_w – fosfor rozpuszczalny i wymienny; P_{Fe} – fosfor związany z tlenkami żelaza; P_{Ca} – fosfor związany z jonami wapnia i apatytami; P_{ol} – fosfor organiczny labilny; P_{os} – fosfor organiczny stabilny; P_{rez} – fosfor rezidualny

P_{ex} – soluble and exchangeable phosphorus; P_{Fe} – phosphorus bound to iron oxides; P_{Ca} – phosphorus bound to calcium and apatite; P_{ol} – labile organic phosphorus; P_{os} – stabile organic phosphorus; P_{rez} – residual phosphorus

Udział fosforu związanego z apatytami i jonami wapnia był niewielki: 6,9-19,1% P_t w skałach macierzystych i 0,6-10,9% P_t w solum, wykazując tendencję wzrostową z głębokością (ryc.). Niewielki udział tej frakcji należy wiązać z eolicznym pochodzeniem materiałów macierzystych i zakwaszającym wpływem roślinności leśnej z dominacją gatunków iglastych, sprzyjającym wietrzeniu apatytów oraz wypłukiwaniu wapnia i innych składników zasadowych [Augusto i in. 1998].

Dużym udziałem w ogólnej zawartości fosforu charakteryzowała się frakcja związana z półtoratlenkami. W solum stanowiła ona od 4,0 do 51,1% P_t , z minimum w poziomach eluwalnych i maksimum w poziomach wzbogacania. Schematy profilowego rozmieszczenia P_{Fe} dowodzą powiązania obiegu fosforu i żelaza. Zaskakująco duży udział P_{Fe} stwierdzono w skałach macierzystych (7,9-50,5% P_t), szczególnie w profilu nr 2 (ryc.), pomimo małego udziału wolnych tlenków Fe. Wskazuje to na większą trwałość połączeń P-Fe w głębszych partiach badanych gleb na tle solum. Czynnikiem różnicującym profilowo trwałość powiązań związków fosforu i wolnych tlenków Fe może być zawartość związków humusowych, które ograniczają powstawanie fosforanów żelaza [Kodama, Schnitzer 1979]. Generalnie jednak występujący w badanych glebach odczyn należy uznać za sprzyjający sorpcji fosforanów przez półtoratlenki [Darke, Walbridge 2000; Achat i in. 2013].

Udział fosforu organicznego wynosił od 0,4 do 55,1% P_t (ryc.), przy zawartości 1,3-584,1 mg/kg (tab. 2). Proporcje ilościowe pomiędzy fosforem organicznym labilnym i stabilnym w większości przypadków były wyrównane. Wysoki udział fosforu organicznego w poziomach próchnicznych jest typowy dla gleb leśnych, gdzie może on stanowić nawet do 80% P_t [Pakuła, Kalembsa

Tabela 2.

Zawartość [mg/kg] frakcji fosforu

Content [mg/kg] of phosphorus fractions

Głębokość Depth [cm]		P _w	P _{Fe}	P _{Ca}	P _{ol}	P _{os}	P _{rez}	P _t
Profil 1 – Gleba glejbielicowa orsztynowa Profile 1 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol								
Ol	6-4	122,0	8,5	7,2	167,3	169,8	268,4	743,4
Of	4-3	156,4	12,4	8,9	194,6	167,6	377,0	916,9
Oh	3-0	94,8	9,8	7,9	152,8	187,2	258,5	711,0
AEs	0-6	15,8	15,4	5,4	37,6	47,3	129,8	251,4
Bhs	6-18	80,0	115,4	17,5	14,9	17,9	143,9	389,6
2AEs	18-31	10,2	16,6	4,5	15,7	22,3	156,0	225,3
2Es	31-40	5,6	7,7	4,1	7,0	8,1	111,4	143,9
2Brg	40-58	82,1	189,1	17,4	7,1	12,1	547,9	855,7
2Bhsg/C	58-92	7,9	26,2	20,5	11,0	0,6	121,8	188,0
3Cg	92-130	4,8	14,6	29,0	6,3	2,5	128,1	185,2
Profil 2 – Gleba glejbielicowa orsztynowa Profile 2 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol								
Ol	5-4	184,2	14,0	11,8	153,0	186,4	285,8	835,2
Of	4-2	162,0	21,0	17,0	171,0	166,0	217,7	754,8
Oh	2-0	55,0	12,3	8,7	147,0	133,7	259,7	616,4
AEs	0-20	24,3	28,6	4,6	15,5	26,1	102,9	201,8
Es	20-31	10,6	18,5	3,7	13,7	5,4	92,8	144,7
Brg	31-39	135,9	319,4	35,9	11,9	14,7	517,8	1035,6
Bhrg/C	39-80	45,8	350,1	39,8	6,3	6,8	398,1	846,9
Cg1	80-114	33,4	150,1	43,1	6,3	9,7	54,5	297,1
Cg2	114-150	22,8	68,5	36,4	6,5	0,2	56,1	190,4
Profil 3 – Gleba glejbielicowa orsztynowa Profile 3 – Gleyic Albic Ortsteinic Podzol								
Ol	12-10	277,7	12,3	13,4	59,4	293,9	286,4	943,1
Of	10-3	198,6	16,4	11,1	130,9	212,3	233,3	802,5
Oh	3-0	53,2	8,1	7,4	65,8	178,3	325,6	638,3
Es	0-7	33,1	60,8	10,1	24,5	62,2	148,0	338,8
Bhs/C	7-13	32,6	172,2	25,6	7,7	7,2	162,3	407,5
2A	13-20	8,9	9,2	8,3	17,1	46,7	136,2	226,3
2Es	20-32	2,4	5,2	1,2	4,5	12,2	77,5	103,0
2Brg	32-51	57,5	299,7	9,5	8,4	2,2	208,9	586,1
2Bhsg	51-76	13,3	164,8	13,6	2,5	0,8	169,1	364,1
2Cg	76-123	20,7	99,7	28,1	1,2	0,9	214,3	365,0
3Cg	123-150	4,7	17,0	9,8	1,1	1,0	108,6	142,2
Profil 4 – Gleba glejbielicowa murszasta Profile 4 – Umbric Gleyic Albic Ortsteinic Podzol								
Ol	3-0	312,4	14,9	12,7	290,2	277,0	307,7	1214,9
Au	0-31	12,3	17,6	3,1	25,3	43,8	144,0	246,2
Es	31-42	3,4	6,9	0,7	5,8	14,4	90,7	121,9
Brg	42-73	33,8	201,3	8,0	12,0	2,8	251,7	509,6
Br/Cg	73-140	11,7	35,4	7,9	6,6	7,6	182,8	251,9
Cg	140-200	7,0	27,5	34,1	2,0	1,6	143,6	215,9

Oznaczenia jak na rycinie; denotes as in figure

2008]. Zawartość i udział w P_t fosforu organicznego w badanych glebach malały z głębokością, analogicznie do rozmieszczenia materii organicznej.

Sumaryczna zawartość fosforu rozpuszczalnego i wymiennego (P_w) wynosiła od 2,4 do 312,4 mg/kg, stanowiąc 2,4-29,4% P_t . Maksymalną koncentrację i udział tej frakcji notowano na ogół w ektopróchnicy. Wysoka koncentracja występowała również w poziomach wzbogacania. Stwierdzone ilości P_w są relatywnie wysokie, biorąc pod uwagę typ oraz rodzaj badanych gleb. Należy je wiązać przede wszystkim z wpływem wód gruntowych. Istotne znaczenie może mieć również fakt, że próbki gleb pobierane były do analiz na początku okresu wegetacyjnego.

Wnioski

- ✦ Zawartość fosforu w badanych glebach wynosiła od 616,4 do 1214,9 mg/kg w ektopróchnicy, od 103,0 do 1035,6 mg/kg w solum i od 142,2 do 365,0 mg/kg w skałach macierzystych. Są to relatywnie wysokie wartości na tle tego typu gleb leśnych Polski. Mogą one być efektem wpływu płytko zalegających wód gruntowych oraz sąsiedztwa miasta jako źródła substancji eutrofizujących.
- ✦ Stwierdzona w solum badanych gleb dominacja fosforu rezydualnego nad pozostałymi frakcjami jest typowa dla gleb młodych, pozostająca w zgodzie w wynikami datowań termoluminescencyjnych substratów mineralnych.
- ✦ Schematy profilowego rozmieszczenia poszczególnych frakcji fosforu wynikają z oddziaływania wód gruntowych, charakteru gospodarki wodnej oraz wpływu roślinności i procesu glebotwórczego bielicowania. Wody gruntowe przyczyniły się do wzbogacenia spągowej części gleb we frakcje labilne pierwiastka, zaś przemysłowy typ gospodarki wodnej skutkowało jego wypłukiwaniem w głąb gleb z poziomów powierzchniowych. Rola roślinności polega na przechwytywaniu pierwiastka z roztworu glebowego i jego przemieszczaniu na powierzchnię gleby jako składnika opadu roślinnego.
- ✦ Istotną rolę w obiegu fosforu w badanych glebach odgrywają wolne tlenki żelaza, będące efektywnym sorbentem jego labilnych frakcji.

Literatura

- Achat D. L., Bakker M. R., Augusto L., Derrien D., Gallegos N., Lashchinskiy N., Milin S., Nikitich P., Raudina T., Rusalimova O., Zeller B., Barsukov P. 2013. Phosphorus status of soils from contrasting forested ecosystems in southwestern Siberia: effects of microbiological and physicochemical properties. *Biogeosciences* 10: 733-752.
- Alexander T. G., Robertson J. A. 1968. Inorganic phosphorus forms in some Alberta soils as related to soil development, parent material and available phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science* 48: 289-295.
- Augusto L., Bonnaud P., Ranger J. 1998. Impact of forest tree species on soil acidification. *Forest Ecology and Management* 105: 67-78.
- Brożek S., Zwydak M. 2010. Atlas gleb leśnych Polski. CILP, Warszawa.
- Czępińska-Kamińska D. 1992. Wpływ procesów glebotwórczych na rozmieszczenie mineralnych związków fosforu w glebach. Wyd. SGGW, Warszawa.
- Darke A. K., Walbridge M. R. 2000. Al and Fe biogeochemistry in a floodplain forest: Implications for P retention. *Biogeochemistry* 51: 1-32.
- Devau N., Le Cadre E., Hinsinger P., Jaillard B., Gérard F. 2009. Soil pH controls the environmental availability of phosphorus: Experimental and mechanistic modelling approaches. *Applied Geochemistry* 24: 2163-2174.
- Florek W. 1989. Osady dna doliny Słupi i ich wiek radiowęglowy. *Zeszyty Naukowe AGH. Geologia* 15 (1-2): 73-102.
- Hedley M. J., Stewart J. W. B., Cauhan B. S. 1982. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and laboratory incubations. *Soil Science Society of American Journal* 46: 970-976.
- Jonczak J. 2011. Struktura, dynamika i właściwości opadu roślinnego w 110-letnim drzewostanie bukowym z domieszką sosny i świerka. *Sylvan* 155 (11): 760-768.
- Jonczak J. 2014. Rozkład liści buka w 120-letnim drzewostanie na obszarze Pomorza Środkowego. *Sylvan* 158 (8): 621-629.

- Jonczak J., Olejniczak M., Parzych A., Sobisz Z. 2016. Dynamics, structure and chemistry of litterfall in headwater riparian forest on the area of Middle Pomerania. *Journal of Elementology* 21 (2): 381-392.
- Jonczak J., Olszak I., Łazarczyk A. 2013. Geneza, ewolucja i właściwości gleb niższej terasy nadzalewowej Słupi w południowej części Słupska. W: Jonczak J., Florek W. [red.]. *Środowisko glebotwórcze i gleby dolin rzecznych*. Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań. 57-66.
- Jonczak J., Parzych A., Sobisz Z. 2015. Decomposition of four tree species leaf litters in headwater riparian forest. *Baltic Forestry* 21 (1): 133-143.
- Jonczak J., Šimanský V., Polláková N. 2015. Zawartość i profilowe rozmieszczenie frakcji fosforu w uprawnych i leśnych czarnoziemach z poziomem cambic. *Sylwan* 159 (11): 931-939.
- Kirschenstein M., Baranowski D. 2008. Wahania roczne i tendencje zmian opadów atmosferycznych i temperatury w Słupsku. *Dokumentacja Geograficzna* 37: 76-82.
- Klasyfikacja uziarnienia gleb i utworów mineralnych – PTG 2008. 2009. *Roczniki Gleboznawcze* 60 (2): 5-17.
- Kodama H., Schnitzer M. 1979. Effect of fulvic acid on the crystallization of Fe(III) oxides. *Geoderma* 19: 279-291.
- Lair G. J., Zehetner F., Khan Z. K., Gerzabek M. H. 2009. Phosphorus sorption-desorption in alluvial soils of a young weathering sequence at the Danube River. *Geoderma* 149: 39-44.
- Lauer F., Pätzold S., Gerlach R., Protze J., Willbold S., Amelung W. 2013. Phosphorus status in archaeological arable topsoil relicts – Is it possible to reconstruct conditions for prehistoric agriculture in Germany? *Geoderma* 207-208: 111-120.
- Łachacz A., Szymkiewicz-Dąbrowska D. 2008. Phosphate retention in semi-hydrogenic forest soils. *Polish Journal of Soil Science* 41 (1): 23-33.
- Mehra O., Jackson J. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clay and Clays Minerals* 5: 317-327.
- Missong A., Bol R., Willbold S., Siemens J., Klumpp E. 2016. Phosphorus forms in forest soil colloids as revealed by liquid-state ³¹P-NMR. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 179: 159-167.
- O'Halloran I. P., Steward J. W. B., Kachnoski R. G. 1987. Influence of texture and management practices on the forms and distribution of soil phosphorus. *Canadian Journal of Soil Science* 67: 147-163.
- Okołowicz M., Czępińska-Kamińska D., Janowska E., Konecka-Betley K. 2003. Rozmieszczenie fosforu w glebach rezerwatu biosfery „Puszcza Kampinowska”. *Roczniki Gleboznawcze* 54 (3): 39-48.
- Pakuła K., Kalembasa D. 2008. Frakcje fosforu w leśnych glebach płowych Niziny Południowopodlaskiej. *Roczniki Gleboznawcze* 59 (1): 161-166.
- Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z. 2016. Zmiany składu chemicznego wód w strumieniach śródleśnej niszy źródłiskowej w dolinie Kamiennej (Pomorze Środkowe). *Sylwan* 160 (10): 871-880.
- Parzych A., Jonczak J., Sobisz Z. 2017. Bioaccumulation of macronutrients in the herbaceous plants of mid-forest spring niches. *Baltic Forestry* 23 (2): 384-393.
- Pokojska U. 1979. Geochemiczne badania nad procesem bielcowania. Część III. Fosfor w procesie bielcowania. *Roczniki Gleboznawcze* 30 (2): 153-161.
- Sah R. N., Mikkelsen D. S. 1986. Sorption and bioavailability of phosphorus during the drainage period of flooded-drained soils. *Plant and Soil* 92: 265-278.
- Sapek A. 2007. Przyczyny zwiększania się zasobów fosforu w glebach Polski. *Roczniki Gleboznawcze* 58 (3/4): 110-118.
- Sharpley A. N. 1995. Soil phosphorus dynamics: agronomic and environmental impacts. *Ecological Engineering* 5: 261-279.
- Systematyka gleb Polski. 2011. *Roczniki Gleboznawcze – Soil Science Annual* 62 (3): 1-193.
- Turner B. L., Condon L. M., Richardson S. J., Peltzer D. A., Allison V. J. 2007. Soil organic phosphorus transformations during pedogenesis. *Ecosystems* 10: 1166-1188.
- Vincent A. G., Schleucher J., Gröbner G., Vestergren J., Persson P., Jansson M., Giesler R. 2012. Changes in organic phosphorus composition in boreal forest humus soils: the role of iron and aluminium. *Biogeochemistry* 108: 485-499.
- Walker T. W., Syers J. K. 1976. The fate of phosphorus during pedogenesis. *Geoderma* 15: 1-19.
- Wang H. D., Harris W. G., Yuan T. L. 1991. Noncrystalline phosphates in Florida phosphatic soils. *Soil Science Society of America Journal* 55: 665-669.
- World Reference Base for soil resources 2014. 2014. *World Soil Resources Report* 106. FAO, Rome.
- Xiao X. I., Anderson D. W., Bettany J. R. 1991. The effect of pedogenetic processes on the distribution of phosphorus, calcium and magnesium in Gray Luvisols. *Canadian Journal of Soil Science* 71: 397-410.