A R T Y K U Ł Y

PRZEGLĄD GEOGRAFICZNY
2009, 81, 1, s. 5–46

Zróżnicowanie borów sosnowych jako efekt uwarunkowań geograficznych i siedliskowych od Holandii do Irkucka (5°91'–104°8' E)

Differentiation of pine forests as an effect of geographical and habitat conditions from the Netherlands to Irkutsk (5°91'–104°8' E)

EWA ROO-ZIELIŃSKA, JERZY SOLON, MAREK DEGÓRSKI
Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN,
00-818 Warszawa, ul. Twarda 51/55;
e.roo@twarda.pan.pl j.solon@twarda.pan.pl m.degor@twarda.pan.pl

Zarys treści. W artykule przedstawiono zróżnicowanie wybranych charakterystyk dwóch podstawowych komponentów borów sosnowych: roślinności (składu gatunkowego, synuzjów, biomasy oraz wartości liczb wskaźnikowych) oraz gleb (dominujących procesów glebowych i właściwości gleb) w różnych skalach przestrzennych: od makrogeograficznej do lokalnej. Badaniami objęto 12 stanowisk (6 obiektów x 2 powierzchnie): po jednym w Holandii, Szwecji i Polsce oraz 3 w Rosji: Perm, St. Petersburg i Irkuck. W każdym obiekcie było jedno stanowisko znajdujące się w naturalnym zbiorowisku leśnym i jedno w zasięgu silnej antropopresji. Głównym celem badań była identyfikacja powiązań między cechami strukturalnymi zbiorowiska leśnego, jego charakterystykami ekologicznymi i cechami gleby. Otrzymane wyniki pozwalają wnioskować, że większość analizowanych charakterystyk zmienia się w trzech różnych płaszczyznach: geograficznej, lokalno-siedliskowej oraz oddziaływań antropogenicznych.

Słowa kluczowe: bory sosnowe, Europa, Rosja, zdjęcie fitosocjologiczne, cechy gleb, powiązania geograficzne.

Wstęp

Sosna zwyczajna jest jednym z ważniejszych gatunków lasotwórczych i domieszkowych w wielu typach zbiorowisk leśnych Eurazji. Z punktu widzenia klasyfikacji fitosocjologicznej (syntaksonomii) lasy z dominacją *Pinus sylvestris* zalicza się do klasy *Vaccinio-Piceetea* Br.-Bl. 1939. Ponadto sosna zwyczajna stosunkowo często występuje w zbiorowiskach leśnych i zaroślowych należących do klas: *Erico-Pinetea* Horvat 1959, *Querco-Fagetea* Br.-Bl. et Vlieg. 1937, *Quercetea robori-petraeae* Br.-Bl. et R.Tx. 1943 i kilku innych.

Klasa *Vaccinio-Piceetea* obejmuje holarktyczno-borealne acydofilne, oligo- i mezotroficzne zbiorowiska z przewagą szpilkowych gatunków drzew, krzewinek i mezofilnych mszaków. W Europie są to niżowe i górskie bory świerkowe, sosnowe i jodłowe, przeważająca część borów mieszanych oraz większość subalpejskich i subpolarnych zarośli i formacji krzewinkowych. W obrębie tej klasy bory sosnowe tworzą rząd *Cladonio-Vaccinietalia* Kiell.-Lund 1967. Należą tu zbiorowiska leśne z dominacją sosny i/lub gatunków brzozy w drzewostanie oraz runem trawiasto-krzewinkowym i mszystym, często ze znaczącym udziałem porostów.

Właściwe bory sosnowe z rzędu *Cladonio-Vaccinietalia* (pomijając bory mieszane sosnowo-dębowe) zróżnicowane są na kilka grup ekologicznych. W dużym uproszczeniu można je podzielić na bory suche, świeże, wilgotne i bagienne. Interesujące nas sosnowe bory świeże związane są z obszarami piaszczystymi, głównie równinami sandrowymi, formami eolicznymi i tarasami rzecznymi. Tylko w niewielu przypadkach spotyka się je na podłożu skalnym, np. na północy Skandynawii czy w Szkocji oraz w obszarach górskich, jak w Polsce np. w Górach Stołowych.

Można wyróżnić cztery główne europejskie regiony występowania sosnowych borów świeżych: (1) Skandynawia, (2) Europa Środkowo-Wschodnia aż po Ural, (3) Europa Północno-Zachodnia, (4) Europa Południowa. W Azji bory sosnowe związane są głównie ze strefą tajgi.

Ze względu na swoje szerokie rozprzestrzenienie i dużą elastyczność ekologiczną bory sosnowe (a głównie bory sosnowe świeże) są interesującym obiektem badań nad wpływem zróżnicowania klimatycznego i lokalnosiedliskowego na skład gatunkowy, różnorodność biologiczną i procesy produkcji-dekompozycji, szczególnie w kontekście przewidywanych zmian klimatycznych. Badania zróżnicowania struktury i funkcjonowania borów sosnowych w gradientach zmian klimatu (temperatury i stopnia kontynentalizmu) prowadzono przez wiele lat (1992–2002) w Zakładzie Geoekologii i Klimatologii IGiPZ PAN. Doczekały się one dużych opracowań: *Bory sosnowe w gradiencie kontynentalizmu i zanieczyszczeń w Europie Środkowej – badania geoekologiczne* (Breymeyer i Roo-Zielińska, red., 1998) oraz *Patterns of pine ecosystem response to climate on a boreal temperate transect* (Breymeyer i Reed, red., 2003). Omówione w nich prawidłowości reakcji borów sosnowych na zmiany klimatyczne – stopnia kontynentalizmu i temperatury w skali wieloprzestrzennej, a także wpływu zanieczyszczeń na lasy, pozwalają sądzić, że zbiorowiska należące do tego samego typu fitocenozy, przy zbliżonych warunkach siedliskowych (ten sam typ gleby i podłoża), ale różniących się położeniem geograficznym i oddziaływaniami antropogenicznymi, mogą być przedmiotem interesujących dociekań nad wykorzystaniem zbiorowisk leśnych (zwłaszcza strefowych) do badań w skali ponadregionalnej.

W ten nurt badań wpisuje się też poniższe opracowanie. Jego głównym celem jest identyfikacja powiązań między cechami strukturalnymi zbiorowiska leśnego, interpretowanymi charakterystykami ekologicznymi i cechami gleby w różnych skalach przestrzennych: od makrogeograficznej (na obszarze od Holandii do jez. Bajkał) do lokalnej (obejmującej wpływ miasta na sąsiadujące fitocenozy). Temu głównemu celowi podporządkowane są cele cząstkowe, tj. przedstawienie w dużej skali geograficznej zróżnicowania podstawowych charakterystyk borów sosnowych: (a) struktury warstwy runa (składu gatunkowego, synuzjów i biomasy), (b) dominujących procesów glebowych i właściwości gleb, (c) wartości wskaźnikowej (na podstawie ekologicznej skali Ellenberga). Uzyskane wyniki pozwolą odpowiedzieć na pytanie, jakie czynniki (geograficzne, lokalno-siedliskowe, czy antropogeniczne) mają decydujący wpływ na zmienność analizowanych charakterystyk ekosystemów leśnych.

Badania zostały zrealizowane w ramach VI Ramowego Projektu Unii Europejskiej e-LUP ("Simulating Land-Use Processes – an interactive e-tool for SIA"), w którym jako jeden z partnerów uczestniczy Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN.

Lokalizacja i opis stanowisk badawczych

Prace prowadzono na 6 obiektach, z których każdy składał się z pary powierzchni badawczych. Badaniami terenowymi objęto zatem łącznie 12 stanowisk borów sosnowych (6 obiektów x 2 powierzchnie badawcze); po dwa w Holandii, Szwecji oraz w Polsce i sześć w Rosji (Perm, St. Petersburg i Irkuck). W każdym obiekcie było stanowisko: (a) położone w naturalnym zbiorowisku leśnym boru sosnowego (naturalne, *background* – BG) oraz (b) w zasięgu oddziaływania silnej antropopresji (zurbanizowane, *suburban* – SU). Maksymalna odległość między obiektami wynosi ponad 6 tys. km z zachodu na wschód. W części europejskiej poszczególne obiekty dzieli od 800 do 1200 km. Największy dystans między obiektami w Rosji (Perm–Irkuck) wynosi około 3 tys. km. W każdym obiekcie dwa stanowiska dzieli od siebie od 45 km (Polska) do 185 km (St. Petersburg). Stanowiska zlokalizowane są w dwóch dużych strefach bioklimatycznych, tj. w strefie tajgi (2 powierzchnie w okolicach St. Petersburga, jedna w okolicy Permu i jedna w okolicy Irkucka) i w strefie lasów mieszanych (Szwecja, Holandia, Polska oraz jedna powierzchnia w Rosji – okolice Permu). Specyficzna pod względem biogeograficznym jest jedna „naturalna" powierzchnia koło Irkucka (Irkuck BG), zlokalizowana w południowosyberyjskim ekoregionie leśno-stepowym. Lokalizację stanowisk badawczych na tle regionów biogeograficznych (ekoregionów) przedstawiono na rycinie 1.

Wszystkie powierzchnie reprezentują drzewostany sosnowe, ale o bardzo różnym charakterze. Większość reprezentuje różnie wykształcone zbiorowiska borów sosnowych z klasy *Vaccinio-Piceetea*. Stanowiska holenderskie – to drze-

Ryc. 1. Lokalizacja punktów badawczych na tle ekoregionów (ekoregiony wg Olson i inni, 2001)
Location of the study sites against the ecoregions background (ecoregions after Olson et all., 2001)

wostany sosnowe na bardzo przekształconym siedlisku, które jedynie z trudem można umieścić w szeregu sukcesyjnym prowadzącym do lasów mieszanych z klasy *Querco robori-petreae*. Bardzo specyficzne jest stanowisko antropogenicznie przekształcone w okolicach Irkucka (Irkuck SU), którego skład florystyczny, struktura i fizjonomia silnie odbiega od zbiorowisk borowych. Jego położenie w systemie syntaksonomicznym jest trudne do określenia. W każdym obiekcie dwa stanowiska (czyli tzw. „czyste" – BG oraz „zanieczyszczone' – SU) różnią się pod względem nie tylko oddziaływań prowadzących do zróżnicowanego zanieczyszczenia, ale też pod względem zajmowanego siedliska (a w związku z tym – tendencji rozwojowych i optymalnego składu gatunkowego), w niektórych przypadkach również udziałem różnych form presji, oraz (formalnie w dwóch przypadkach) z punktu widzenia regionów biogeograficznych. Różnice te poważnie utrudniają wiarygodne porównania między stanowiskami w obrębie obiektu. Pod tym względem najmniejsze różnice występują w obrębie par zlokalizowanych w Polsce, w okolicach Permu i St. Petersburga (tab. 1; fot. 1 i 2).

Wszystkie badane gleby zakwalifikowano zgodnie z taksonomią WRB (1998; 2006) jako Haplic Podzols (bielicowe) i Dystric Arenosols (rdzawe). Budowa badanych profili glebowych i ich miąższość jest zróżnicowana. Największe miąższości solum gleby zanotowano we wschodniej części obszaru badań, zaś gleby najpłycej wykształcone – w Skandynawii, co uwarunkowane jest litym podłożem analizowanych gleb. Próchnica większości badanych gleb reprezentuje typ drosomodermor, z dwoma podpoziomami ektopróchnicy: surowinowym (Ol) i butwinowym (Of). Gleby stanowisk znajdujących się pod wpływem zanieczyszczeń SU (Holandia, Szwecja, Perm) charakteryzuje próchnica typu drosomor z poziomem organicznym zróżnicowanym na trzy podpoziomy: surowinowy (Ol), butwinowy (Of) i epihumusowy (Oh). Miąższość poziomu organicznego jest zróżnicowana przestrzennie, a największą (ponad 10 cm) odnotowano w glebach Holandii.

Badane pedony zostały wykształcone z piasków glacjofluwialnych, o uziarnieniu od piasków luźnych do piasków gliniastych lekkich, o zwiększonej zawartości frakcji pyłu w poziomach powierzchniowych, szczególnie na powierzchniach naturalnych (BG) Szwecji i St. Petersburga. Tylko gleby na powierzchniach w Irkucku (zarówno BG jak i SU) wykształciły się z deluwialnych osadów skał wulkanicznych, piasków oraz kambryjskich, ordowickich, sylurskich dolomitów i margli, o uziarnieniu glin lekkich pylastych i glin średnich.

Gleby wszystkich stanowisk badawczych cechują się kwaśnym odczynem, od bardzo kwaśnego (powierzchnie holenderskie i szwedzkie) do lekko kwaśnego (powierzchnie w Irkucku), a także przemywnym typem gospodarki wodnej i zróżnicowanym poziomem rozwoju procesu bielicowania. Jednym z kryteriów charakteryzujących proces bielicowania jest zawartość amorficznego żelaza i glinu w poziomie wzbogacania. Suma amorficznego glinu (Al_o) i 1/2 amor-

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki stanowisk badawczych

Basic characteristics of study sites

Nazwa stanowiska	Holandia BG Ysselsteyn	Holandia SU Vollenhove	Szwecja BG Gårdsjön	Szwecja SU Göteborg	Polska BG Browsk	Polska SU Białystok	St. Petersburg BG Ladoga	St. Petersburg SU Sosnovka	Perm BG Zakanskij	Perm SU Očanskij	Irkuck BG Gačanji	Irkuck SU Rabočie
Długość geogr.	5,914	5,220	12,019	12,020	23,620	23,165	33,602	30,358	55,208	56,278	104,818	104,359
Szerokość geogr.	51,500	52,105	58,549	57,751	52,919	53,169	60,475	60,020	57,832	58,066	53,127	52,305
Ekoregion*	PA0402		PA0436		PA0412		PA0608		PA0608	PA0436	PA0817	PA0601
Roślinność potencjalna	*Quercetea robori-petreae*		*Vaccinio-Piceetea*		*Vaccinio-Piceetea*		*Vaccinio-Piceetea*		*Vaccinio-Piceetea*		*Vaccinio-Piceetea* (?)	???
Nachylenie (°)	–	–	–	5	–	–	–	–	–	faliste	3	8
Ekspozycja	–	–	–	E	–	–	–	–	–	–	SW	N
Wiek sosny	40–50	50–60	60–80	60–80	80–90	80–90	80–100	80	50–60	60–80	40–60	80
Pokrycie A	70	60	50	60	40	45	60	70	70	70	70	60
Pokrycie B	30	30	20	20	20	30	5	40	20	30	5	20
Pokrycie C	70	95	80	90	70	70	60	80	70	40	20	100
Pokrycie D	20	90	90	50	80	90	95	20	90	90	50	10
Liczba gatunków warstwy runa	5	5	8	17	18	25	20	20	28	14	39	41
Różnice w:	siedlisku		siedlisku		siedlisku		siedlisku poziomie antropo-presji (wydepty-wanie)		ekoregionie siedlisku poziomie antropo-presji (wydepty-wanie)		ekoregionie siedlisku stadium regeneracji	

* PA0402 – atlantycki obszar lasów mieszanych; PA0436 – sarmacki obszar lasów mieszanych; PA0412 – środkowoeuropejski obszar lasów mieszanych; PA0608 – tajga skandynawska i rosyjska; PA0817 – południowosyberyjski obszar leśno-stepowy; PA0601 – tajga wschodniosyberyjska.

Holandia
Holland

Szwecja
Sweden

Polska
Poland

Fot. 1. Stanowiska badawcze w Holandii, Szwecji i Polsce
BG – naturalne, SU – antropogenicznie przekształcone

Study sites in Holland, Sweden and Poland
BG – background, natural; SU – suburban, anthropogenically transformed

St. Petersburg
St. Petersburg

Perm
Perm

Irkuck
Irkutsk

Fot. 2. Stanowiska badawcze w Rosji
BG – naturalne, SU – antropogenicznie przekształcone

Study sites in Holland, Sweden and Poland
BG – background, natural; SU – suburban, anthropogenically transformed

ficznego żelaza (Fe_o) w poziomie diagnostycznym spodic waha się od 0,25% na stanowisku naturalnym w Holandii (BG) do 1,08% masy gleby na powierzchni antropogenicznie przekształconej w Szwecji (SU), co wskazuje, że część badanych gleb nie spełnia kryterium wykształconych gleb bielicowych (WRB, 1998, 2006).

Materiał i metody

Roślinność

Podstawą opisu 12 stanowisk badawczych była charakterystyka florystyczna płatu roślinnego zapisana w postaci zdjęcia fitosocjologicznego. Zawiera ono podstawowe informacje o konkretnym płacie roślinności:

1) skład gatunkowy,
2) pokrywanie (tj. udział powierzchniowy poszczególnych gatunków),
3) warstwowość (strukturalna cecha zbiorowiska dotycząca jego pionowej budowy, najczęściej wyróżniane są warstwy: drzew – A, krzewów – B; runa – C, warstwy przyziemnej – mchów i porostów – D.

Każde zdjęcie wykonano na powierzchni około 400 m^2. Ilościowość gatunków (pokrywanie) oszacowano w zmodyfikowanej skali 12-stopniowej, w której r, +, 1 oznaczają odpowiednio 0,1, 0,5 do 10%. Pozostałe wartości od 2 do 10 – to kolejne przedziały dziesięcioprocentowe.

Zróżnicowanie struktury runa

Podstawą opisu struktury synuzjalnej runa powierzchni badawczych było kartowanie terenowe w obrębie powierzchni najbardziej typowych dla każdego z 12 stanowisk. Dla większości stanowisk była to powierzchnia kwadratowa 11 x 11 m, a tylko dla dwóch – naturalnych stanowisk Holandii i Szwecji – ze względu na ukształtowanie, były to powierzchnie prostokątne 12 x 4 m. Następnie wykonano spisy florystyczne w obrębie poszczególnych synuzjów[1] na powierzchni podstawowej 4 m^2. Ilościowość gatunków (pokrywanie) była oszacowana w tej samej skali jak w przypadku pełnego zdjęcia fitosocjologicznego. Spisy te były podstawą do wyróżnienia typów synuzjów.

Zróżnicowanie biomasy

W celu określenia biomasy krzewów, runa, ściółki i humusu, na każdym stanowisku wyznaczono powierzchnie o wymiarach 11 x 11 m. Biomasę krzewów określano w sposób pośredni – mierzono wszystkie osobniki krzewów występujące na powierzchni podstawowej 121 m^2. Brane były pod uwagę te osobniki,

[1] Termin „synuzjum" oznacza grupowanie w obrębie jednej warstwy zbiorowiska leśnego gatunków roślin o podobnej formie życiowej i zbliżonych wymaganiach ekologicznych. Termin ten jest czasem stosowany w literaturze na określenie podstawowej przestrzennej i funkcjonalnej jednostki w obrębie fitocenozy (Mavriščev, 1980; Gillet, 1986; Julve i Millet, 1994).

których średnica pędu na poziomie gruntu przekraczała 4 mm (mniejsze traktowano jako składniki warstwy runa). Suchą biomasę krzewów określano na podstawie równań regresji zawartych w bazie danych BIOPAK (Means i inni, 1996). W przypadku, gdy w bazie danych BIOPAK nie podano równania zależności dla danego gatunku krzewu, zastosowano równanie odpowiadające gatunkowi o zbliżonej budowie morfologicznej.

W obrębie wytyczonych 121 m^2 powierzchni wybrano 12 miejsc, w których pobrano próby biomasy warstwy runa, ściółki i humusu. Próby pobierano w środku 1-metrowych kwadratów za pomocą dwóch próbników: kółka o powierzchni 0,1 m^2 (w przypadku biomasy części żywych roślin) i metalowego cylindra otwartego z dwóch stron o powierzchni przekroju 200 cm^2. Cylinder wwiercano w glebę do głębokości 25 cm od poziomu AO gleby. Pobrane próby biomasy żywej i martwej były następnie dzielone na sześć frakcji:
– biomasa krzewinek,
– biomasa pozostałych roślin naczyniowych,
– biomasa mchów i porostów,
– masa ściółki,
– masa humusu (zawierająca nie tylko właściwy humus, lecz także korzenie i inne podziemne części roślin).

Następnie oczyszczone frakcje były suszone do stałej wagi w temperaturze 90°C i ważone z dokładnością do 0,01 g. Wyniki przeliczono na wartości w g m^{-2}.

Ekologiczne skale liczb wskaźnikowych

Następnym etapem opisu stanowisk badawczych jest zastosowanie gatunków roślin jako indykatorów warunków siedliskowych (Diekmann, 2003; Schaffers i Sykora, 2000, Roo-Zielińska, 2004). Teoretyczne i metodologiczne podstawy do oceny warunków środowiska fizycznogeograficznego z zastosowaniem wartości liczb wskaźnikowych ustanowił H. Ellenberg (Ellenberg i inni, 1991; Lindacher, red., 1995). Liczby wskaźnikowe Ellenberga były stosowane do oceny wybranych komponentów środowiska przyrodniczego stanowisk badawczych na podstawie zdjęć fitosocjologicznych. Na tej podstawie oceniono wymagania gatunków roślin naczyniowych warstwy runa względem: intensywności światła (L), stopnia kontynentalizmu (K), wilgotności gleby (F), jej kwasowości (R) i zawartości azotu (N). Te wymagania ekologiczne szacowano według 9-stopniowej skali odpowiadającej wzrostowi natężenia danego czynnika:
– od L1 – gatunków roślin wymagających pełnego cienia do L9 – wymagających pełnego światła (niezdolnych do przetrwania w cieniu);
– od K1 – gatunków euoceanicznych do K9 – gatunków eukontynentalnych;
– od F1 wymagających skrajnie suchych gleb do F9 wymagających gleb mokrych;
– od R1 wymagających gleb silnie kwaśnych (pH<3,5) do R9 – wymagających gleb obojętnych i zasadowych (pH>6,5);

– od N1 – gatunków wskaźnikowych gleb skrajnie ubogich w mineralne związki azotowe do N9 – gatunków gleb zasobnych w azot (np. silnie nawożonych).

Na podstawie udziału powierzchniowego gatunków roślin naczyniowych runa dla każdego płatu roślinnego na 12 stanowiskach była określona wartość średniej ważonej „liczby ekologicznej" Ellenberga.

Gleby

Materiał glebowy pobierano jako próby mieszane z każdego poziomu genetycznego gleb, z trzech punktów w każdym z 12 stanowisk badawczych wytypowanych do badań szczegółowych. Dla każdego profilu oznaczono cechy morfologiczne gleb, m.in. miąższość poziomów gleby jako średnią arytmetyczną z 10 pomiarów oraz dokonano klasyfikacji pedonów zgodnie z obowiązującą w Polsce systematyką gleb (*Systematyka...,* 1989) i klasyfikacją WRB (1998, 2006).

Następnie z każdego poziomu genetycznego pobierano materiał do dalszych oznaczeń laboratoryjnych. Na ich podstawie określono następujące właściwości:

– uziarnienie (UZ), metodą sit oraz areometryczną Bouyoucosa w modyfikacji Casagrande'a i Prószyńskiego,
– gęstość objętościową (GO) w próbkach o nienaruszonej strukturze pobranych do stalowych pierścieni o objętości 100 cm^3 z poziomów mineralnych i 10 cm^3 z poziomów organicznych,
– polową pojemność wodną (PPW) metodą Kaczyńskiego w modyfikacji Królowej,
– maksymalną kapilarną pojemność wodną (KPW max) metodą Kaczyńskiego w modyfikacji Królowej,
– maksymalną higroskopijność (MH) metodą Nikołajewa,
– zawartość węgla organicznego (CO) w poziomach ektopróchnicy metodą Altena, w poziomach mineralnych zmodyfikowaną metodą Tiurina,
– węgiel organiczny po ekstrakcji pirofosforanem sodu (C_p) za pomocą automatycznego analizatora węgla SHIMADZU,
– azot ogólny (NT) zmodyfikowaną metodą Kjeldahla,
– kationy wymienne: (K^+, Na^+) – metodą płomieniowej absorpcyjnej spektrometrii atomowej FAAS, (Ca^{2+}, Mg^{2+}) metodą emisyjnej spektrometrii atomowej z plazmą, po ekstrakcji prób 1 M octanem amonowym o pH 6,8,
– kwasowość hydrolityczną (H_h) metodą Kappena,
– glin wymienny (Al^{3+}) i kwasowość wymienną (H_w), metodą Sokołowa,
– żelazo (Fe_p), glin (Al_p) i węgiel (C_p) związane w kompleksach próchnicy z półtoratlenkami, w wyciągu 0,1 M pirofosforanu sodu metodą McKeague (1981),
– całkowitą zawartość żelaza (Fe_t) i glinu (Al_t) po roztworzeniu próbek mieszaniną kwasu fluorowodorowego i nadchlorowego,
– żelazo amorficzne (Fe_o) i glin amorficzny (Al_o) w wyciągu szczawianowym Tamma (Van Reeuwijk, 1995),

– wolne żelazo (Fe_d) w wyciągu cytrynianowym z dithionitem sodu jako środkiem redukującym metodą Mehra i Jacksona (1960),
– gęstość objętościową węgla organicznego (D_C) i zapas węgla (M_C) zgodnie z metodyką Liski, Westman (1995), gdzie $D_C = C_{org}$ x Go z uwzględnieniem poprawki na zawartość frakcji szkieletowej (>1mm), zaś $M_C = 1m^2 \sum D_C$ każdego poziomu genetycznego,
– sumę zasadowych kationów wymiennych (S) jako sumę Ca^{++}, Mg^{++}, K^+, Na^+;
– pojemność kompleksu sorpcyjnego (Th) jako H_h + S,
– stopień wysycenia gleb kationami o charakterze zasadowym (V) jako S/T x 100%;
– wskaźnik elastyczności gleb (*Ui*), jako $\sum Ca^{2+}Mg^{2+} \cdot T^{-1}$ (Ulrich i inni, 1984).

Otrzymane wyniki posłużyły do opracowania charakterystyk fizyczno-chemicznych badanych gleb i określenia ich geograficznego zróżnicowania. Na podstawie uzyskanych rezultatów obliczono różnice między wielkością cech glebowych pedonów położonych w obszarach miejskich (SU) i względnie naturalnych (BG). Do tego celu wykorzystano analizę skupień. Jako miarę niepodobieństwa zastosowano odległość Euklidesa, zaś do grupowania – metodę Warda.

Analiza statystyczna

Analiza statystyczna zebranych danych obejmowała jedynie najprostsze procedury, w tym obliczenia wartości średnich i odchyleń standardowych oraz ocenę związków między zmiennymi za pomocą modeli regresji. Przy obliczeniach wykorzystano programy Excel oraz CurveExpert 1.3.

Wyniki

Zróżnicowanie warstwy runa

Struktura synuzjów

Stopień zróżnicowania warstwy runa jest jedną z ważniejszych strukturalnych charakterystyk fitocenoz leśnych. Z jednej strony wpływ na nie ma przestrzenne zróżnicowanie rozmaitych procesów, takich jak produkcja i dekompozycja materii organicznej, z drugiej strony zaś może być ono wskaźnikiem mikrozróżnicowania siedliska (szczególnie wówczas, gdy dotyczy to topografii, dostawy składników odżywczych, a także topoklimatu). Jednym ze sposobów opisu zróżnicowania dna lasu jest identyfikacja, analiza i typologia synuzjów.

Na podstawie gatunków dominujących, form życiowych i stopnia pokrycia terenu roślinnością wyróżniono 10 głównych typów synuzjów (tab. 2).

Pierwszy typ obejmuje synuzja mszyste z dominacją mchu rokietnika pospolitego (*Pleurozium schreberi*). Ten typ pojawiał się najczęściej i był charakterystyczny dla pięciu stanowisk badawczych. W obrębie tego typu wyróżniono podtyp z przewagą mchów-torfowców z rodzaju *Sphagnum* występujący lokalnie

Tabela 2. Typy synuzjów na stanowiskach badawczych

Types of synusiae of study sites

Skrót nazwy stanowiska	Szwe SU_C	Pol SU_C	Irkuck BG_A	Perm BG_A	Szwe BG_A	Pol SU_B	Szwe SU_A	Szwe BG_C	Perm BG_B	Szwe BG_B	Pol BG_B	Pol BG_A	Perm BG_C	Szwe SU_D	Perm SU_B	Pol BG_C	Szwe SU_B	Perm SU_A	Pol SU_A	Hol BG_B	Hol BG_A	Perm SU_C	Perm SU_D	Irkuck BG_B
Typy synuzjów	z dominacją mchów					*Vaccinium myrtillus* – mchy					*Vaccinium* – mchy	*Vaccinium vitis-idaea* – mchy					*Deschampsia* – mchy	*Calamagrostis* – mchy	*Festuca* – mchy	dominacja paproci	dominacja *Ceratocapnos*	luźna pokrywa roślinna		
Rośliny naczyniowe (% pow.)	10	10	5	20	5	50	95	80	80	90	80	70	70	95	50	80	85	60	40	90	20	40	20	10
Mchy i porosty (% pow.)	80	100	95	80	60	70	50	90	90	90	90	90	20	40	90	90	70	90	30	+	10	40	20	10
Brak roślin (% pow.)	10	0	5	10	30	2	0	5	0	10	20	20	20	5	0	30	0	0	30	10	70	60	70	80
Entodon schreberii	2	8	5	7	5	7	3	3	7	5	8	8	1	2	7	7	3	1	3		+	1	1	+
Inne mchy	6	2	5	1	2	1	2	2	2	4	1	1	2	2	3	1	4	9	+	+	1	2	1	+
Sphagnum girgensohnii								5																
Melampyrum pratense		+			+	+			1		+	+	+			+	2		+					
Vaccinium myrtillus				1	+	4	8	7	6	7	4													
Vaccinium vitis-idaea				1	+			1	2	2	4	7	7	8	5	5	+	2				1	2	
Calluna vulgaris																2								
Deschampsia flexuosa	1						2							2			8			+	+			
Trientalis europaea																	2							
Calamagrostis arundinacea													+					4				+		
Festuca ovina		1												+		1			2					
Dryopteris dilatata																				9				
Ceratocapnos claviculata																					2			
Sieglingia decumbens		+				+																		
Calamagrostis sp.			1																					+
Achillea sp.			+																					+
Vicia sp.			+																					
Luzula pilosa				+																				
Agrostis tenuis						+																		
Hieracium pilosella						1													+					
Solidago virgaurea																			+					
Chamaecytisus ruthenicus																						+		
Polygonatum odoratum																						1		
Pirola rotundifolia																								+
Orthilla secunda																								1

w miejscach wilgotnych. Typ drugi obejmuje synuzja ze współdominacją mchów i borówki czarnej (*Vaccinium myrtillus*). Trzeci typ charakteryzuje dominacja mchów, borówki czarnej *(Vaccinium myrtillus)* i borówki brusznicy (*Vaccinium vitis-idaea*). W czwartym typie współdominują mchy i borówka brusznica (*Vaccinium vitis-idaea*) oraz wymienione już typy w miejscach lokalnie suchszych. Następne trzy typy obejmują synuzja zdominowane przez trawy przede wszystkim takie ich gatunki jak: śmiałek pogięty (*Deschampsia flexuosa),* trzcinnik leśny (*Calamagrostis arundinacea*) i kostrzewa owcza (*Festuca ovina*). Następne dwa typy występują tylko na stanowiskach holenderskich; są one zdominowane przez różne gatunki paproci lub przez kokorycz (*Ceratocapnos claviculata*). Ostatni typ synuzjum wyróżnia się luźną pokrywą roślinną, zajmującą nie więcej niż 40% powierzchni.

Poszczególne stanowiska badawcze różnią się wyraźnie pod względem typów synuzjów i ich rozmieszczenia (tab. 3). Na czterech powierzchniach zróżnicowanie warstw runa i przyziemnej (mchów) jest tak niewielkie, że nie było możliwe wyróżnienie oddzielnych typów synuzjów. Na kartowanych 121 m^2 fragmentach powierzchni występowało 2–4 typów synuzjów tworzących od 3 do 7 indywidualnych płatów.

Tabela 3. Zróżnicowanie typów synuzjów na stanowiskach badawczych
Differentiation of synusiae types within the study sites

Nazwa stanowiska	Typy synuzjów (% zajętej powierzchni)									
	z dominacją mchów	*Vaccinium myrtillus* – mchy	*Vaccinium* – mchy	*Vaccinium vitis-idaea* – mchy	*Deschampsia* – mchy	*Calamagrostis* – mchy	*Festuca* – mchy	z dominacją paproci	z *Ceratocapnos*	luźna pokrywa roślinna
Holandia BG								60	40	
Holandia SU	brak zróżnicowania synuzjalnego									
Szwecja BG	20	80								
Szwecja SU	2	18		6	74					
Polska BG			36	64						
Polska SU	20	60					20			
St. Petersburg BG	brak zróżnicowania synuzjalnego									
St. Petersburg SU	brak zróżnicowania synuzjalnego									
Perm BG	27	20		53						
Perm SU				45		36				19
Irkuck BG	62									38
Irkuck SU	brak zróżnicowania synuzjalnego									

Zróżnicowanie poziome runa powierzchni badawczych mieści się w ramach ogólnego zróżnicowania lasów z drzewostanem sosnowym w znacznej części Europy (Roo-Zielinska i Solon, 1997; 1998a; Solon i Roo-Zielińska, 1998). Najbardziej typowe pod tym względem są powierzchnie zlokalizowane w Szwecji, Polsce i okolicach Permu. W tej grupie mieszczą się też powierzchnie w okolicach St. Petersburga: Peter BG odpowiada synuzjum *Vaccinium vitis-idaea* – typ mszysty, natomiast Peter SU – synuzjum *Vaccinium myrtillus* – typ mszysty. Największa specyfika i odmienność (pod względem zarówno struktury poziomej jak i całego składu florystycznego) charakteryzuje dwie powierzchnie krańcowe, tzn. „naturalne" (BG) stanowisko holenderskie i antropogenicznie przekształcone stanowisko syberyjskie (Irkuck SU) – tabela 3.

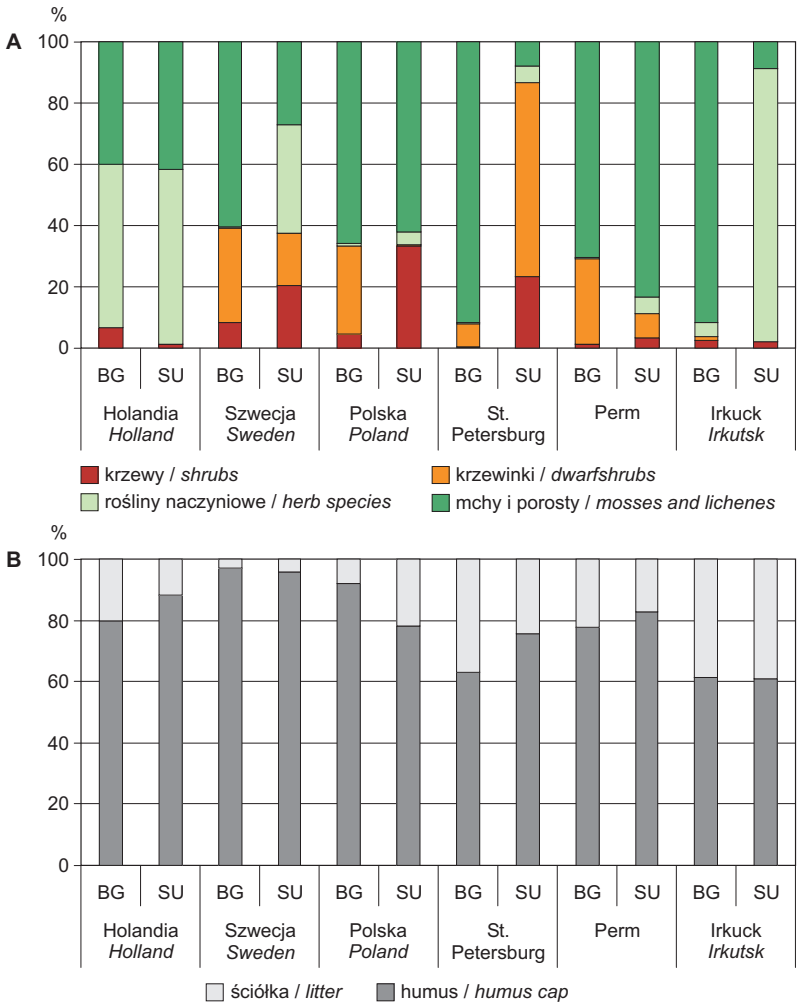
Zróżnicowanie biomasy

Waga biomasy poszczególnych frakcji, a także waga ściółki i humusu na poszczególnych stanowiskach bardzo się różnią (tab. 4). Znajduje to wyraz w udziałach procentowych biomasy poszczególnych frakcji w całej biomasie (ryc. 2A), jak i udziale ściółki i humusu w łącznej masie materii organicznej (ryc. 2B).

Wyraźnie najwyższą biomasą krzewów cechuje się stanowisko polskie w pobliżu Białegostoku (SU), najniższą zaś najbardziej wschodnie stanowiska – w Irkucku i w Permie, zarówno antropogenicznie przekształcone jak i naturalne (tab. 4; ryc. 2A).

Tabela 4. Średnia waga (g m^{-2}) poszczególnych frakcji na stanowiskach badawczych
Mean weight (g m^{-2}) of fractions on study sites

Nazwa stanowiska	Biomasa				Masa organiczna	
	krzewy	krzewinki	runo	mchy i porosty	ściółka	humus
Holandia BG	16,4	0,0	128,2	95,9	4715,3	18678,0
Holandia SU	5,9	0,0	277,8	202,9	2378,1	17772,0
Szwecja BG	77,6	295,2	3,0	577,3	744,8	23030,0
Szwecja SU	71,4	60,5	123,0	95,4	974,4	22559,0
Polska BG	20,0	132,3	3,4	300,2	822,3	9755,5
Polska SU	200,7	3,1	26,8	374,4	1435,4	5108,9
St. Petersburg BG	4,1	82,3	1,5	977,3	942,7	1609,2
St. Petersburg SU	70,9	193,8	17,3	23,8	1670,0	5231,0
Perm BG	2,8	69,9	1,8	175,8	1226,1	4252,1
Perm SU	13,8	35,8	22,2	361,8	1161,3	5588,3
Irkuck BG	3,8	2,2	7,9	149,4	1644,7	2621,3
Irkuck SU	3,6	0,0	163,1	16,1	1687,3	2631,1



Ryc. 2. Udział biomasy roślin w wyróżnionych frakcjach (A) i udział materii organicznej (B) na stanowiskach badawczych

The share of biomass fractions (A) and the share of organic matter (B) at the study sites

Największa biomasa frakcji krzewinek jest charakterystyczna dla szwedzkiego stanowiska naturalnego (VGötaland Gardsjön BG), choć udział procentowy tej frakcji w całkowitej biomasie jest najwyższy na przekształconej antropogenicznie powierzchni Očanskij w St. Petersburgu (SU). Natomiast na obu stanowiskach holenderskich oraz w Irkucku (SU) nie stwierdzono obecności krzewinek – tabela 4; ryc. 2A.

Na tych pozbawionych krzewinek stanowiskach zanotowano z kolei najwyższy spośród pozostałych udział biomasy roślin zielnych, przy czym na powierzchni Rabočie (Irkuck SU) udział tej frakcji w biomasie jest zdecydowanie dominujący (ryc. 4A). Na stanowiskach naturalnych (BG): szwedzkim (VGötaland Gardsjön), polskim (Browsk) i rosyjskich (St. Petersburg Ladoga, Perm Zakanskij, Irkuck Gačanji) biomasa roślin zielnych jest minimalna i mieści się przedziale 1–8 g m^{-2} (tab. 4).

Największą biomasę mchów i porostów zanotowano na stanowiskach naturalnych: Ladoga (St. Petersburg) oraz VGötaland Gardsjön (Szwecja), zupełnie nieznaczną zaś – na antropogenicznie przekształconych (zurbanizowanych) stanowiskach Sosnovka w St. Petersburgu oraz Rabočie w Irkucku – tabela 4; rycina 2A.

Masa ściółki jest najwyższa na dwóch najbardziej na zachód wysuniętych stanowiskach holenderskich (Ysselsteyn i Vollenhove), a stosunkowo wysoka także na najbardziej wschodnich (Irkuck BG i SU) – tabela 4; rycina 2B.

Bardzo zróżnicowana między stanowiskami jest także biomasa humusu – najwyższa w Holandii i Szwecji, wyraźnie niższa w Irkucku (tab. 4; ryc. 2B).

Ekologiczne liczby wskaźnikowe zbiorowisk roślinnych

Wartości średnich ważonych pięciu liczb ekologicznych: L (intensywność światła), K (stopień kontynentalizmu), F (wilgotność gleb), R (zakwaszenie gleb) i N (zawartość azotu w glebach) 12 zbiorowisk leśnych pozwalają oszacować zróżnicowanie siedliskowo-edaficzne stanowisk.

Wszystkie analizowane zbiorowiska mają zbliżone wymagania co do intensywności światła, a średnia wartość L zawiera się w granicach 4,7–6,0, co znaczy według skali Ellenberga, że dominują w nich gatunki wskaźnikowe półcienia lub półświatła, otrzymujące od 10 do 30% pełnego dziennego światła. Najbardziej zacienione są dwa zachodnie stanowiska holenderskie o identycznej średniej wartości L4,7, są one również najbardziej ubogie pod względem liczby gatunków runa. W przypadku par stanowisk szwedzkich i St. Petersburga, zbiorowiska roślinne stanowisk naturalnych są wskaźnikami większego dostępu światła niż antropogenicznych – odpowiednio L6 i L5,5 oraz L6 i L4,6 (ryc. 3-L).

Stwierdzono znaczne zróżnicowanie stopnia kontynentalizmu między analizowanymi stanowiskami, co odzwierciedla średnia wartość K o rozpiętości od K2,8 na najbardziej zachodnich stanowiskach holenderskich do K6,2 na stanowisku antropogenicznym Rabočie (Irkuck SU). To oznacza, że w zachodnich regionach Europy środkowej gatunki roślin naczyniowych budujące zbiorowiska leśne są wskaźnikami oceanizmu klimatu,. a w części wschodniej dominują gatunki subkontynentalne (Ellenberg i inni, 1991). Wraz ze wzrostem długości geograficznej rośnie udział gatunków o wyższej liczbie K (ryc. 3-K).

Wymagania zbiorowisk leśnych omawianych stanowisk względem wilgotności gleb są mało zróżnicowane, a wartości średnich ważonych F wahają się od

4,0 do 6,1 (ryc. 3-F). Oznacza to, że zbiorowiska te są wskaźnikami gleb od umiarkowanie świeżych do umiarkowanie wilgotnych (Ellenberg i inni, 1991). Wskaźnikami gleb najbardziej wilgotnych są zbiorowiska obu stanowisk holenderskich o identycznej wartości średniej ważonej F6,1. W przypadku par stanowisk szwedzkich oraz rosyjskich w St. Petersburgu i Irkucku zbiorowiska stanowisk antropogenicznych są nieco bardziej wilgotne niż naturalne. „Najsuchsze" natomiast są obydwa stanowiska permskie o wartościach średnich ważonych F – odpowiednio 4,4 i 4,0 (ryc. 3-F).

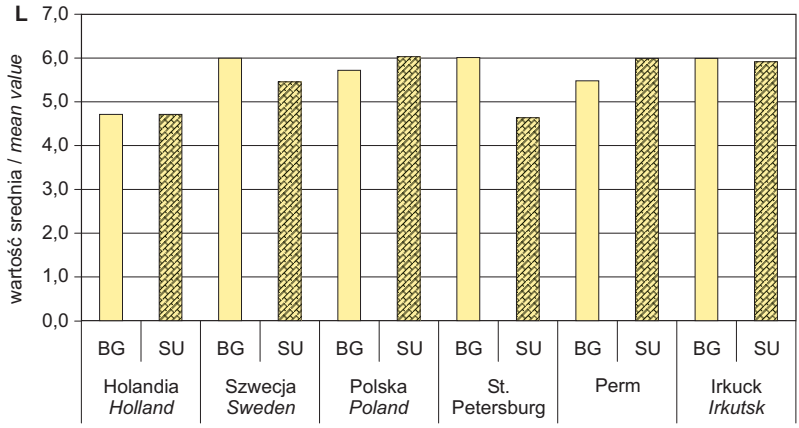
Wymagania zbiorowisk leśnych względem kwasowości gleb są zróżnicowane, o wartościach średnich ważonych R od 2,1 do 5,4, co oznacza, że występują zbiorowiska wskazujące na gleby silnie i umiarkowanie kwaśne (ryc. 3-R). Te wartości pozwalają wskazać dwie grupy stanowisk – wszystkie europejskie i najbardziej zachodnie rosyjskie (St. Petersburg) o wartościach R2,1, R3,0 oraz cztery wschodnie stanowiska w okolicach Permu i Irkucka – R 3,1–5,4. Wyraźnie najmniej kwaśne są zbiorowiska powierzchni Gačanji (BG) i Rabočie (SU) w okolicach Irkucka (odpowiednio R4,9 i 5,4). Spośród par stanowisk – wszystkie antropogenicznie przekształcone charakteryzują wartości R wyższe niż naturalne – (ryc. 3-R).

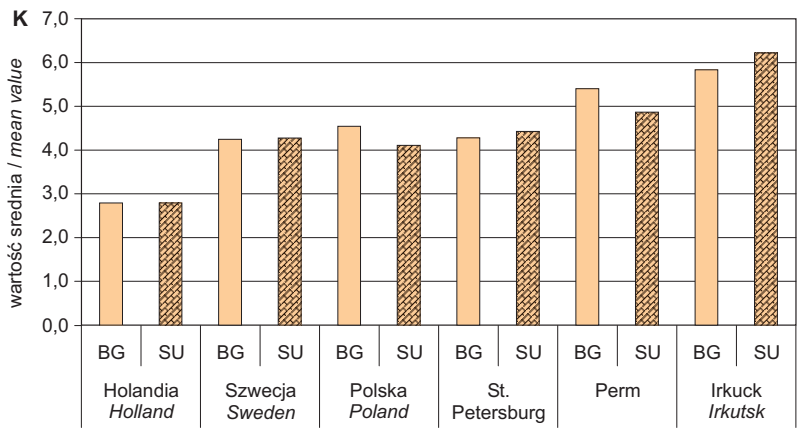
Zróżnicowanie analizowanych zbiorowisk pod względem zawartości azotu w glebie także jest znaczne, a średnie ważone wartości N wahają się od 1,7 do 5,4, czyli od gleb o ekstremalnie niskiej zawartości azotu do umiarkowanie zasobnych (Ellenberg i inni, 1991) – rycina 3-N. Niewątpliwie najbardziej „żyzne" są oba stanowiska holenderskie i wyraźnie odbiegają pod tym względem od większości pozostałych (z wyjątkiem Irkucka SU. Jeśli chodzi o pary stanowisk (naturalne–antropogeniczne), to te pod wpływem zanieczyszczeń cechują się wyższymi niż naturalne wartościami N, co jednoznacznie wskazuje na większą zawartość mineralnych związków azotowych w glebie.

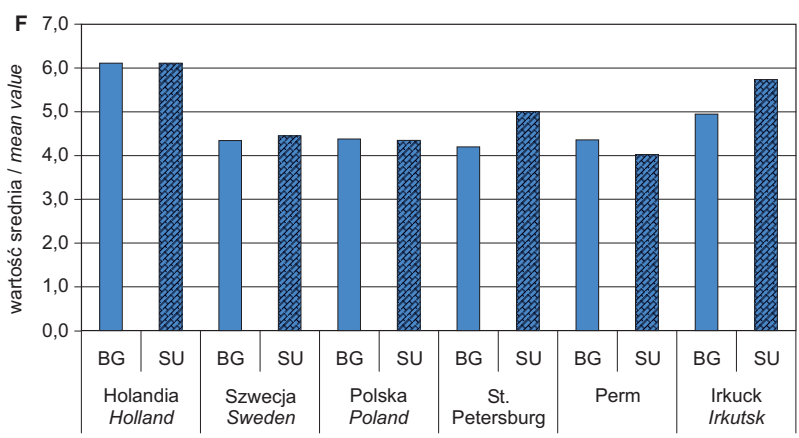
Zróżnicowanie procesu bielicowania w glebach badanych stanowisk

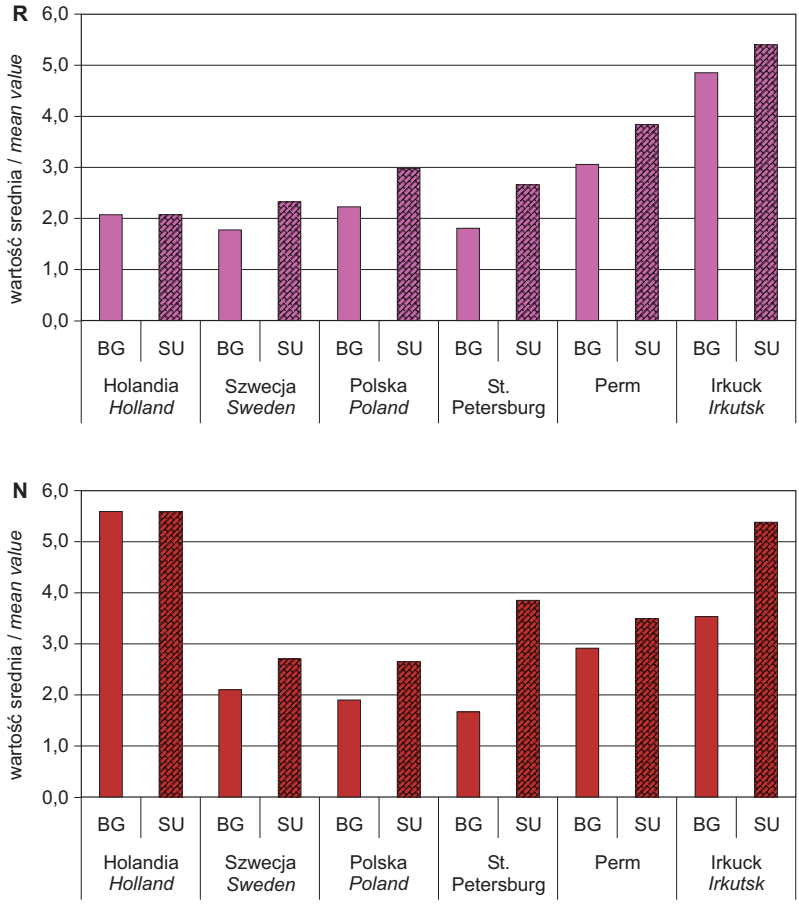
Wśród wielu chemicznych kryteriów oceny intensywności przebiegu procesu bielicowania gleb coraz większą rolę odgrywają wskaźniki uwzględniające relacje między poszczególnymi formami żelaza i glinu (Mokma, 1983; Bednarek, 1991; Degórski, 2002, 2007).

Jednym z takich kryteriów diagnostycznych stosowanych do klasyfikacji gleb bielicoziemnych, a zaproponowanych przez WRB (1998, 2006), jest wskaźnik przemieszczania amorficznych form żelaza i glinu, określony jako stosunek ich zawartości w poziomie eluwialnym (albic) do poziomu wzbogacania (spodic lub syderic), wyrażony matematycznie jako: $(Al_o + 0{,}5\ Fe_oB)/(Al_o + 0{,}5\ Fe_oE)$. Według propozycji WRB (1998, 2006), minimalna wartość tego wskaźnika w przypadku gleb bielicowych powinna wynosić 2, co wskazuje, że poziomy spodic powinny zawierać co najmniej dwa razy więcej amorficznych form żela-


L
wartość srednia / mean value
7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk


K
wartość srednia / mean value
7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk


F
wartość srednia / mean value
7,0
6,0
5,0
4,0
3,0
2,0
1,0
0,0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk



Ryc. 3. Zróżnicowanie ekologicznych wymagań zbiorowisk roślinnych względem warunków klimatycznych i glebowych na podstawie ekologicznych liczb wskaźnikowych Ellenberga: L – intensywności światła; K – stopnia kontynentalizmu; F – wilgotności gleb; R – kwasowości gleb; N – zawartości azotu w glebach.

Differentiation of plant communities requirements on study sites with respect to: climate and soil conditions on the basis of: L – light intensity; K –continentality degree; F – moisture in the soils; R – acidity in the soils; N – nitrogen content in the soils.

za i glinu aniżeli poziom eluwialny. Spośród badanych gleb, aż cztery pedony nie spełniają tego kryterium: powierzchnie naturalne w Irkucku, Białymstoku i Göteborgu oraz antropogenicznie przekształcone w Vollenhove (Holandia SU). W tych samych profilach uzyskano najniższe wartości wskaźnika przemieszczania wolnego żelaza Wp_{Fe} (Konecka-Betley, 1968), określanego jako stosunek zawartości F_d w dwu sąsiednich poziomach genetycznych: próchniczno-

eluwialnym lub eluwialnym i poziomie spodic oraz wskaźnika iluwiacji (*Wi*) zdefiniowanego przez D. Mokmę (1983) jako: Σ_B C_p Al_p Fe_p – Σ_A C_p Al_p Fe_p. Najwyższe wartości tego wskaźnika odnotowano w badanych glebach w Holandii, z największymi rocznymi sumami opadów.

Kolejnym istotnym kryterium diagnostycznym w ocenie procesów bielicowania jest stosunek molowy węgla organicznego do sumy glinu i żelaza oznaczonych w wyciągu pirofosforanowym. Według D. Mokmy (1983), kompleksy żelazowo-glinowo-próchniczne wykazują różną ruchliwość. Ustalił on, że gdy ten stosunek jest większy od 5,8, ale mniejszy od 25, to kompleksy stają się nieruchliwe. W poziomach iluwialnych analizowanych gleb uzyskane stosunki molowe Cp/(Alp+Fep) uzyskują wartości od 1,51 do 7,77. Wśród gleb w pełni spełniających przyjęte przez Mokmę kryterium są gleby powierzchni *background* w Holandii i Szwecji. D. Mokma (1983) zaproponował jeszcze dwa wskaźniki diagnozujące przebieg procesów bielicowania w profilach glebowych, oparte na ocenach zawartości kompleksów żelazowo-glinowo-próchnicznych w poszczególnych poziomach genetycznych. Wskazał on na prawidłowość, że poziom diagnostyczny spodic powinien zawierać ponad 0,5% kompleksowych połączeń próchnicy z R_2O_3 określanych na podstawie wyników uzyskiwanych w czasie ekstrahowania prób w pirofosforanie sodu. Wszystkie z badanych gleb bielicowych spełniają to kryterium, bowiem wartość sumy C_p,+Al_p+Fe_p waha się od 0,89% do 3,91%. Drugi wskaźnik wykorzystuje relacje pomiędzy zawartością kompleksów żelazowo-glinowo-próchnicznych w poziomie próchnicznym i poziomach diagnostycznych spodic oraz syderic. Według D. Mokmy (1983), a następnie R. Bednarek (1991), zawartość kompleksów żelazowo-glinowo-próchnicznych w poziomie diagnostycznym spodic jest większa od ich udziału w poziomie próchnicznym. W badanych glebach największe różnice odnotowano w glebach stanowisk naturalnych (BG) w Permie i w Holandii (tab. 5).

Geograficzne zróżnicowanie właściwości gleb

Uwarunkowany właściwościami litologicznymi i biochemicznymi proces pedogeniczny, a szczególnie stopień dojrzałości gleb wpływa jednoznacznie na właściwości badanych gleb. Niewątpliwie odbiegającymi od pozostałych są gleby powierzchni Irkuck – zarówno na stanowisku BG, jak i SU. Z uwagi na duży udział skał węglanowych w substracie glebowym, ich stopień zbielicowania jest bardzo mały i należy je klasyfikować jako alferhumusowe podbury z nakładającym się współcześnie bielicowaniem. Odczyn tych gleb w górnych poziomach genetycznych jest lekko kwaśny, zaś stopień wysycenia kompleksu sorpcyjnego gleb kationami o charakterze zasadowym bardzo wysoki, do 70% w poziomach mineralnych. W innych badanych glebach nie przekracza 20%, a w poziomach iluwialnych i skał macierzystych w przypadku gleb holenderskich i szwedzkich wynosi tylko 1–2% (tab. 6).

Tabela 5. Wartości wskaźników charakteryzujących chemiczne kryteria procesu bielicowania
Values of indices for characteristic of podzolization process criteria

Nazwa stanowiska	$Al_o+(1/2)Fe_oB$ (%)	$\frac{Al_o+(1/2)Fe_oB}{Al_o+(1/2)Fe_oE}$	$\frac{Fe_dB}{Fe_dE}$	W_i	$C_p+Al_p+Fe_pB$ (%)	$\frac{C_p+Al_p+Fe_pB}{C_p+Al_p+Fe_pA}$ (%)	$\frac{C_p}{Al_p+Fe_pB}$
	1	***2***	***3***	***4***	***5***	***6***	***7***
Holandia BG	0,245	13,600	3,600	12,300	1,890	285,400	7,765
Holandia SU	0,281	1,700	1,980	1,300	0,947	115,300	6,008
Szwecja BG	0,344	1,800	0,910	0,000	1,560	28,200	6,582
Szwecja SU	1,080	2,200	1,380	2,600	3,911	107,000	7,512
Polska BG	0,256	1,400	1,290	0,800	1,347	106,000	5,067
St. Petersburg BG	0,476	2,400	2,340	0,000	0,877	93,500	8,278
Perm BG	0,338	2,300	2,030	2,200	0,976	135,600	2,780
Irkuck BG	0,235	1,400	1,280	0,000	0,567	63,200	3,205

1 – zawartość amorficznego żelaza i glinu w poziomie wzbogacania, wg WRB (1998, 2006)
2 – przemieszczanie amorficznego żelaza i glinu wg WRB (1998, 2006)
3 – przemieszczanie wolnego żelaza, wg Koneckiej-Betley (1968) i Bednarek (1991)
4 – iluwiacja (Wi) według Mokmy (1983; 2006)
5 – zawartość kompleksów żelazisto-glinowo-próchnicznych w poziomie wzbogacania, wg Mokmy (1983)
6 – relacje między zawartością kompleksów żelazowo-glinowo-próchnicznych w poziomie próchnicznym a poziomami diagnostycznymi spodic i syderic, wg Mokmy (1983) i Bednarek (1991)
7 – charakterystyki kompleksów nieruchliwych wg Mokmy (1983).

Tabela 6. Wybrane właściwości gleb badanych stanowisk

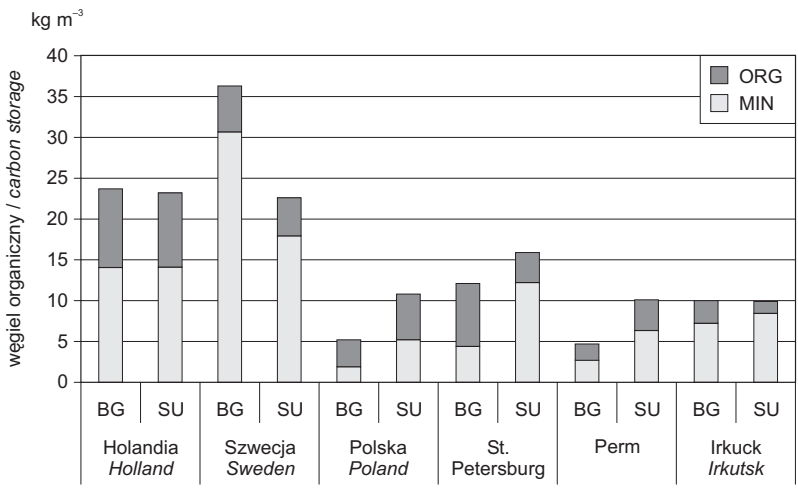
Chosen soil features of study sites

Nazwa stanowiska		Poziom glebowy	NT	CO	C:N	Hh	Na	K	Mg	Ca	S	T	Vs (%)	pH
			%			me ·100g^{-1}								
Holandia	BG	Of	1,98	40,30	20,35	85,80	0,29	0,70	2,24	8,58	11,8	97,6	12,09	4,19
		A1/Ees	0,138	2,74	19,86	11,70	0,03	0,02	0,04	0,13	0,22	11,92	1,81	3,54
		A2/Ees	0,046	2,15	46,74	8,20	0,04	0,01	0,01	0,06	0,12	8,32	1,44	3,3
		Ees	0,012	0,37	30,83	2,10	0,03	0,01	0,00	0,03	0,07	2,17	3,43	3,84
		Bhfe	0,106	0,51	4,81	19,10	0,03	0,01	0,01	0,04	0,08	19,18	0,42	3,74
		Bhfe	0,067	2,82	42,09	5,60	0,04	0,01	0,02	0,04	0,1	5,7	1,81	4,37
		BC	0,059	2,50	42,37	3,30	0,02	0,01	0,00	0,03	0,06	3,36	1,68	4,39
		C	0,049	0,78	15,92	3,23	0,02	0,01	0,00	0,02	0,05	3,28	1,52	5,2
Holandia	SU	O	0,392	39,5	100,77	103,00	0,35	0,39	1,07	3,05	4,86	107,86	4,51	3,35
		Ah	0,103	1,70	16,50	12,90	0,03	0,01	0,03	0,09	0,17	13,07	1,26	3,28
		Ees	0,027	2,10	77,78	9,20	0,04	0,02	0,03	0,05	0,13	9,33	1,44	3,40
		Bhfe	0,065	1,65	25,38	11,60	0,04	0,01	0,02	0,05	0,12	11,72	1,00	3,47
		Bfe	0,054	1,53	28,33	9,38	0,03	0,01	0,01	0,03	0,09	9,47	0,93	3,55
		BfeC	0,033	1,07	32,42	7,00	0,05	0,01	0,01	0,04	0,12	7,12	1,63	3,99
		C	0,012	0,09	7,50	4,40	0,03	0,01	0,01	0,04	0,08	4,48	1,86	5,11
Szwecja	BG	Of	0,253	40,40	159,68	95,40	1,50	2,15	6,55	9,98	20,18	115,58	17,46	3,99
		Ah	0,161	27,40	170,19	63,60	0,63	0,51	1,44	0,74	3,32	66,92	4,96	3,7
		Ees	0,251	3,62	14,42	19,80	0,12	0,08	0,15	0,15	0,5	20,3	2,44	3,95
		Bfe	0,205	2,82	13,76	13,70	0,07	0,05	0,08	0,11	0,31	14,01	2,22	4,12
		C	0,009	0,15	16,67	9,54	0,05	0,04	0,03	0,09	0,21	9,75	2,15	5,12
Szwecja	SU	O	1,135	29,10	25,64	68,70	0,68	0,49	2,33	3,87	7,38	76,08	9,7	4,61
		Ah	0,312	9,39	30,10	24,40	0,17	0,09	0,33	0,45	1,04	25,44	4,1	4,03
		Ees	0,124	4,00	32,26	12,00	0,09	0,04	0,1	0,15	0,38	12,38	3,06	4,08
		Bhfe	0,207	5,38	25,99	15,10	0,10	0,05	0,12	0,11	0,38	15,48	2,44	4,18
		C	0,003	0,14	46,67	8,75	0,07	0,04	0,07	0,09	0,27	9,02	2,99	5,08

Polska	BG	Of	0,858	21,5	25,06	85,20	0,09	0,59	0,45	1,42	2,54	87,74	2,89	4,17
		AEes	0,069	2,89	41,88	10,50	0,02	0,08	0,06	0,09	0,25	10,75	2,34	4,34
		Ees	0,085	2,23	26,24	9,60	0,01	0,05	0,04	0,11	0,2	9,8	2,04	4,71
		Bhfe	0,017	0,13	7,65	2,03	0,01	0,02	0,02	0,05	0,09	2,12	4,45	5,02
		Bfe	0,009	0,03	3,33	1,54	0,02	0,01	0,01	0,04	0,08	1,62	4,94	5,12
		BfeC	0,021	0,03	1,43	1,13	0,00	0,01	0,00	0,04	0,05	1,18	4,57	4,95
		C	0,001	0,02	20,00	1,88	0,01	0,04	0,06	0,22	0,32	2,2	14,65	5,55
Polska	SU	Of	0,862	18,00	20,88	55,80	0,04	0,54	0,56	2,91	4,05	59,85	6,76	4,3
		Ah	0,177	2,08	11,75	18,00	0,01	0,16	0,07	0,54	0,79	18,79	4,19	4,05
		AEes	0,069	0,92	13,33	5,10	0,02	0,09	0,04	0,26	0,41	5,51	7,44	4,92
		Bfe	0,012	0,02	1,67	1,80	0,01	0,02	0,01	0,07	0,11	1,91	5,56	5,06
		BfeC	0,01	0,03	3,00	1,50	0,00	0,03	0,02	0,1	0,15	1,65	8,83	5,23
		C	0,008	0,02	2,50	0,68	0,00	0,01	0,01	0,08	0,11	0,79	13,62	5,66
St, Petersburg	BG	Ohf	0,921	40,5	43,97	40,21	0,09	2,78	1,72	1,7	6,29	46,5	13,53	3,71
		AEes	0,234	2,34	10,00	15,60	0,03	0,08	0,09	1,26	1,46	17,06	8,56	3,76
		Ees	0,227	1,67	7,36	10,90	0,01	0,06	0,05	0,14	0,26	11,16	2,31	4,01
		Bhfe	0,039	0,63	16,15	3,90	0,01	0,02	0,01	0,06	0,1	4,00	2,39	4,12
		Bfe	0,016	0,02	1,25	2,03	0,00	0,01	0,00	0,05	0,07	2,1	3,21	4,05
		C	0,012	0,03	2,50	1,13	0,00	0,00	0,00	0,04	0,05	1,18	4,12	4,39
St, Petersburg	SU	Ohf	1,144	27,2	23,78	46,80	0,14	1,25	2,64	14,78	18,81	65,61	28,67	4,09
		AEes	0,285	5,63	19,75	17,50	0,04	0,11	0,13	1,23	1,5	19,00	7,90	4,01
		Ees	0,169	3,34	19,76	15,60	0,02	0,13	0,23	0,47	0,85	16,45	5,16	4,39
		Bhfe	0,034	0,31	9,12	2,33	0,01	0,01	0,00	0,06	0,08	2,41	3,49	5,08
		Bfe	0,022	0,15	6,82	2,03	0,03	0,01	0,01	0,06	0,1	2,13	4,77	5,02
		C	0,015	0,11	7,33	1,35	0,01	0,01	0,00	0,06	0,08	1,43	5,68	5,15

Nazwa stanowiska		Poziom glebowy	NT	CO	C:N	Hh	Na	K	Mg	Ca	S	T	Vs (%)	pH
			%			me ·100g^{-1}								
Perm	BG	Ohf	0,118	12,6	106,78	33,00	0,04	0,78	1,54	7,89	10,26	43,26	23,72	4,06
		AEes	0,096	2,04	21,25	9,00	0,02	0,11	0,14	0,66	0,92	9,92	9,29	4,01
		Ees	0,07	1,32	18,86	6,53	0,02	0,04	0,02	0,11	0,19	6,72	2,76	4,32
		Bhfe	0,057	0,81	14,21	5,03	0,01	0,04	0,03	0,19	0,27	5,3	5,14	4,63
		Bfe	0,013	0,04	3,08	1,65	0,01	0,06	0,1	0,37	0,53	2,18	24,48	4,89
		BfeC	0,022	0,03	1,36	1,35	0,02	0,08	0,31	1,15	1,56	2,91	53,59	5,3
		C	0,029	0,03	1,03	1,05	0,01	0,05	0,28	0,96	1,29	2,34	55,21	5,67
Perm	SU	Ohf	1,328	29,4	22,14	69,90	0,08	0,84	1,41	4,06	6,4	76,3	8,39	3,67
		AEes	0,088	1,89	21,48	21,13	0,03	0,1	0,01	0,07	0,21	21,34	0,98	3,49
		Bfeh	0,123	1,21	9,84	2,70	0,01	0,04	0,09	0,11	0,25	2,95	8,47	3,92
		Bfe	0,023	0,27	11,74	2,25	0,01	0,03	0,02	0,08	0,14	2,39	5,75	4,39
		C	0,018	0,03	1,67	1,71	0,01	0,02	0,01	0,06	0,1	1,81	5,52	5,49
Irkuck	BG	Of	0,968	26,6	27,48	29,40	0,03	1,58	5,02	26,78	33,41	62,81	53,19	4,94
		A	0,205	2,26	11,02	5,40	0,02	0,37	1,58	13,47	15,45	20,85	74,1	4,89
		AE	0,114	0,93	8,16	2,10	0,03	0,23	1,25	12,97	14,48	16,58	87,33	5,81
		Bfet	0,215	0,43	2,00	2,03	0,04	0,36	2,02	16,97	19,39	21,42	90,52	6,34
		BC	0,045	0,35	7,78	1,73	0,05	0,21	1,38	17,96	19,61	21,34	91,89	6,71
		C	0,036	0,04	1,11	0,83	0,03	0,13	0,54	8,08	8,79	9,62	91,37	6,91
Irkuck	SU	Of	0,629	10,00	15,90	25,20	0,02	0,62	1,82	14,23	16,69	41,89	39,85	4,53
		A	0,234	5,18	22,14	9,38	0,02	0,31	1,65	10,9	12,88	22,26	57,86	4,68
		AE	0,034	0,51	15,00	3,90	0,02	0,13	2,04	5,65	7,85	11,75	66,81	4,89
		Bfet	0,035	0,21	6,00	3,83	0,05	0,18	5,24	10,95	16,41	20,24	81,08	5,01
		BC	0,034	0,18	5,29	3,75	0,05	0,18	4,99	10,85	16,07	19,82	81,08	5,07
		C	0,019	0,03	1,58	2,25	0,04	0,08	2,45	5,81	8,37	10,62	78,82	5,89

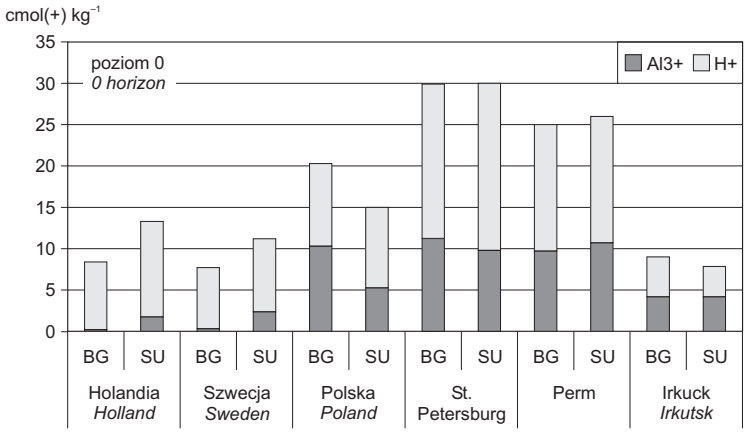
Można zatem stwierdzić, że poza glebami irkuckimi są to gleby ubogie, o niskim stopniu aktywności biologicznej, na co wskazuje również bardzo szeroki stosunek węgla organicznego do azotu ogółem (C:N) – ponad 20 w poziomach humusowych badanych gleb. Niskie tempo humifikacji i mineralizacji materii organicznej sprzyja akumulacji węgla organicznego w badanych glebach. Jego zapasy obliczone dla 1 m^3 gleby wskazują, że najwyższe wartości są charakterystyczne dla regionu Utrechtu (ponad 23 kg m^{-3}) oraz Göteborga (ponad 36 i 22 kg m^{-3}). W glebach holenderskich akumulacja w poziomach organicznych stanowi około 40% zapasu całkowitego, zaś w glebach Szwecji 20%. Na pozostałych powierzchniach zapas węgla organicznego osiąga wielkości od około 5 kg w m^3 gleby na powierzchniach BG w Białymstoku i Permie, do 12–15 kg m^{-3} w St. Petersburgu (ryc. 4).

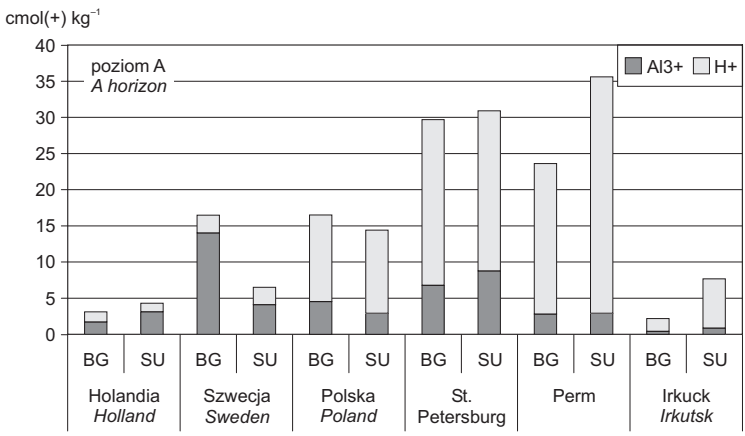


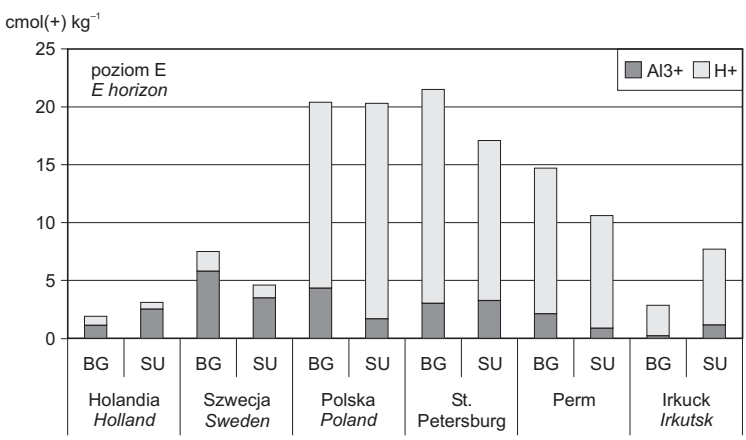
Ryc. 4. Zapas węgla w poziomie organicznym (ORG) i mineralnej części gleby (MIN) na stanowiskach badawczych

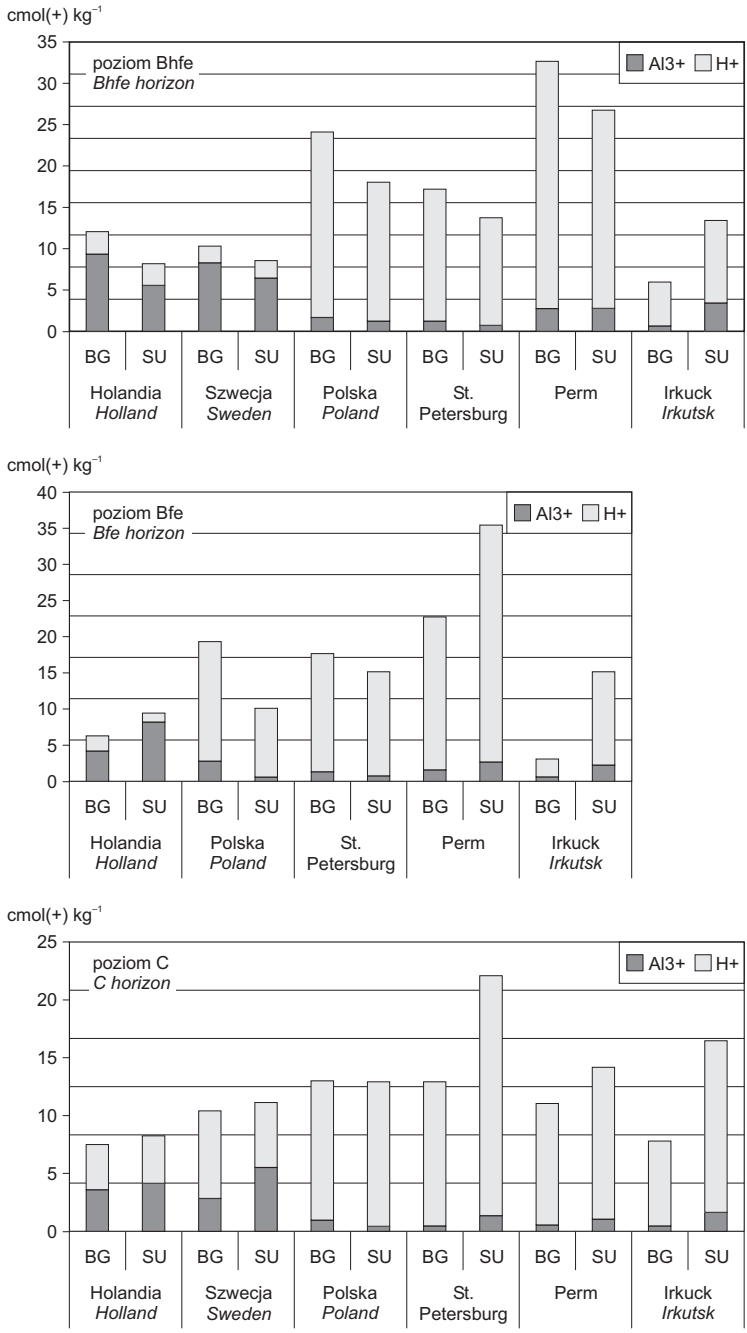
Carbon storage in organic horizon (ORG) and mineral part (MIN) of the soil at the study sites

Zarysowują się również różnice udziału wymiennego glinu i wodoru w kwasowości wymiennej. Kwasowość wymienną gleb we wschodniej części badanego obszaru powodują głównie jony wymiennego wodoru, a części środkowej i zachodniej – jony wymiennego glinu, których średni udział w kwasowości wymiennej wynosi nawet ponad 90% w badanych glebach Holandii (ryc. 5). Przestrzenna zmienność udziału glinu w kwasowości wymiennej nawiązuje do właściwości troficznych siedlisk, a tym samym odczynu poszczególnych profili glebowych.


cmol(+) kg⁻¹
poziom 0
0 horizon
Al3+
H+
35
30
25
20
15
10
5
0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk


cmol(+) kg⁻¹
poziom A
A horizon
Al3+
H+
40
35
30
25
20
15
10
5
0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk


cmol(+) kg⁻¹
poziom E
E horizon
Al3+
H+
25
20
15
10
5
0
BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU BG SU
Holandia Holland
Szwecja Sweden
Polska Poland
St. Petersburg
Perm
Irkuck Irkutsk

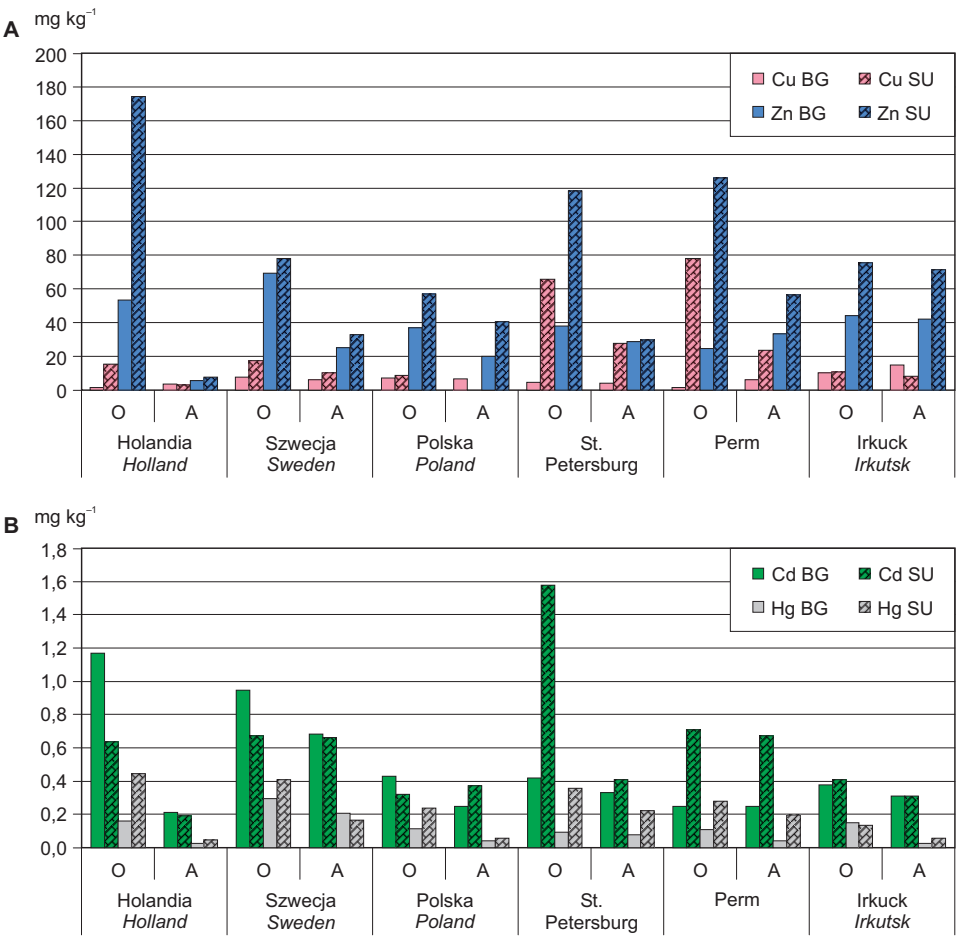


Ryc. 5. Kwasowość wymienna określona dla poszczególnych poziomów genetycznych gleb
Exchangeable acidity of genetic horizons of studied soils

Wiadomo, że uwalnianie jonów Al^{3+} osiąga optymalne warunki przy pH 3,8–4,2 (Ulrich, 1981; Degórski, 2002), czyli w glebach o odczynie bardzo kwaśnym (stanowisk holenderskich i szwedzkich).

Wewnątrzregionalne zróżnicowanie właściwości gleb

Porównanie chemicznych i fizycznych właściwości gleb na powierzchniach naturalnych BG i antropogenicznych SU jednego regionu geograficznego nie wykazywało istotnych statystycznie różnic. Jedynym zbiorem cech o statystycznie istotnie różnych wartościach na dwóch stanowiskach jednego regionu była



Ryc. 6. Zawartość metali ciężkich – miedzi, cynku, kadmu i rtęci w poziomie organicznym (O) i próchnicznym (A) w glebach stanowisk naturalnych (BG) i antropogenicznie przekształconych (SU)

Heavy metals in organic (O) and humus (A) horizons in the soil of background (BG) and suburban (SU) sites: cuprum, zinc, cadmium and mercury

zawartość metali ciężkich, większa w glebach na powierzchniach SU w porównaniu z BG. Największe zawartości metali ciężkich w glebach pod wpływem zanieczyszczeń oraz największe różnice ich zawartości między powierzchniami BG i SU zaobserwowano w Permie, Irkucku, St. Petersburgu i Szwecji. Dotyczy to wszystkich badanych metali ciężkich: miedzi, cynku, kadmu i rtęci (Degórski, 2008). Należy jednak podkreślić, że najbardziej spektakularną różnicę uzyskano w przypadku zawartości miedzi w glebach regionu permskiego, gdzie jej zawartość w poziomie organicznym powierzchni przekształconej w stosunku do naturalnej była ponad 50-krotnie wyższa, zaś w poziomie humusowym ponad 4-krotnie. Ponad 10-krotne różnice zawartości miedzi w poziomie organicznym gleb stanowiska (SU) i (BG) odnotowano również w regionie St. Petersburga i w Holandii (ryc. 6a).

Istotne statystycznie były też różnice zawartości rtęci w poziomie organicznym obszarów SU i BG w dużych aglomeracjach miejskich. Sięgają one kilkuset procent, a największe wartości stwierdzono w St. Petersburgu (394%) i Holandii (282%) – rycina 6b.

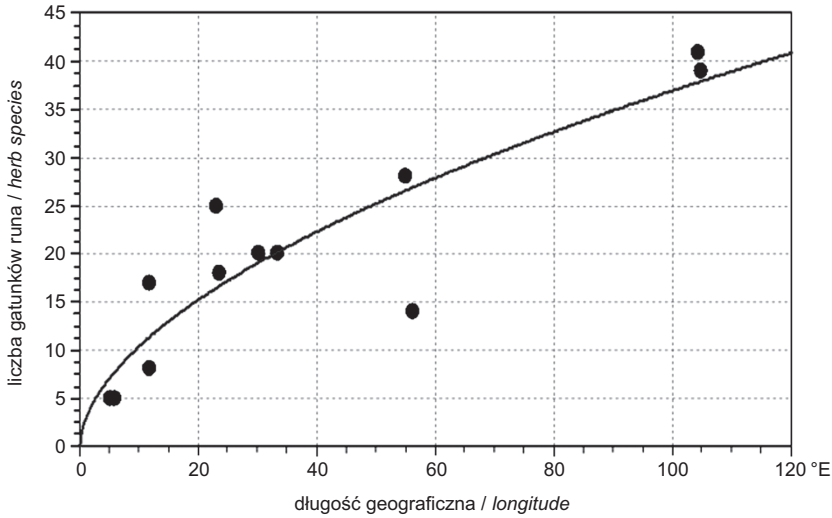
Wewnątrzregionalne zróżnicowanie innych właściwości glebowych nawiązywało do zmienności lokalnych uwarunkowań pedogenicznych. Efektem wpływu miasta na funkcjonowanie badanych gleb może być niższa wartość pH gleb na stanowiskach antropogenicznych w Irkucku, Permie i w Holandii.

Powiązania przestrzenne i siedliskowe

Powiązania geograficzne

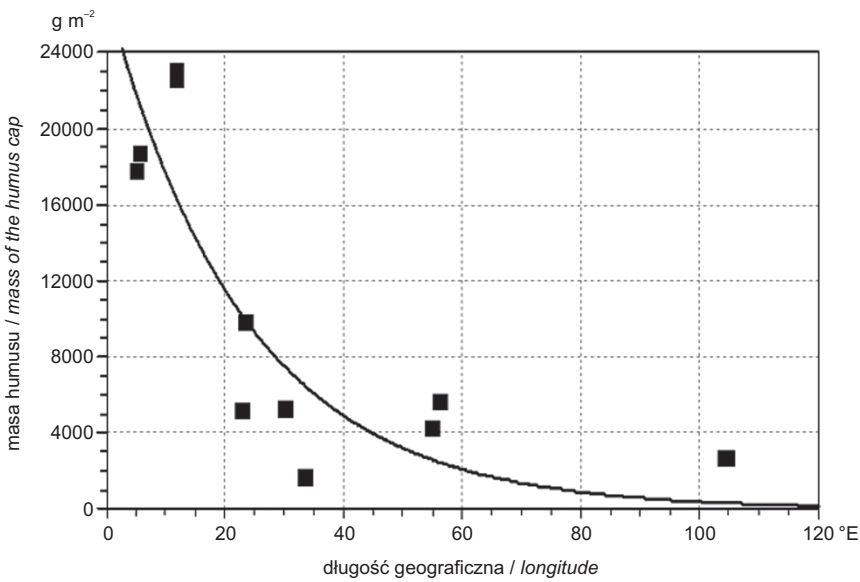
Niezależnie od zróżnicowania warunków siedliskowych i presji antropogenicznej na zbiorowiska leśne obserwuje się wyraźne zależności o charakterze ogólnogeograficznym. Pierwsza z nich dotyczy wzrostu liczby gatunków z zachodu na wschód (ryc. 7). Powierzchnie najbardziej zachodnie (położone poza zasięgiem siedliskowym borów z klasy *Vaccinio-Piceetea*) charakteryzuje bardzo ubogi skład gatunkowy runa (około 5 gatunków), natomiast stanowiska syberyjskie wykazują bogactwo przekraczające 40 gatunków. Najszybsze zmiany liczby gatunków zachodzą na stosunkowo niewielkim obszarze, od ok. 5 do 30 stopnia długości geograficznej wschodniej. Identyczna zależność została już opisana wcześniej i to w odniesieniu do zarówno dobrze wykształconych borów sosnowych jak i borów mieszanych z drzewostanem sosnowym (Roo-Zielińska i Solon, 1998b; Solon, 1998).

Następna zależność – to zmienność zakumulowanej ilości humusu w wierzchniej warstwie gleby: od bardzo wysokich wartości (przekraczających 20 kg na 1 m^2) w części zachodniej, do około 4 kg we wschodniej części obszaru (ryc. 8). Jednoznaczna interpretacja tego wyniku jest trudna. Z jednej strony niewątpliwie ma na to wpływ wyższa produkcja na zachodzie związana z oceanicznością klimatu (por. Solon i Roo-Zielińska, 2003). W kilku przypadkach znaczącą



Ryc. 7. Zależność między długością geograficzną a liczbą gatunków runa na stanowiskach badawczych

Relationship between geographical longitude and number of herb species at the study sites



Ryc. 8. Zależność między długością geograficzną a masą humusu na stanowiskach badawczych

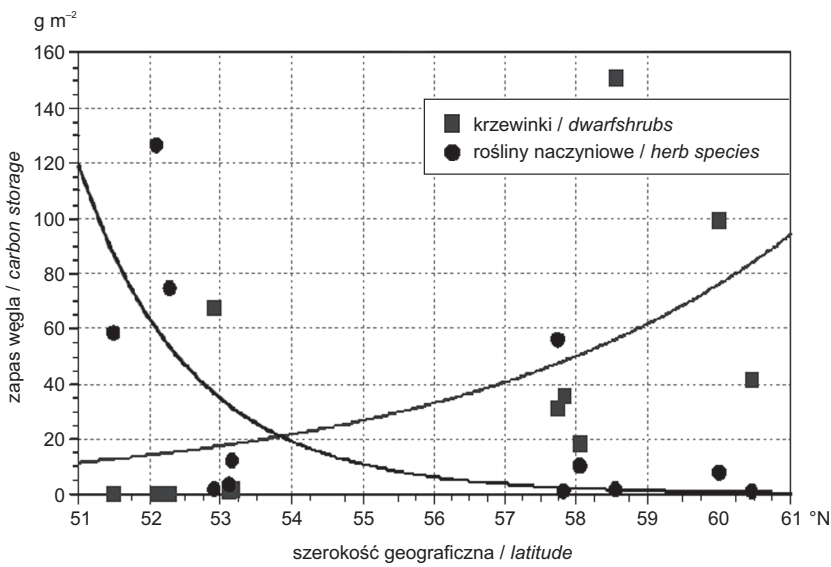
Relationship between geographical longitude and mass of the humus cap at the study sites

Tabela 7. Powiązania przestrzenne i siedliskowe na podstawie charakterystyk stanowisk badawczych
Spatial and habitat relationships based on characteristics of study sites

Zmienne		Linie regresji						
x	*y*	model	parametry				błąd standard.	współczynnik korelacji *r*
			a	b	c	d		
Powiązania geograficzne								
Długość geograficzna	liczba gatunków runa	*y*=a*x*^b	2,925	0,551			5,567	0,893
	masa humusu (g m^{-2})	*y*=ab^*x*	27008,832	0,958			4287,225	0,867
Szerokość geograficzna	zapas węgla w krzewinkach (g m^{-2})	*y*=ae^b*x*	0,000	0,209			40,529	0,581
	zapas węgla w roślinach naczyniowych (g m^{-2})	*y*=ae^b/*x*	6,351*10^13	1676,416			33,344	0,620
Długość geograficzna	wartość średnia K	*y*=a+b*ln(*x*)	1,316	0,975			0,360	0,944
	wartość średnia R	*y*=a+b*x*	1,682	0,032			0,442	0,935
Powiązania siedliskowe								
Ekologiczne liczby wskaźnikowe zbiorowisk roślinnych – biomasa								
Wartość średnia F	biomasa roślin naczyniowych (g m^{-2})	*y*=a/[(1+b*exp(–c*x*)]	399,705	77129,423	1,853		53,593	0,838
	biomasa mchów i porostów (g m^{-2})	*y*=(a+b*x*)/(1+c*x*+d*x*^2)	–17,978	4,780	–0,492	0,061	214,011	0,746
	masa ściółki (g m^{-2})	*y*=a/[(1+b*exp(–c*x*)]	–50,245	–1,135	0,018		640,934	0,843
Wartość średnia N	biomasa roślin naczyniowych (g m^{-2})	*y*=a*x*^(b*x*)	6,331	0,359			49,269	0,849
	biomasa mchów i porostów (g m^{-2})	*y*=a/[(1+b*exp(-–c*x*)]	108,729	–2,118	0,523		147,940	0,873
	masa ściółki (g m^{-2})	*y*=a/[(1+b*exp(–c*x*)]	–214,204	–1,334	0,040		715,169	0,801
Wartość średnia R	masa humusu (g m^{-2})	*y*=a+b/x	–5361,762	39379,131			6815,127	0,611
Ekologiczne liczby wskaźnikowe zbiorowisk roślinnych – właściwości gleb								
PH A	wartość średnia R	*y*=a*x*^(b*x*)	0,530	0,290			0,528	0,906
Miąższość humusu w glebie	masa humusu (g m^{-2})	*y*=a+b*x*+c*x*^2	–3059,758	2315,097	–48,125		7268,423	0,598

rolę odgrywa wilgotność podłoża, która ogranicza tempo rozkładu (tak jest np. w antropogenicznie przekształconym stanowisku w St. Petersburgu). Nie można jednak wykluczyć także wpływu oddziaływań antropogenicznych i stopnia przekształcenia struktury i funkcjonowania gleby (co najsilniej uwidacznia się w przypadku powierzchni holenderskich). Statystycznie istotną zależność najlepiej opisuje zmodyfikowana funkcja wykładnicza z wysokim współczynnikiem korelacji $r=0{,}85$ (tab. 7).

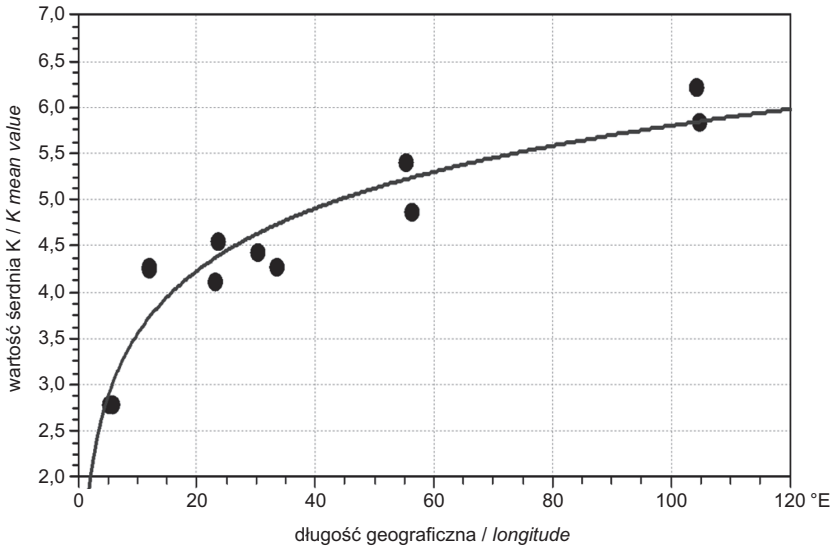
Obserwuje się wyraźną zmienność z północy na południe roli odgrywanej przez krzewinki i rośliny zielne. Zmienność ta uwidacznia się zarówno w pokryciu terenu przez poszczególne grupy gatunków, jak i w biomasie czy w zapasie węgla (ryc. 9). Jest to wyraz ogólnej zależności występującej w obrębie borów sosnowych klasy *Vaccinio-Piceetea*, zgodnie z którą w rejonach północnych dominują krzewinki i ich biomasa przekracza biomasę gatunków trawiastych nawet 60–100-krotnie, podczas gdy w południowej części zasięgu (a także zachodniej) rolę dominanta odgrywają gatunki trawiaste (Solon i Roo-Zielińska, 2003; Breymeyer i inni, 2006).



Ryc. 9. Zależność między szerokością geograficzną a zapasem węgla w krzewinkach i trawach na stanowiskach badawczych

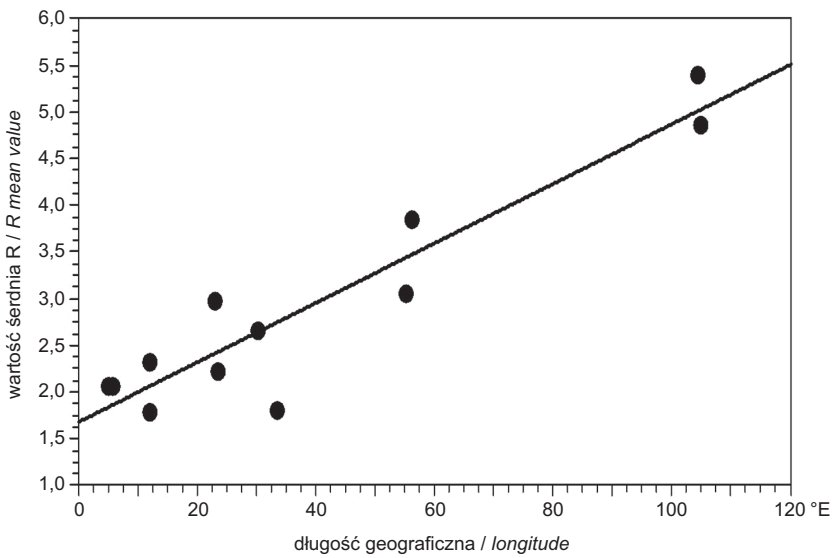
Relationship between geographical latitude and carbon storage in dwarfshrubs and in herbs at the study sites

Wystąpiła także jednoznaczna zależność między długością geograficzną a stopniem kontynentalizmu klimatu określonego na podstawie ekologicznej skali liczb wskaźnikowych Ellenberga (Ellenberg inni, 1991) – rycina 10. Zwią-



Ryc. 10. Zależność między długością geograficzną a stopniem kontynentalizmu klimatu określonym na podstawie ekologicznej liczby wskaźnikowej K na stanowiskach badawczych

Relationship between geographical longitude and mean weight indicator values K (continentality degree) at the study sites



Ryc. 11. Zależność między długością geograficzną a kwasowością gleb określoną na podstawie ekologicznej liczby wskaźnikowej R na stanowiskach badawczych

Relationship between geographical longitude and mean weight indicator values R (acidity of the soil) at the study sites

zek ten, statystycznie istotny, najlepiej opisuje funkcja logarytmiczna, przy bardzo wysokiej wartości współczynnika korelacji $r=0{,}94$ (tab. 7).

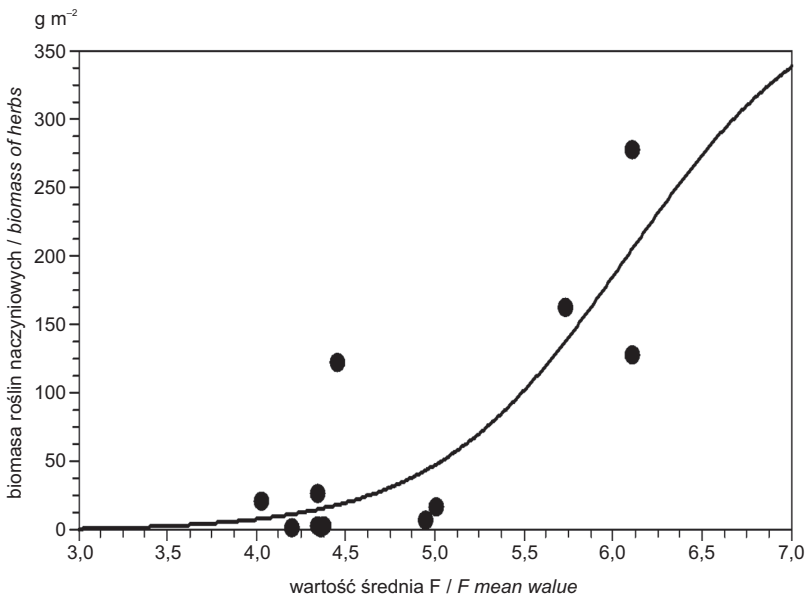
Bardzo wysoka jest korelacja między długością geograficzną a kwasowością gleb określoną wedle skali Ellenberga (Ellenberg i inni, 1991) – rycina 11. Ten statystycznie istotny związek najlepiej opisuje funkcja liniowa, przy współczynnika korelacji $r=0{,}94$ (tab. 7).

Powiązania ekologiczne

Ekologiczne liczby wskaźnikowe zbiorowisk roślinnych – biomasa

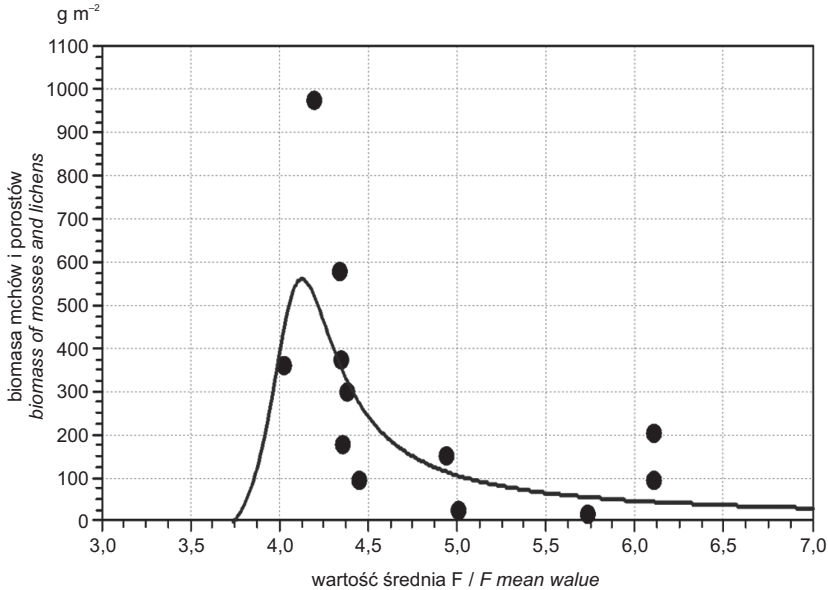
Zaobserwowano następujące zależności między wartościami średnich ważonych liczb wskaźnikowych, określających wymagania zbiorowisk leśnych względem takich właściwości gleb jak wilgotność (F), kwasowość (R) i zawartość azotu (N) a wagą frakcji roślinnych i glebowych.

– Średnia ważona F – biomasa roślin zielnych: wraz ze wzrostem wilgotności siedlisk wzrasta biomasa roślin zielnych szczególnie przy F 5,0–6,1 (ryc. 12); zależność opisuje funkcja wykładnicza przy wysokiej wartości współczynnika korelacji $r = 0{,}84$ (tab. 7);



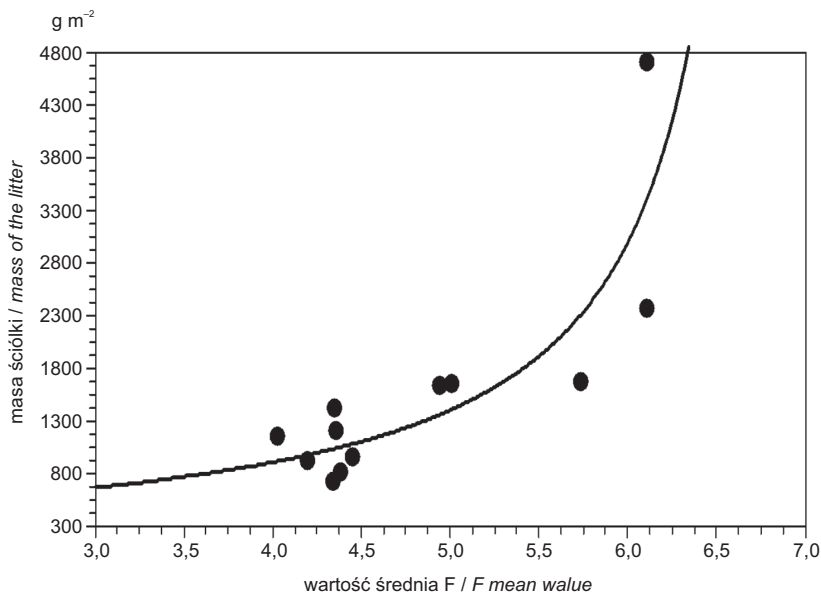
Ryc. 12. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby F i biomasą roślin zielnych na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values F (moisture of the soil) and biomass of herbs at the study sites



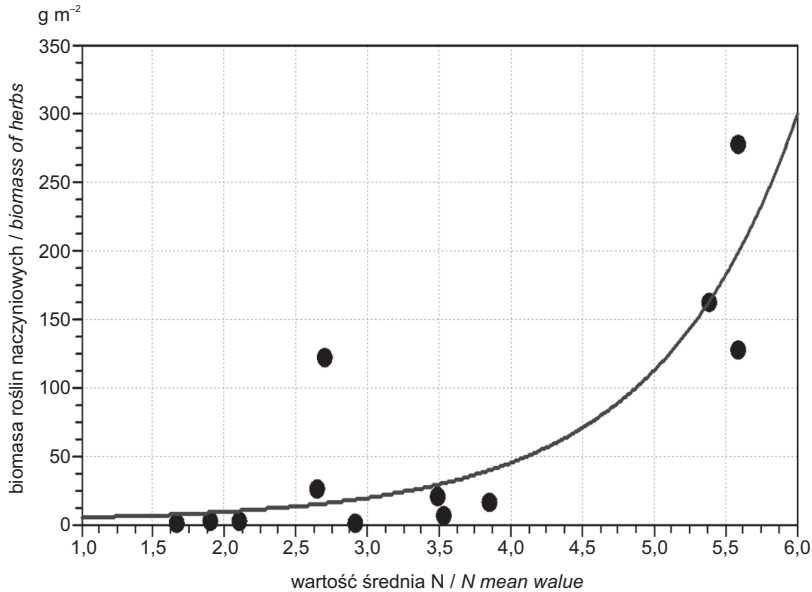
Ryc. 13. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby F i łączną biomasą mchów i porostów na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values F (moisture of the soil) and biomass of mosses and lichens at the study sites



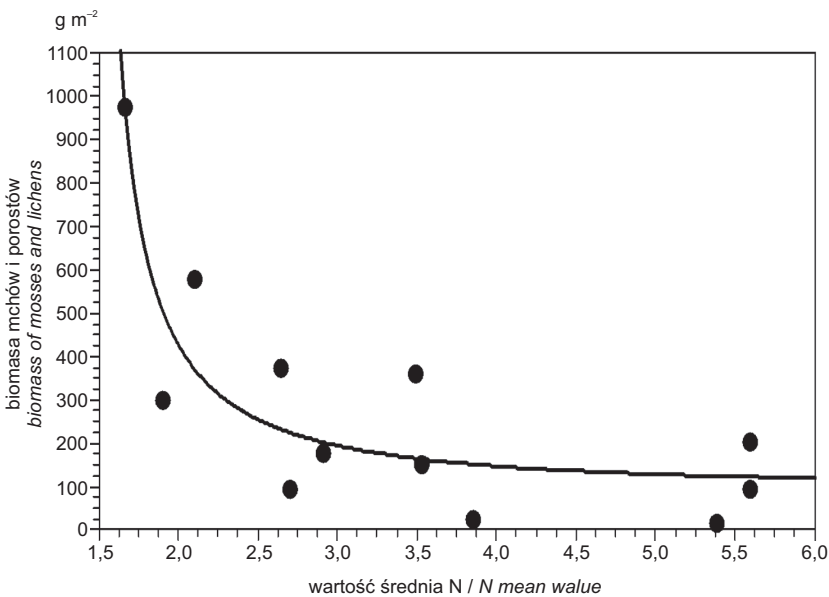
Ryc. 14. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby F i masą ściółki na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values F (moisture of the soil) and mass of the litter at the study sites



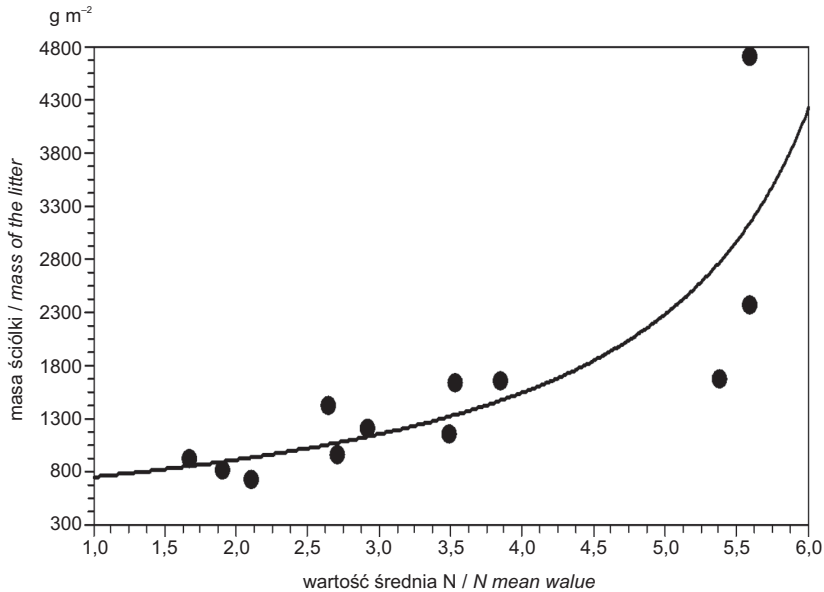
Ryc. 15. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby N i biomasą roślin zielnych na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values N (nitrogen content in the soil) and biomass of herbs at the study sites



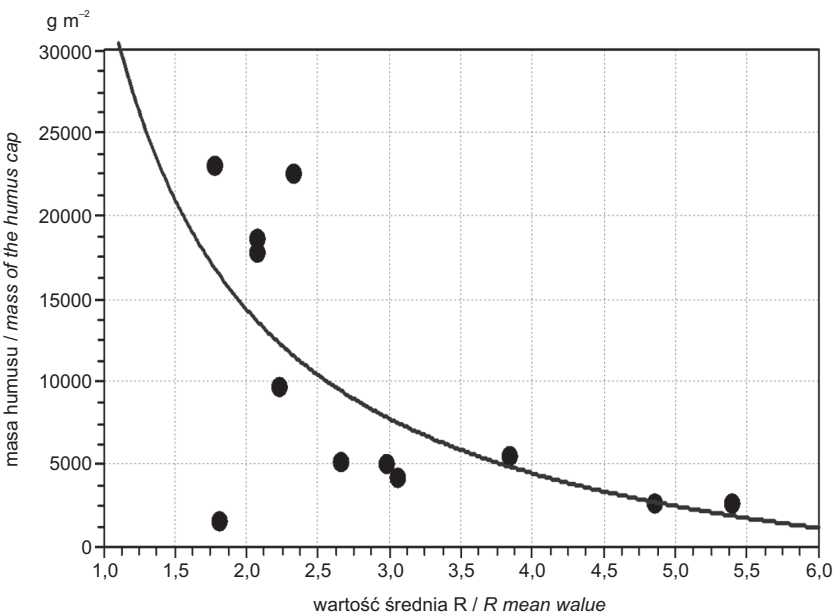
Ryc. 16. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby N i łączną biomasą mchów i porostów na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values F (moisture of the soil) and biomass of mosses and lichens at the study sites



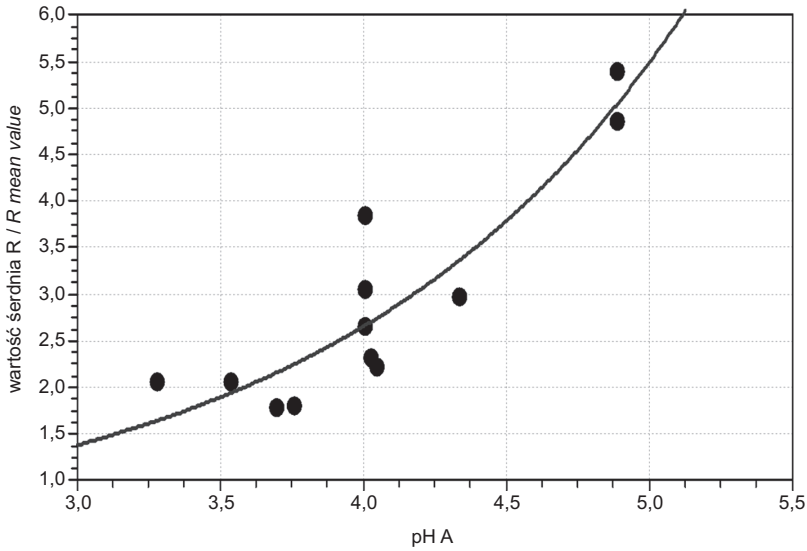
Ryc. 17. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby N i masą ściółki na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values N (nitrogen content in the soil) and mass of the litter at the study sites



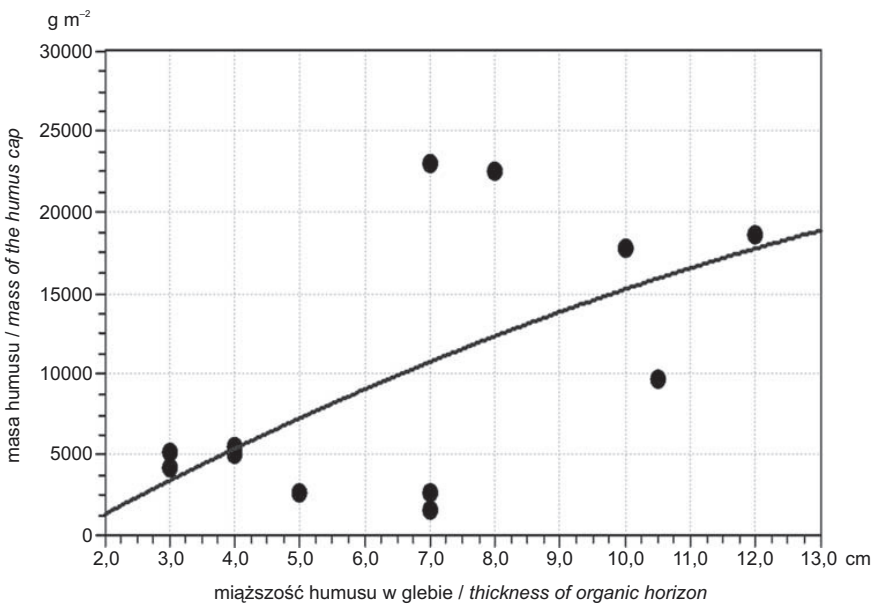
Ryc. 18. Zależności między wartościami średniej ważonej liczby R i masą humusu na stanowiskach badawczych

Relationship between mean weight indicator values R (acidity of the soil) and mass of the humus cap at the study sites



Ryc. 19. Zależności między odczynem (pH) poziomu próchnicznego gleb (A) i wartościami średniej ważonej liczby R na stanowiskach badawczych

Relationship between pH (reaction of the soil in humus "A" horizon of the soil) and mean weight indicator values R (acidity of the soil) at the study sites



Ryc. 20. Zależności miąższością humusu poziomu organicznego profilu glebowego i masą humusu na stanowiskach badawczych

Relationship between thickness of organic horizon and mass of humus cap at the study sites

– Średnia ważona F – łączna biomasa mchów i porostów: wraz ze wzrostem wilgotności siedlisk spada biomasa mchów i porostów (ryc. 13); funkcja geometryczna przy współczynniku korelacji $r = 0{,}63$ (tab. 7);
– Średnia ważona F – masa ściółki: wyraźny wzrost masy ściółki (od około 1800 do 4800 g m^{-2}) wraz ze wzrostem wilgotności siedlisk szczególnie widoczny jest w przedziale F od 5 do 6,1 (ryc. 14); zależność opisana funkcją logistyczna przy wysokiej wartości współczynnika korelacji $r = 0{,}84$ (tab. 7);
– Średnia ważona N – biomasa roślin zielnych: wraz ze wzrostem zawartości mineralnych związków azotowych w podłożu wzrasta biomasa roślin zielnych (od około 17 do 260 g m^{-2}) zwłaszcza w przedziale N 3,9–5,6 (ryc. 15); funkcja geometryczna przy wysokim współczynniku korelacji $r = 0{,}85$ (tab. 7);
– Średnia ważona N – łączna biomasa mchów i porostów: wraz ze wzrostem zawartości mineralnych związków azotowych w siedlisku następuje wyraźny spadek biomasy mchów i porostów od około 980 do nawet 16 g m^{-2} (ryc. 16); zależność opisuje funkcja logistyczna przy wysokiej wartości współczynnika korelacji $r = 0{,}87$ (tab. 7);
– Średnia ważona N – masa ściółki: wraz ze wzrostem zawartości w siedlisku mineralnych związków azotowych wzrasta także masa ściółki (od około 800 do 4800 g m^{-2}), szczególnie wyraźnie w przedziale skali azotu N 3,5–5,6 (ryc. 17); funkcja logistyczna, wysoka wartość współczynnika korelacji $r = 0{,}80$ (tab. 7);
– Średnia ważona R – masa humusu: wraz ze wzrostem „zasadowości" (zmniejszaniem kwasowości) siedlisk spada masa humusu (~23 000 do ~2600 g m^{-2}) – rycina 18; funkcja hiperboliczna przy współczynniku korelacji $r = 0{,}61$ (tab. 7).

Właściwości gleb – ekologiczne liczby wskaźnikowe zbiorowisk roślinnych

Stwierdzono istotny statystycznie związek odczynu pH poziomu próchnicznego gleb (A) z wartościami średnich ważonych R (ryc. 19). Wraz ze wzrostem pH gleby wzrastają bardzo wyraźnie wartości średnich ważonych R – od płatów, indykatorów gleb kwaśnych (R 1,7) do umiarkowanie i słabo kwaśnych (R 5,4). Zależność tę najlepiej opisuje funkcja geometryczna przy współczynniku korelacji $r=0{,}91$.

Zależność między miąższością humusu w profilu glebowym a masą humusu okazała się dodatnia (ryc. 20). Najlepiej opisuje ją funkcja kwadratowa przy współczynniku korelacji $r = 0{,}60$ (tab. 7).

Podsumowanie

Otrzymane wyniki pozwalają wnioskować, że większość analizowanych charakterystyk zmienia się w trzech płaszczyznach: geograficznej, lokalnosiedliskowej oraz oddziaływań antropogenicznych. Każda z tych płaszczyzn przejawia się

i dotyczy różnych charakterystyk ekosystemu leśnego, a ponadto jedna płaszczyzna, według której zmienia się określone zjawisko może „maskować" pozostałe. Niektóre charakterystyki podlegają przede wszystkim zmienności w przestrzeni geograficznej (według długości lub szerokości geograficznej) natomiast inne czynniki zmienności – np. lokalnosiedliskowe i antropogeniczne – można zaniedbać. Przykładami mogą być: liczba gatunków warstwy runa oraz stopień kontynentalizmu K wyrażony średnią liczbą Ellenberga, które podlegają przede wszystkim zmienności geograficznej.

Warto zwrócić uwagę, że wprawdzie wartości wskaźnika kwasowości gleb R wyrażone średnią liczbą Ellenberga także układają się geograficznie, ale obserwuje się również zróżnicowanie związane z oddziaływaniem miasta. Porównanie par stanowisk „naturalne" – „antropogeniczne" wskazuje, że stanowiska antropogenicznie przekształcone (SU) w każdym przypadku charakteryzują wyższe średnie wartości R.

Zróżnicowanie wskaźnika azotu N związane jest przede wszystkim ze zmiennością lokalnosiedliskową i podobnie jak w przypadku wskaźnika R powierzchnie „antropogeniczne" cechują się wyższymi średnimi wartościami N, co szczególnie wyraźnie przejawia się przy porównaniu stanowisk BG i SU w okolicach Irkucka. Można to częściowo tłumaczyć oddziaływaniem miasta, ale wydaje się, że ważniejszą rolę odgrywają charakter podłoża i stosunki wodne.

Ze względu na podobny typ hodowli lasu na powierzchniach „naturalnych" i „antropogenicznych" wpływ miasta na szatę roślinną uwidacznia się słabo, natomiast wyraźniejszy jest w glebie i dotyczy szczególnie akumulacji metali ciężkich. Zróżnicowanie stanowisk „naturalne"–„antropogeniczne" odbija się szybciej w charakterystykach glebowych, ponieważ gleba reaguje natychmiast po zadziałaniu czynnika sprawczego, natomiast w przypadku roślinności trzeba znacznie dłuższego czasu. W początkowych etapach następują bowiem zmiany proporcji powierzchni zajmowanej przez poszczególne gatunki roślin (co również mieści się w ramach naturalnej fluktuacji), a dopiero w następnych okresach następuje zmiana składu gatunkowego, związana z procesem synantropizacji jako efektem oddziaływań antropogenicznych.

Piśmiennictwo

Bednarek R., 1991, *Wiek, geneza i stanowisko systematyczne gleb rdzawych w świetle badań paleopedologicznych w okolicach Osia (Bory Tucholskie),* Rozprawy UMK, Toruń.

Breymeyer A., Reed D. (red.), 2003, *Patterns of pine ecosystem response to climate on a boreal temperate transect*, Polish Journal of Ecology, 51, 4.

Breymeyer A., Roo-Zielińska E. (red.), 1998, *Bory sosnowe w gradiencie kontynentalizmu i zanieczyszczeń w Europie Środkowej – badania geoekologiczne*, Dokumentacja Geograficzna, 13, IGiPZ PAN, Warszawa.

Breymeyer A., Degórski M., Roo-Zielińska E., Solon J., 2006, *Warming, continentality and pollution: large scale forces driving pine ecosystems*, Papers on Global Change IGBP, 13, s. 79–114.

Degórski M., 2002, *Przestrzenna zmienność właściwości gleb bielicoziemnych środkowej i północnej Europy a geograficzne zróżnicowanie czynników pedogenicznych*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 182, Warszawa.

–, 2007, *Spatial Variability in Podzolic Soils of Central and Northern Europe,* U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

–, 2008, *Oddziaływanie miasta na wybrane właściwości gleb w kilku europejskich i azjatyckich aglomeracjach*, Dokumentacja Geograficzna, 37, s. 150–160.

Diekmann M., 2003, *Species indicator values as an important tool in applied plant ecology – a Review*, Basic and Applied Ecology, 4, s. 1–14.

Ellenberg H., Weber H.E., Düll R., Wirth V., Werner W., Paulissen D., 1991*, Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa,* Scripta Geobotanica, 18, Göttingen.

Gillet F., 1980, *Les phytocoenoses forestieres du Jura nord-occidental. Essai de phytosociologie integree*, These, Besancon.

Julve P., Gillet F., 1994, *III. Experiences of French authors (Map 3)*, [w:] J.B. Falinski (red.), *Vegetation under the diverse anthropogenic impact as object of basic phytosociological map. Results of the international cartographical experiment organized in the Bialowieza Forest,* Phytocoenosis 6 (N.S.), Supplementum Cartographiae Geobotanicae, 4, s. 45–66.

Konecka-Betley K., 1968, *Zagadnienia żelaza w procesie glebotwórczym,* Roczniki Gleboznawcze, 1, s. 51–97.

Lindacher R., Böcker R., Bemmerlein-Lux, F.A., Kleemann, A., Haas, S., 1995, *PHANART Datenbank der Gefäßpflanzen Mitteleuropas, Erklärung der Kennzahlen, Aufbau und Inhalt*. Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH, Stiftung Rübel, Zürich.

Liski J., Westman C., *Dernsity of organic carbon in soil at coniferous forest sites in southern Finland*, Biogeochemistry, 29, s. 183–197.

Mavriščev V.V., 1980, *Sinuzialnaja struktura fitocenozov kisličnoj serii tipov lesa, Avtoreferat*, Instytut Eksperimentalnoj Botaniki AN BSSR, Minsk.

McKeague J. (red.), 1981, *Manual on Soil Sampling and Methods of Analysis*, Canadian Society of Soil Science, Prince George, British Columbia, Canada.

Means J.E., Hansen H.A., Koerper G.J., Alaback P.B., Klopsch M.W., 1994, *Software for Computing Plant Biomass – BIOPAK Users Guide*, General Technical Report PNW-GTR, 340, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.

Means J.E., Krankina O.N., Jiang H., Li H., 1996, *Estimating Live Fuels for Shrubs and Herbs with BIOPAK,* General Technical Report PNW-GTR, 372, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR.

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, s. 317–327.

Mokma D., 1983, *New chemical criteria for defining the spodic horizon*, American Journal of Soil Sciences, 47, 5, s. 972–976.

Olson D.M., Dinerstein E., Wikramanayake E.D., Burgess N.D., Powell G.V.N., Underwood E.C., D'Amico J.A., Itoua I., Strand H.E., Morrison J.C., Loucks C.J., Allnutt T.F., Ricketts T.H., Kura Y., Lamoreux J.F., Wettengel W.W., Hedao P., Kassem K.R., 2001, *Terrestrial ecoregions of the World: A new map of life on Earth*, BioScience, 51, s. 933–938.

Roo-Zielińska E., 2004, *Fitoindykacja jako narzędzie oceny środowiska fizycznogeograficznego. Podstawy teoretyczne i analiza porównawcza stosowanych metod,* Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 199, Warszawa.

Roo-Zielinska E., Solon J., 1997, *Effect of geographical location on species composition, vegetation structure, diversity and phytoindicative characteristics in pine forests,* Environmental Pollution, 98, 3, s. 347–360.

–, 1998a, *Geographical differentiation of the floristic composition and structure of the herb layer of forest permanent plots in East Germany, Poland and Belarus*, [w:] *Proceedings of the International Symposium on Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems*, *February 5–9, 1996, Riverside, California*, General Technical Report, PSIO-GTR, 164,U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, s. 151–160.

–, 1998b, *Herb layer diversity and phytoindicative evaluation of habitat conditions of forest permanent plots in Poland*, [w:] *Proceedings of the International Symposium on Air Pollution and Climate Change Effects on Forest Ecosystems, February 5–9, 1996, Riverside, California,* General Technical Report, PSIO-GTR, 164, U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Northwest Research Station, Portland, OR, s. 161–168.

Schaffers A.P., Sykora K.V., 2000, *Reliability of Ellenberg indicator values for moisture, nitrogen and soil reaction: a comparison with field measurements*, Journal of Vegetation Science, 11, s. 225–244.

Solon J., 1998, *Różnorodność gatunkowa borów i borów mieszanych na transektach badawczych: klimatycznym (wzdłuż 52°N, 12–32°E) i „śląskim”,* [w:] A. Breymeyer i E. Roo-Zielińska (red.), *Bory sosnowe w gradiencie kontynentalizmu i zanieczyszczeń w Europie Środkowej – badania geoekologiczne*, Dokumentacja Geograficzna, 13, IGiPZ PAN, Warszawa, s. 113–130.

Solon J., Roo-Zielińska E., 1998, *Zróżnicowanie struktury runa borów i borów mieszanych na transektach badawczych: klimatycznym (wzdłuż 52°N, 12–32°E) i „śląskim”*, [w:] A. Breymeyer, E. Roo-Zielińska (red.), *Bory sosnowe w gradiencie kontynentalizmu i zanieczyszczeń w Europie Środkowej – badania geoekologiczne,* Dokumentacja Geograficzna, 13, IGiPZ PAN, Warszawa, s. 99–112.

–, 2003, *Ground vegetation carbon and its relation to climate and species richness*, Polish Journal of Ecology, 51, 4, s. 513–527.

Systematyka Gleb Polski, 1989, PTG, Roczniki Gleboznawcze, 40, 3/4, s. 157–177.

Ulrich B., 1981, *Okologische Gruppierung von Boden nach ihrem chemischen Bodenzustand*, Zeitschrift für Pflanzernährung und Bodenkunden, 144, s. 289–305.

Van Reeuwijk L., 1995, *Procedures of soil analysis*, Technical Paper, 9, International Soil Reference and Information Centre, Wageningen, The Netherlands.

World Reference Base for Soil Resources (WRB), 1998, World Soil Resources Reports, 84, FAO, SRIC and ISSS, Rome.

World Reference Base for Soil Resources (WRB). A Framework for International Classification Correlation and Communication, 2006, World Soil Resources Reports, 103, FAO, Rome.

[Wpłynęło: lipiec; poprawiono: grudzień 2008 r.]

EWA ROO-ZIELIŃSKA, JERZY SOLON, MAREK DEGÓRSKI

DIFFERENTIATION OF PINE FORESTS AS AN EFFECT OF GEOGRAPHICAL AND HABITAT CONDITIONS FROM THE NETHERLANDS TO IRKUTSK (5°91'–104°8' E)

The study was carried out at six localities, with each locality comprising two study sites. The maximum distance between localities is more than 6,000 km east-west. The sites are located within two major bioclimatic zones, the taiga (two sites near St. Petersburg, one near Perm and one near Irkutsk) and the mixed forest zone (Sweden, The Netherlands, Poland and one site near Perm). One site near Irkutsk (Irkutsk BG) is biogeographically unique, being located in the South Siberian forest steppe ecoregion.

Most sites represent *Vaccinio-Piceetea* pine forest communities. All soils at the study sites can be classified as Haplic Podzols and Dystric Arenosols, developed from glaciofluvial sands. Only the soils at the Irkutsk site have developed from deluvial deposits of volcanic rock, sands, and Cambrian, Ordovician and Silurian dolomites and marls, with the grain-size composition of light dusty clays and medium clays. All soils demonstrate an acidic reaction, ranging from very acidic (sites in The Netherlands and Sweden) to slightly acidic (Irkutsk), and are also characterized by an endopercolate hydrological regime and different stages of podzolisation.

The basis for the description of the 12 study sites (6 background and 6 suburban) was:

(1) vegetation – a floristic characterization of the patch of vegetation representing a given type of community, recorded in the form of a phytosociological record. Descriptions of the forest floor (synusial structure) and the biomass heterogeneity of shrubs, the herb layer, litter, and humus were provided. Ellenberg indicator values were used to determine the requirements of herb-layer plant species with regard to light intensity (L), degree of continentality (K), soil moisture content (F), acidity (R) and nitrogen content in the soil (N);

(2) soil – soil material was obtained in mixed samples for each genetic horizon of the soils from 3 locations at each of the study sites. Morphological features were identified for each soil profile, including thickness of soil horizons, as the arithmetic mean of 10 measurements, with the classification of pedons following the soil taxonomy system currently used in Poland and by the WRB (World Reference Base for Soil Resources). Physical and chemical properties of the soils were determined.

Statistical analysis was confined to the simplest procedures, including the determination of means and standard deviations and investigation of relationships between variables using regression models. Calculations were made using the Excel and CurveExpert 1.3 programs.

The results of the study sustain the conclusion that most of the parameters analysed change along geographical, local habitat-related and anthropogenic pressure-related planes. Each of these planes influences and concerns different characteristics of the forest ecosystem. Additionally, the plane along which a particular phenomenon changes may "mask" the other planes. Thus, some characteristics are largely subject to geographical variability (along a gradient of latitude or longitude), while other determinants of variability – e.g. the local habitat-related or anthropogenic – are negligible. For

example, the number of species of ground vegetation or the degree of continentality (K) expressed as Ellenberg's average indicator values are primarily subject to geographical variability, while the effect of other determinants is not significant. While the values for acidity expressed as the average for Ellenberg indicator values also change along a geographical gradient, there is also diversification associated with the effect of urban pressure. A comparison of pairs of background and suburban sites (BG and SU) indicates that anthropogenically transformed sites invariably have higher mean values of R. Diversification noted for the nitrogen indicator (N-value) is primarily associated with local habitat variability and, as with the R indicator, suburban sites have higher mean values for N, with a particularly conspicuous difference between the BG and SU sites near Irkutsk. The differentiation of the nitrogen indicator (N-value) between the study sites is primarily associated with local habitat variability. Observed differences between BG and SU sites (particularly conspicuous in the case of Irkutsk) can only be partly ascribed to urban pressures; it appears that substrate characteristics and water relations play a more important role. Since similar forestry policies are pursued at background and suburban sites, plant cover hardly reflects urban pressure. However, this is more evident in the soil, especially with regard to the accumulation of heavy metals. The most rapid divergences between background and suburban sites can be observed in relation to soil properties, since soil responds most quickly to a causative factor, whereas anthropogenic changes in vegetation take a much longer time to come to light unequivocally. Importantly, initial stages are characterized by changes in the cover of individual plant species (which fall within the natural range of fluctuation), and it is only during subsequent stages that it becomes possible to note changes in species composition associated with synanthropisation as the aftermath of anthropogenic pressure.