

STEFAN WITOLD ALEXANDROWICZ  
Akademia Górniczo-Hutnicza

## WSPÓLCZYNNIK RÓŻNORODNOŚCI NDI I JEGO ZASTOSOWANIE W NAUKACH GEOLOGICZNYCH

UKD 56.012.1/.2:519.26/.27:311.14NDI.002.614.005

Ważną cechą każdego zbioru obejmującego składniki reprezentowane przez określoną ilość elementów jest stopień jego zróżnicowania. Liczbowe określenie tej cechy umożliwia porównywanie, porządkowanie i hierarchizowanie zbiorów, a także pozwala na analizowanie związków pomiędzy różnorodnością zbioru a innymi, charakteryzującymi go cechami. Współczynniki zróżnicowania są stosowane najczęściej w badaniach ekologicznych, niektóre z nich były również używane dla opisu zespołów skamieniałości. Mogą one również z powodzeniem służyć w analizie

innych materiałów geologicznych, zwłaszcza przy interpretowaniu danych z zakresu litologii, petrografii i sedymentologii.

Zróżnicowanie zbioru wyrażone stopniem jego różnorodności lub jednorodności może być rozpatrywane przynajmniej w dwóch aspektach. W najprostszym ujęciu wyrazem tej cechy jest ilość składników bez uwzględniania ich liczebności. I tak np.: piaskowiec (arkoza, szarogłaz) lub zlepieniec może składać się wyłącznie lub niemal wyłącznie z ziarn lub otoczków kwarcu — jest on wtedy

określany jako monomiktyczny, ewentualnie oligomiktyczny, czyli jednorodny, niezróżnicowany. W przypadku alternatywnym, gdy w skład takiej skały wchodzi ziarna kilku lub kilkunastu różnych minerałów czy też otoczaki wielu różnych skał, jest to piaskowiec albo zlepienie polimiktyczne czyli silnie zróżnicowany. Wśród zespołów otwornic najczęściej spotykamy asocjacje obejmujące kilkadziesiąt, rzadziej – kilka taksonów, a w sporadycznych przypadkach jeden lub dwa taksony. Ta cecha zespołów mikroskamieniałości została uznana przez wielu autorów za szczególnie ważną dla wnioskowania o kopalnych środowiskach i paleoekologicznych warunkach rozwoju fauny. Za prosty sposób liczbowego jej wyrażania można uznać wskaźnik podający ilość taksonów przypadającą na 100 okazów wybranych losowo z analizowanej asocjacji (4). Inne rozwiązanie, zaproponowane przez C.B. Williamsa omówił szczegółowo R.A. Reyment (5), propagując je dla celów analizy paleoekologicznej. Polega ono na wykorzystaniu relacji między ilością taksonów – S a ilością osobników – N badanego zespołu w stosunku do wskaźnika różnorodności  $\alpha$ , wynikającego z uogólnionej zależności między S a N, wyprowadzonej przez R.A. Fishera (5, 6).

Bardziej zaawansowane i precyzyjne ujęcie zróżnicowania zbioru polega na określeniu struktury dominacji, która uwzględnia zarówno ilość składników jak też liczebność każdego z nich. W formie graficznej może ona być zaprezentowana jako szereg odcinków równoległych i równoodległych od siebie. Każdy z nich odpowiada jednemu składnikowi zbioru, a jego długość wyraża procentowy udział danego składnika w zbiorze. Odcinki są uporządkowane od największego do najmniejszego. Wykres, na którym jeden odcinek jest bardzo długi a nieliczne pozostałe są bardzo małe przedstawia zbiór mało zróżnicowany, jednorodny. W przypadku, gdy wielkość odcinków niewiele różni się od siebie, a ilość ich jest znaczna wykres odpowiada zbiorowi, który można uznać za silnie zróżnicowany. Graficzne ujęcie struktury dominacji było stosowane przez kilku autorów, m.in. w analizie subfosylnych zespołów mięczaków czwartorzędowych (1).

Struktura dominacji może być wyrażona liczbowo jako współczynnik ujmujący ilość składników w zbiorze oraz ilość elementów reprezentujących każdy składnik. Wprowadzenie takiego współczynnika polega na założeniu, że zbiór jest jednorodny, gdy dominacja głównego składnika nad pozostałymi jest bardzo znaczna, a w skrajnym przypadku mamy do czynienia tylko z jednym składnikiem; natomiast zbiór jest uznawany za niejednorodny, gdy każdy składnik jest inny, a więc liczebność jego wynosi 1. Zdefiniowane i opisane dotychczas wskaźniki były stosowane głównie w badaniach ekologicznych, a najważniejsze z nich zestawili i omówił Z. Witkowski (6).

Najbardziej znany i najczęściej używany jest wzór Shannona i Weavera, wielokrotnie cytowany w literaturze, m.in. w niektórych polskich podręcznikach (2, 3). Jest on wyrażony prostą zależnością:

$$H = - \sum_{i=1}^s p_i \ln p_i$$

gdzie:  $s$  oznacza ilość składników w zbiorze (np. ilość taksonów w zespole skamieniałości) a  $p_i$  – liczebność każdego z nich. Gdy zbiór jest zupełnie jednorodny, czyli monomiktyczny ( $s = 1$ ), współczynnik  $H$  przybiera wartość proporcjonalną do liczebności jedynego składnika ( $p_1$ ). W miarę wzrostu stopnia zróżnicowania analizowanych zbiorów wielkość współczynnika wzrasta zgodnie

z przebiegiem funkcji logarymicznej. Omawiany współczynnik dobrze oddziela zbiory o różnej jednorodności, jednak ze względu na to, że uzyskiwane wyniki obliczeń nie są wyrażone w liczbach znormalizowanych (np. w przedziale 0–1 lub 0–100), możliwość ich bezpośredniego porównywania jest ograniczona. Dotyczy to zwłaszcza przypadków, gdy badane zbiory różnią się od siebie pod względem ogólnej liczebności elementów (gdy porównujemy jednorodność zbiorów dużych i małych, o różnej wartości  $s$ ). Ograniczenie to można pominąć przez wprowadzenie czynnika normalizującego rezultaty obliczeń. Operacja taka prowadzi do zdefiniowania współczynnika względnej różnorodności zbioru, który przybiera ogólną postać:  $H_r = \frac{H}{H_m}$ , gdzie:  $H_m$  wyraża maksymalną wartość  $H$  dla danej liczebności składników ( $s$ ). Taki właśnie współczynnik ( $H_r$ ) jest rekomendowany w analizie facjalnej (3). Jest on dogodny do stosowania, gdy porównywane ze sobą zbiory wykazują tę samą lub przynajmniej zbliżoną ilość składników. W innym przypadku, konieczność każdorazowego wyznaczania wartości  $H_m$  powoduje, że tok obliczeń jest znacznie bardziej skomplikowany i pracochłonny. Z reguły ma to miejsce przy określaniu stopnia jednorodności zespołów skamieniałości, a także w analizach litologicznych, petrograficznych i innych.

Nowy współczynnik różnorodności – NDI, zaproponowany i wyznaczony przez autora został zaprezentowany na X Sympozjum „Zastosowanie metod matematycznych i informatyki w geologii”, współorganizowanym przez Akademię Górniczo-Hutniczą, w styczniu 1982 r. Opiera się on na założeniu, że sumę iloczynów liczebności każdego składnika i logarytmu tej wartości, występującej w liczniku wzoru na obliczenie  $H_r$ , można z powodzeniem zastąpić przez inną zależność. Podstawową rolę odgrywa tu różnica między kwadratem ogólnej liczebności zbioru ( $n^2$ ) a sumą kwadratów liczebności poszczególnych jego składników ( $\sum p_i^2$ ). Gdy zbiór jest zupełnie jednorodny, a więc obejmuje tylko jeden składnik,  $n = p$ , a wartość  $n^2 - \sum p_i^2 = 0$ . W przypadku zbioru maksymalnie różnorodnego, każdy jego składnik jest inny a liczebność każdego z nich wynosi 1. Omawiana różnica przybiera wtedy postać  $n^2 - n$ . Ta właśnie wartość wprowadzona do mianownika pozwala na znormalizowanie nowego współczynnika, który w konsekwencji przyjmuje prostą postać:

$$NDI = \frac{n^2 - \sum p_i^2}{n^2 - n}$$

gdzie:  $n$  oznacza ogólną liczebność zbioru,  $s$  – ilość jego składników, a  $p_i$  – ilość elementów w obrębie każdego ( $i$ -tego) składnika. Współczynnik NDI przyjmuje wartości w przedziale 0–1, przez co nadaje się on bardzo dobrze do bezpośredniego porównywania jednorodności (różnorodności) zbiorów, niezależnie od tego ile składników i elementów wchodzi w skład każdego z nich.

Przedstawiony współczynnik, podobnie jak wzór Shannona i Weavera wykazuje słabą zależność w stosunku do ogólnej liczebności zbioru. Wartość jego podwyższa się nieznacznie w przypadku, gdy zbiór o tej samej strukturze dominacji zawiera większą ilość elementów. Wspomniana zależność nie wpływa na ostateczny wynik obliczeń, a w szczególności na ich interpretację, bowiem 10-krotne powiększenie ilości elementów ( $n$ ) powoduje wzrost wartości NDI zaledwie o parę procent.

Relacja między współczynnikami  $H_r$  i NDI została orientacyjnie oceniona przez określenie zróżnicowania zespołów mikrofauny z zastosowaniem obu wzorów i bez-

pośrednie porównanie wyników. Przedmiotem analizy było 26 próbek, obejmujących w sumie 82 taksony. Zespoły skamieniałości występujące w poszczególnych próbkach zawierały różną ilość taksonów, wahającą się w granicach 12–62, reprezentowanych przez różną ilość okazów (52–376). Wartości  $H_r$  i NDI obliczone dla każdej asocjacji zostały naniesione na wykres, który wykazał istnienie wyraźnej zależności liniowej pomiędzy oboma współczynnikami. Wyraża się ona współczynnikiem korelacji  $r = 0,87$  oraz wzorem regresji liniowej:  $NDI = 0,12 + 1,05 H_r$ . Wobec liczebności próby  $n = 26$  cytowany współczynnik korelacji jest istotny na poziomie ufności .001. Wyników przeprowadzonej analizy nie należy uogólniać, zdają się one jednak wskazywać, że nowo zdefiniowany współczynnik różnorodności NDI (normalized diversity index) może być uznany za ekwiwalentny w stosunku do współczynnika  $H_r$  (a także  $H$ ) Shannona i Weavera. Główną zaletą NDI jest przy tym łatwość i mała pracochłonność obliczeń, które można efektywnie realizować przy zastosowaniu najprostszych kalkulatorów, a nawet bez nich.

Wskaźnik różnorodności NDI był stosowany przez autora przy interpretowaniu wyników badań w różnych dziedzinach nauk geologicznych. Obliczenia zostały przeprowadzone na następujących materiałach:

- przy ocenie charakteru zespołów malakofauny późnego glaciału i holocenu południowej Polski;
- w analizie zmienności zespołów otwornic górnej kredy i miocenu okolic Krakowa;
- w analizach minerałów ciężkich z piaskowców fliszowych;
- w analizach składu żwirów Dunajca z różnych części jego doliny.

Rezultaty tych obliczeń pozwalają na stwierdzenie, że opisany współczynnik ułatwia charakterystykę zbiorów i wprowadza nowe elementy dla interpretacji ich zróżnicowania, a zwłaszcza umożliwia wnioskowanie w zakresie: zmienności środowisk ekologicznych, stopnia dojrzałości osadów itp. Można przypuszczać, że znajdzie on również zastosowanie w innych naukach o Ziemi.

W badaniach nad zespołami skamieniałości, w tym głównie w analizach paleoekologicznych, wartości współczynnika NDI, jak też wszystkich innych współczynników zróżnicowania zbioru nie charakteryzują w sposób dostateczny stopnia zróżnicowania czy jednorodności asocjacji faunistycznych lub florystycznych. Obok wartości współczynnika obrazującego strukturę dominacji, duże znaczenie interpretacyjne można przypisać również ilości taksonów, a zwłaszcza gatunków wchodzących w skład zespołu. Cechę tę wraz z wartością współczynnika NDI, obliczonego dla każdej próbki (każdej asocjacji), należy przedstawić na wykresie w układzie współrzędnych prostokątnych. Punkty odpowiadające poszczególnym próbkom rozdziela się wtedy na cztery grupy:

- I – zbiory o małej liczbie taksonów z jednym ilościowo dominującym – zespoły ubogie – jednorodne;
- II – zbiory o małej liczbie taksonów reprezentowanych przez podobne ilości osobników – zbiory ubogie – zróżnicowane;
- III – zbiory o dużej liczbie taksonów z jednym ilościowo dominującym – zespoły bogate – jednorodne;

IV – zbiory o dużej liczbie taksonów, występujących w wyrównanych proporcjach ilościowych – zespoły bogate – różnorodne.

Rozkład punktów na takim diagramie bardzo dobrze ilustruje zróżnicowanie zespołów skamieniałości i, jak to wynika z kilku prób przeprowadzonych przez autora, znacznie wzbogaca i pogłębia interpretacje paleoekologiczne.

## LITERATURA

1. Evans J.G. – Land snails in archeology. Seminar Press, London–New York 1972.
2. Gradziński R., KostECKA A. et al. – Sedymentologia. Wyd. Geol. 1976.
3. Kasprzak K., Niedbała W. – Wskaźniki biocenotyczne stosowane przy porządkowaniu i analizie danych w badaniach ilościowych. [W:] Metody stosowane w zoologii gleby. PWN 1981.
4. Murray J.W. – Distribution and ecology of living benthic Foraminiferas. Heinemann Educational Books, London 1973.
5. Reyment R.A. – Introduction to quantitative paleoecology. Elsevier Publ. Comp. Amsterdam 1971.
6. Witkowski Z. – Zagadnienie różnorodności gatunkowej w badaniach biocenotycznych. Wiad. Ekolog. 1970 z. 2.

## SUMMARY

Normalized diversity index (NDI) is useful in evaluating diversity or homogeneity of fossil assemblages, expressed by structure of domination. It is normalized and its values are varying from 0 to 1. In calculations 0 indicates a homogeneous, unicomponent assemblage, and 1 – the maximum diversity of an assemblage, in which each component is represented by a single element only (e.g., each species by one specimen). Comparisons of relations between the above defined index and that of Shannon and Weaver showed that they give comparable and quite equivalent results but the former appears much simpler to calculate.

## РЕЗЮМЕ

Коефициент разнородности НДИ служит для определения разнородности или однородности комплексов окаменелостей, выраженной структурой доминирования. Он нормализован и его величины находятся в пределах 0–1. В вычислениях 0 соответствует однородному, однокомпонентному комплексу, а 1 – максимально разнородному, в котором каждый компонент представлен одним элементом (нпр. каждый вид – одним образцом). Оценка соотношения между новым определенным коэффициентом и указателем Шанона и Вевера указывает на то, что обе формулы дают сравнительные и в большой степени эквивалентные результаты, с тем, что указатель НДИ отличается очень малой трудоемкостью вычислений.