

---

**PRACE**

**Instytutu Ceramiki  
i Materiałów Budowlanych**

---

***Scientific Works***  
of Institute of Ceramics  
and Building Materials

---

**Nr 22**  
(lipiec–wrzesień)

Prace są indeksowane w BazTech i Index Copernicus

ISSN 1899-3230

**Rok VIII**

**Warszawa–Opole 2015**

---

AGNIESZKA SZEWCZYK\*

# Przegląd metod określania eutrofizacji wód powierzchniowych

**Słowa kluczowe:** eutrofizacja, wody powierzchniowe, metody oceny stanu trofii.

Pojęcie „eutrofizacja” pochodzi od greckiego słowa *eutrophos* (*eu* – dobrze, *trophos* – pokarm, pożywienie) i określa proces wzrostu zawartości substancji biogennych w wodach powierzchniowych lub podziemnych. Na wzrost trofii wód powierzchniowych wpływa wiele czynników: temperatura, światło, zawartość substancji odżywczych oraz właściwości morfologiczne i hydrobiologiczne. Na niekorzystne konsekwencje eutrofizacji najbardziej narażone są słodkowodne jeziora i zbiorniki, lecz w ostatnich dziesięcioleciach, na skutek intensywnej działalności gospodarczej, zjawisko to coraz częściej występuje w wodach morskich oraz w wodach płynących. Do podstawowych czynników mających wpływ na procesy eutrofizacji należą związki fosforu i azotu. Celem pracy było dokonanie przeglądu literaturowego pod względem ogólnie przyjętych metod wyznaczania stopnia eutrofizacji.

## 1. Wstęp

Na przełomie ostatnich lat nastąpił nagły wzrost stopnia zanieczyszczenia środowiska, który związany jest z rozwojem gospodarczym. Narażone zostały wszystkie komponenty środowiska naturalnego, a przede wszystkim woda, która jest niezbędna do prawidłowego funkcjonowania wszystkich organizmów żywych i bez której życie na Ziemi nie miałoby racji bytu. Jednym z poważniejszych zagrożeń dotyczących wód są procesy eutrofizacji, które postępując prowadzą do pogorszenia się jakości wód, spadku bioróżnorodności, a nawet do przekształcenia się zbiorników w obszary bagienne lub do całkowitego ich wyschnięcia. Eutrofizacja w rozumieniu dyrektyw UE odnosi się do niepożądanych efektów spowodowanych zwiększeniem obciążenia wód ładunkiem związków biogennych na skutek działalności człowieka. Eutrofizacja to proces nadmiernego wzbogacenia

---

\* Mgr, Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych w Warszawie, Oddział Inżynierii Procesowej Materiałów Budowlanych w Opolu, a.szewczyk@icimb.pl

wód w składniki odżywcze, które zazwyczaj powodują problemy związane ze wzrostem makrofitów, glonów lub sinic.

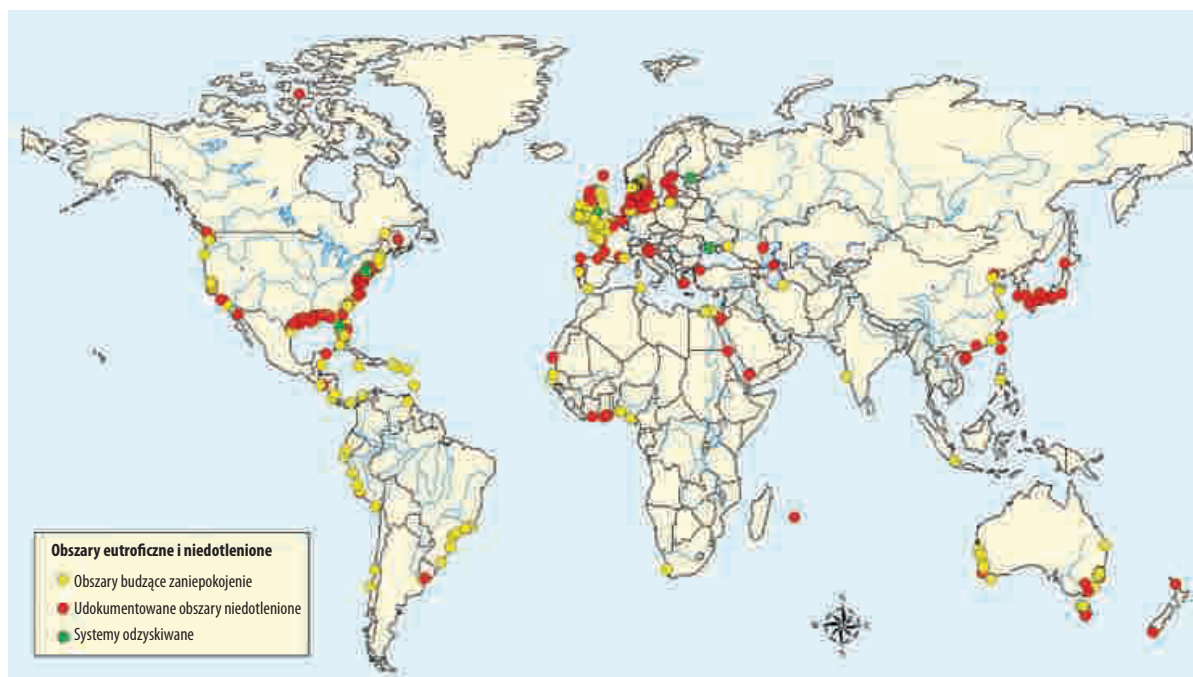
Biorąc pod uwagę geologiczną historię jezior, najczęściej sądzi się, że eutrofizacja jest procesem naturalnym. Większość jezior, zwłaszcza polodowcowych, na początku była oligotroficzna, jednak ciągły dopływ do nich substancji z zewnątrz (np. ze zlewni i atmosfery), powodował wzrost koncentracji biogenów, a tym samym zwiększał trofię zbiornika. Normalnie jest to proces powolny, ale został on mocno przyspieszony w wyniku działań człowieka, takich jak zrzuty ścieków przemysłowych i komunalnych oraz intensyfikacja rolnictwa.

Według ustawy Prawo wodne eutrofizacja oznacza wzbogacenie wody substancjami biogennymi w szczególności związkami azotu lub fosforu, powodującymi przyspieszony wzrost glonów oraz wyższych form życia roślinnego, w wyniku którego następują niepożądane zakłócenia biologiczne w środowisku wodnym oraz pogorszenie jakości wód [1].

Eutrofizacja to jest proces postępujący i składający się z kilku etapów. Pierwszym symptomem jest użyczenie wód, wzrost ilości składników odżywczych, tym samym wzrost liczebności fitoplanktonu, glonów nitkowatych, roślin wyższych, ryb, namnażanie się martwej materii organicznej oraz pojawiające się zakwity glonów. Następnie ma miejsce zahamowanie fotosyntezy, obumieranie roślinności wodnej, wydzielanie toksycznych gazów (siarkowodoru) oraz zmiany w składzie i wyglądzie wód. W kolejnym etapie następuje zubożenie wody w tlen, ograniczenie przenikania światła, za czym idzie spadek jakości wody i pojawienie się zagrożeń dla fauny i flory. Wskutek zakwitu w górnych warstwach wody obserwuje się wahania stężenia tlenu oraz zmiany odczynu. Te procesy przyczyniają się do powstawania obszarów wodnych, w których zapasy tlenu zostały wyczerpane, tzw. pustynie tlenowe. Ostatnim zaawansowanym etapem eutrofizacji jest wymieranie orgazmów tlenowych, narastanie osadów dennych, które w konsekwencji przekształcają się w obszar bagienny, co prowadzi do całkowitego wyschnięcia zbiorników wodnych [2–3].

W ciągu ostatnich 50 lat eutrofizacja stała się jedną z głównych przyczyn pogorszenia się jakości wód. Badania przeprowadzone na ponad 400 obszarach dotkniętych problemem eutrofizacji, zlokalizowanych na całym świecie, wykazały globalną skalę problemu (ryc. 1) [4].

Eutrofizacja dotyczy wszystkich wód powierzchniowych: mórz, rzek oraz jezior na całym świecie [5–7].



Ryc. 1. Obszary dotknięte problemem niedotlenienia i eutrofizacji wód [4]

Rycina 1 przedstawia mapę z zaznaczonymi obszarami, które zostały dotknięte procesem eutrofizacji. Kolorem żółtym zaznaczono obszary wykazujące stopniowy wzrost trofii, kolorem czerwonym – udokumentowane obszary dotknięte problemem niedotlenienia, natomiast kolor zielony to ekosystemy, w których zaobserwowano regenerację i poprawę stanu jakości wód.

## 2. Metody wyznaczania stopnia eutrofizacji

Stopień postępu eutrofizacji może być oceniany różnymi metodami, które opierają się głównie na właściwościach fizykochemicznych, najczęściej oznacza się pH oraz przezroczystość [8]. W celu oceny eutrofizacji zarówno w wodach płynących, jak i stojących analizowane są średnie roczne stężenia związków azotu, fosforu oraz chlorofilu „a” w odniesieniu do wartości granicznych określonych w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 9 listopada 2011 r. [9]. Na przełomie XXI w. naukowcy opracowali wyznaczniki, jakie powinien spełniać odpowiedni wskaźnik środowiska. Właściwości określające dobry wskaźnik środowiska to: łatwość użycia, wrażliwość na małe zmiany zachodzące w środowisku, niezależność od próbek kontrolnych i wzorcowych, różnorodność zastosowania oraz dostosowanie do jak największej ilości ekosystemów [10].

Już na początku wieku XX zaczęto interesować się zróżnicowaniem wód pod kątem zawartości materii organicznej. August Thienemann podzielił jeziora na typ bałtycki i alpejski, sugerując się zawartością tlenu, następnie Einar Naumann zróżnicował jeziora na oligotroficzne i eutroficzne. Obecnie ogólnie przyjęte są proste

wskaźniki do oceny stanu troficznego wód, należą do nich: azot amonowy, azot azotanowy, azot azotynowy, fosforany, fosfor całkowity, azot Kjeldahla, chlorofil a, frakcje glinu, widzialność krążka Secchiego, a także na podstawie oceny wizualnej. Jednak brakuje uniwersalnej metody oceny stanu troficzności [11].

Jako jeden z najpopularniejszych stosowany jest tzn. wskaźnik zawartości węgla organicznego wynaleziony przez Nixona, który określa zawartość organicznego węgla, według przelicznika:  $\text{gC/m}^2 \cdot \text{rok}$ . Według Scotta Nixona eutrofizacja to ciągły przyrost materii organicznej do danego ekosystemu, sklasyfikował on akweny pod względem zawartości węgla organicznego:

- oligotroficzne –  $< 100 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{rok}$ ,
- mezotroficzne –  $100\text{--}300 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{rok}$ ,
- eutroficzne –  $301\text{--}500 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{rok}$ ,
- hipertroficzne –  $> 500 \text{ gC/m}^2 \cdot \text{rok}$  [12].

O wiele bardziej wiarygodne są wskaźniki uwzględniające kilka parametrów, są to tzn. wskaźniki integralne. Powszechnie stosowanym wskaźnikiem łączącym kilka parametrów jest indeks stanu troficznego (Trophic State Index – TSI), zaproponowany przez Carlsona w 1977 r. [13]. Wskaźnik ten składa się z trzech wzorów, umożliwiających wyznaczenie stanu troficznego zbiornika wodnego:

$$TSI(SD) = 60 - 14,41 \ln(SD)$$

$$TSI(CHL) = 9,81 \ln(CHL) + 30,6$$

$$TSI(TP) = 14,42 \ln(TP) + 4,15,$$

gdzie:

*SD* – widzialność krążka Secchiego,

*CHL* – chlorofil a,

*TP* – fosfor całkowity.

Kolejnym integralnym wskaźnikiem stanu eutrofizacji jest TRIX Trophic State, opracowany przez R. Vollenweidera [14]. Początkowo stosowano go tylko do oznaczania wód Wenecji. Jednak posiada on swoją uniwersalną wersję UNTRIX i służy on do określania stanu biologicznego różnych wód na terenie całej Europy. Wskaźnik TRIX przedstawia się wzorem:

$$TRIX = \frac{\log_{10} Cha + \log_{10} aD\%O + \log_{10} DIN + \log_{10} TP - k}{m},$$

gdzie:

*Cha* – chlorofil a [ $\mu\text{g/l}$ ],

*aD%O* – odchylenie bezwzględne z nasycenia wody tlenem,

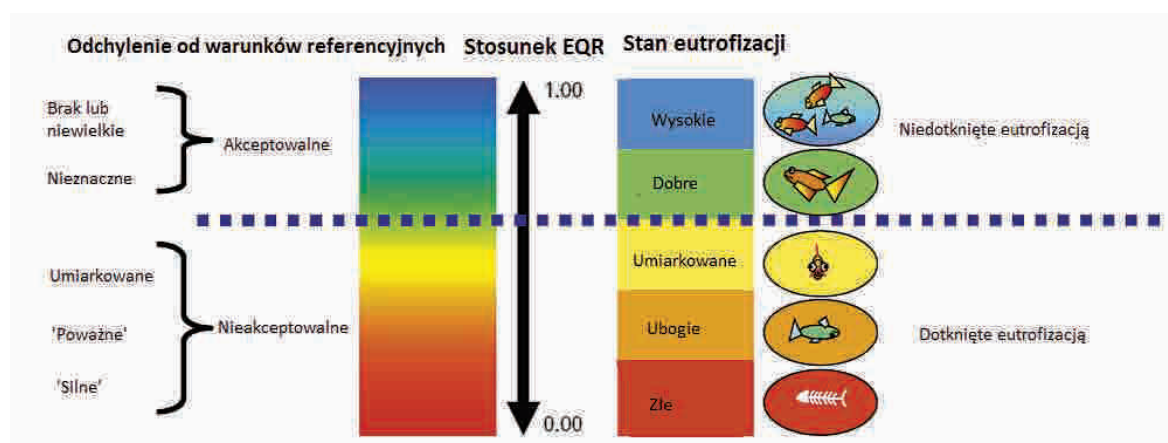
*DIN* – rozpuszony azot nieorganiczny [ $\mu\text{g/l}$ ],

*TP* – fosfor całkowity,

*k* – stała = 1,5,

*m* – stała = 1,2.

Eutrofizacja to główny problem Morza Bałtyckiego, dlatego Komisja Ochrony Środowiska Morskiego Bałtyku HELCOM (The Baltic Marine Environment Protection Commission) wykreowała HEAT (Helcom eutrophication assessment tool). Wskaźnik HEAT służy do określenia jakości wody pod kątem zanieczyszczeń eutroficznych. Składają się na niego różne czynniki, pierwotne (stężenia azotu i fosforu, widzialność krążka Secchiego oraz chlorofil a) oraz wtórne (różnorodność gatunkową, a także wysokość traw morskich). Na podstawie tych wszystkich składowych wyznacza się status eutrofizacji, który przyjmuje wartości od bardzo dobrego do złego (ryc. 2) [15].



Ryc. 2. Klasyfikacja wód według wskaźnika HEAT [15]

Stan trofii można określić na podstawie indeksu eutrofizacji (EI – eutrophication index), bazującego na stężeniach azotu fosforu i chlorofilu a. Indeks wyraża się wzorem:

$$EI = 0,279 C_{PO4} + 0,261 C_{NO3} + 0,275 C_{NH3} + 0,214 C_{Chl} .$$

Wartości współczynników przy każdym ze składników równania zostały obliczone na podstawie analizy PCA (analiza głównych składowych) z danych pochodzących z akwenów o znanym stanie troficzności. Otrzymany indeks eutrofizacji z powodzeniem został zastosowany do oceny wód przybrzeżnych Morza Egejskiego [16].

Kolejnym wskaźnikiem oceniającym stopień postępu eutrofizacji wód jest indeks WQI (Water Quality Indeks – indeks jakości wody), został on opracowany przez amerykańskich naukowców i zawierał takie wskaźniki, jak: rozpuszczony tlen, bakterie grupy Coli typu kałowego, pH, biochemiczne zapotrzebowanie na tlen ( $BZT_5$ ), zmiana temperatury, fosforany, azotany, mętność, cząstki zawieszane, każdy wskaźnik miał swoją ustaloną wagę, aby uzyskać wartości, każdy ze wskaźników mnoży się przez ich wagi. Wskaźnik WQI stosowany jest do oceny jakości rzek i jezior w USA [17].



Do oceny stanu wód przybrzeżnych w Chinach stosuje się indeks NIM (Nutrient Index Method), zaproponowany przez Narodowe Chińskie Centrum Monitoringu Środowiska [18]. Indeks uwzględnia pomiary wartości chemicznego zapotrzebowania na tlen, stężeń azotu, fosforu ogólnego oraz chlorofilu a. Wartość wyższa od 4 klasyfikuje wodę jako eutroficzną. Indeks oblicza się na podstawie następującego wzoru [19]:

$$NIM = C_{COD}/S_{COD} + C_{TN}/S_{TN} + C_{TP}/S_{TP} + C_{Chl}/S_{Chl},$$

gdzie:

- $C_{COD}$  – chemiczne zapotrzebowanie na tlen [mg/dm<sup>3</sup>],
- $S_{COD}$  – referencyjne zapotrzebowanie na tlen [mg/dm<sup>3</sup>],
- $C_{TN}$  – zawartość azotu ogólnego [mg/dm<sup>3</sup>],
- $S_{TN}$  – referencyjna zawartość azotu ogólnego [mg/dm<sup>3</sup>],
- $C_{TP}$  – zawartość fosforu ogólnego [mg/dm<sup>3</sup>],
- $S_{TP}$  – referencyjna zawartość chlorofilu a [µg/dm<sup>3</sup>],
- $S_{Chl}$  – referencyjna zawartość chlorofilu a [µg/dm<sup>3</sup>].

Indeks ITS (Index of Trophical State) jest kolejnym kryterium oceny stanu troficznego wód powierzchniowych, został opracowany w 1995 r. [20]. Wskaźnik ten opiera się na zaburzeniach równowagi w procesach produkcji i rozkładu substancji organicznej w wodach powierzchniowych dotkniętych procesem eutrofizacji, zmiany te prowadzą do wahań stężeń O<sub>2</sub> i CO<sub>2</sub> [21]. Gdy prędkość rozkładu substancji organicznej jest większa od prędkości produkcji, wówczas stężenie O<sub>2</sub> maleje, a CO<sub>2</sub> rośnie, natomiast gdy prędkość rozkładu jest mniejsza od produkcji, stężenie O<sub>2</sub> rośnie, a CO<sub>2</sub> maleje. Oznacza to, że zmiany stosunku zawartości tlenu i dwutlenku węgla w wodzie odzwierciedla zmiany bilansu procesów produkcji i rozkładu substancji organicznych. Zawartość tlenu można wyznaczać jako nasycenie wody tlenem, natomiast zawartość dwutlenku węgla może być wyrażona przez pH. Według wskaźnika ITS stan troficzności można opisać za pomocą wartości pH oraz stopnia nasycenia wody tlenem i oblicza się go według następującego wzoru [22]:

$$ITS = \Sigma pH_i/n + a(100 - \Sigma [O_2\%])/n,$$

gdzie:

- $pH_i$  – wartość pH,
- $O_2\%$  – nasycenie wody tlenem mierzone synchronicznie z pomiarami pH,
- $a$  – współczynnik empiryczny,
- $n$  – liczba pomiarów.

### 3. Podsumowanie

Proces eutrofizacji stanowi obecnie globalny problem jakości wód morskich oraz słodkich, ponieważ niesie za sobą negatywne konsekwencje, których rezultatem może być całkowita utrata gospodarczych funkcji ekosystemów wodnych. Na ne-

gatywne efekty nadmiernego wzrostu trofii najbardziej narażone są słodkowodne zbiorniki wodne, głównie jeziora oraz stawy jednak w ostatniej dekadzie zjawisko to coraz częściej dotyczy także wód płynących oraz morskich, które spełniają kluczowe role w gospodarce krajowej oraz pełnią funkcje środowiskowe i przyrodnicze. Ciągły oraz regularny monitoring wód objętych problemem eutrofizacji, a także tych, w których ten proces jeszcze nie występuje, może pomóc skutecznie przeciwdziałać zagrożeniu, jakie stanowi nadmierny wpływ procesu eutrofizacji na jakość ekosystemów wodnych. Głównym celem monitoringu jest dostarczenie wiedzy o potencjale ekologicznym i stanie chemicznym wód, w tym do ich ochrony przed eutrofizacją i zanieczyszczeniami antropogenicznymi. W procesie monitoringu bardzo ważne są odpowiednie metody i narzędzia, które dostarczą informacji o stanie biologicznym wód, a także o ich składzie chemicznym\*.

## Literatura

- [1] Dyrektywa 2000/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2000 r. ustanawiająca ramy wspólnotowego działania w dziedzinie polityki wodnej, Dz.U. UE. L 327, s. 1–73.
- [2] *Nutrients in European ecosystems*, „Environmental Assessment Report” 1999, No. 4.
- [3] *Eutrophication in the Baltic Sea – An integrated thematic assessment of the effects of nutrient enrichment and eutrophication in the Baltic Sea region*, „Baltic Sea Environment Proceedings” 2009, No. 115B.
- [4] Selman M., Greenhalgh S., Diaz R., Sugg Z., *Eutrophication and Hypoxia in Coastal Areas: A Global Assessment of the State of Knowledge*, „WRI Policy Note” 2008, No. 1.
- [5] *Eutrophication in Europe’s coastal waters*, „Topic Report” 2001, No. 7.
- [6] Imai I., Yamaguchi M., Hori Y., *Eutrophication and occurrences of harmful algal blooms in the Seto Inland Sea, Japan*, „Plankton Benthos Resources” 2006, Vol. 1, Issue 2, s. 71–84.
- [7] Bricker S.B., Clement C.G., Pirhalla D.E., Orlando S.P., Farrow D.R.G., 1999, National Estuarine Eutrophication Assessment: Effects of Nutrient Enrichment in the Nation’s Estuaries, NOAA, National Ocean Service, Special Projects Office and the National Centers for Coastal Ocean Science. Silver Spring, MD: 71 pp.
- [8] Jaguś A., *Ocena stanu troficznego wód zbiorników kaskady Soły*, „Proceedings of ECOpole” 2011, Vol. 5, No. 1.
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 listopada 2011 r. w sprawie klasyfikacji stanu jednolitych części wód powierzchniowych oraz środowiskowych norm jakości dla substancji priorytetowych, Dz.U. z 2011 r. nr 257, poz. 1545.
- [10] Salasa F., Marcosa C., Netob J.M., Patricio J., Perez-Ruzafa A., Marques J.C., *User-friendly guide for using benthic ecological indicators in coastal and marine quality assessment*, „Ocean & Coastal Management” 2006, Vol. 49, s. 308–331.

---

\* Praca została sfinansowana ze środków na działalność statutową Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych



- [11] *The European Environment Agency's Monitoring and Information Network for Inland Water Resources*, „Technical Report” 1998, No. 7.
- [12] Nixon S., *Coastal marine eutrophication: a definition, social causes and future concerns*, „Ophelia” 1995, Vol. 41, s. 199–219.
- [13] Carlson R., *A trophic state index for Lakes*, „Limnology and Oceanography” 1975, Vol. 22, s. 361–369.
- [14] Vollenweider R., Giovanardi F., Montanari G. et al., *Charakterization of the trophic conditions of marine coastal waters with special reference to the NW Adriatic Sea: proposal for a trophic scale, turbidity and generalized water quality index*, „Environmetrics” 1998, No. 9, s. 329–357.
- [15] *Research and information on the contribution of phosphate based detergent to eutrophication in the Baltic Sea area as well as information on the environmental impacts of zeolites or other possible substitutes*, „Helcom Monas” 2003, No. 5.
- [16] Pimpas I., Tsirtsis G., Karydis M., Kokkoris G.D., *Principal component analysis: Development of a multivariate index for assessing eutrophication according to the European water framework directive*, „Ecological Indicators” 2010, No. 10, s. 178–183.
- [17] Hallock D.A., *Water Quality Indeks for Ecology's Stream Monitoring Program*, Washington State Department of Ecology, Olympia 2002.
- [18] Borja A., Bricker S., Dauer D. et al., *Overview of intergrate to ols and methods in assessing ecological integrity in estuarine and coastal system worldwide*, „Marine Pollution Bulletin” 2008, Vol. 56, s. 1519–1537.
- [19] Yongjin X., Ferreira J., Bricker S. et al., *Trophic Assessment in Chinese Coastal System – Review of Methods and Application to the Changjiang (Yangtze) Estuary and Jiaozhou Bay*, „Estuaries and Coasts” 2007, Vol. 30, No. 6, s. 901–918.
- [20] Neverova - Dzopak E., *Ekologiczne aspekty ochrony wód powierzchniowych*, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2007.
- [21] Odum E.P., *Fundamentals of ecology*, W.B. Sandauer Company, Philadelphia 1971.
- [22] Kowalewski Z., *Metody oceny stanu troficznoego wód powierzchniowych*, [w:] *Materiały Krakowskiej Konferencji Młodych Uczonych 2006*, AGH, Kraków 2006, s. 343–351.

AGNIESZKA SZEWCZYK

#### REVIEW OF THE METHODS FOR DETERMINING THE EUTROPHICATION OF SURFACE WATERS

**Keywords:** eutrophication, surface water, trophic status assessment methods.

The concept of „eutrophication” comes from the Greek word eutrophos (eu-well, Trophos-food) and determines the content of nutrients in surface waters. The increase of the trophic waters affected by many factors: temperature, light, nutrient content and morphological properties and hydrobiological. The adverse effects of eutrophication of the most vulnerable are fresh water

lakes and reservoirs, but in recent decades as a result of intensive economic activity, this phenomenon occurs more frequently in marine water and waters flowing. The basic factors limiting the eutrophication include compounds of phosphorus and nitrogen. The aim of the study was to review the literature in terms of generally accepted methods of determining the degree of eutrophication.