

Iwona  
Kostrzewska-Szlakowska

Centrum Badań Ekologicznych PAN  
Dziekanów Leśny  
05-092 Łomianki

## Mikrowarstwa powierzchniowa wód: charakterystyka i metody badań

A surface microlayer of waters:  
characteristics and research methods

### 1. Wstęp

Przy bezwietrznej pogodzie, na powierzchni zbiorników wodnych, nawet niewprawnym okiem daje się zaobserwować opalizującą warstwę skupiającą pyłki i zanieczyszczenia z powietrza. Wiatr i falowanie rozpraszają ją lub spychają do brzegu. Takie – wydaje się chwilowe – występowanie sprawia, że ciągle spotykam się z wątpliwościami, czy badana przez mnie strefa istnieje, a jeżeli, to czy ma ekologiczne znaczenie. Powątpiewania te wydają się bezzasadne, bo mimo że miąższość mikrowarstwy powierzchniowej może sięgać tylko do jednego milimetra grubości, to powierzchnia jej występowania obejmuje 71% powierzchni Ziemi, jaką stanowi ziemska hydrosfera.

Celem prezentowanego artykułu jest przybliżenie tej mikro-strefy czytelnikowi: zapoznanie z innymi układami granicznymi, budową mikrowarstwy powierzchniowej, procesami fizycznymi tu zachodzącymi, występującymi organizmami, metodami pobierania wody z tej strefy, a także historią badań zarówno na świecie, jak i w Polsce.

### 2. Interfaza, czyli granica faz oraz układy graniczne w siedliskach wodnych

W „*Dictionary of the life sciences*” (Lapedes 1976) termin interfaza (pojęcie z dziedziny fizyki i chemii) określono jako granicę pomiędzy dwiema różnymi fazami spośród trzech (gazową, płynną lub stałą). Interfaza stanowi strefę kontaktu (lub styku) dwóch różnych faz, z których każda charakteryzuje się inną gęstością, budową, składem chemicznym itd., a także jest miejscem działania różnorodnych sił (elektrostatycznych, napięcia powierzchniowego, adhezji itp.).

W siedliskach wodnych tworzą się układy graniczne wody z różnymi elementami, jak: powietrze, osad denny, kamienie, rośliny, pęcherze gazów, ziarna piasku, cząstki detrytusu itp. Interfazy te są bardzo bogato reprezentowane i mają znaczenie jako siedliska o odmiennych właściwościach funkcjonalnych. Do typowych układów granicznych należą: **woda-substrat stały**, który może

być twardy (np. kamienie, ziarna piasku) lub miękki (luźny osad denny, powierzchnia mułu). Kolejnym przykładem interfezy jest **woda–powierzchnia żywej lub martwej rośliny**. Prawie wszystkie oświetlone powierzchnie w wodach stanowią podłoża dla rozwoju **peryfitonu**. Grupa ta w zależności od rodzaju substratu, z którym jest związana, otrzymała nazwy: epilityczna (kolonizująca skały i powierzchnie kamienne), epipeliczna (występująca na osadach), epifityczna (występująca na makrofitach), epizoiczna (na zwierzętach) (Wetzel 1983). Wymienione podłoża otoczone są często biofilmem, który tworzy głównie materia organiczna oraz mikroorganizmy, jak bakterie i glony. Uważa się, że biofilm działa jak pułapka w procesach wymiany biopierwiastków w wodach i stanowi swoistego rodzaju „spizarnię” węgla organicznego (Freeman i Lock 1995).

Kolejnym przykładem układu granicznego jest interfeza: **woda–skupienia detrytusu** („śnieg jeziorny”). Częsteczki utworzone w górnych warstwach wód jeziornych opadają nawet z prędkością  $10\text{--}15\text{ m}\cdot\text{dzień}^{-1}$ , stanowiąc bogate podłoża (w biopierwiastki i materię organiczną) dla kolonizacji przez mikroorganizmy. Sieburth (1983) oraz Weiss i in. (1996) stwierdzili, że bakterie mogą stanowić ponad 80% gatunków zasiedlających płatki „śniegu”.

Innym układem jest interfeza **woda–pęcherze gazów** takich jak dwutlenek węgla, tlen, metan, siarkowodór, które powstają na skutek zjawisk fizycznych (załamywanie się grzbietów fal przy silnym wietrze, wiry Langmuira) lub w wyniku procesów biologicznych (fotosynteza, procesy destrukcji w osadach dennych). Unoszą się one znad dna, z powierzchni roślin lub w wyniku turbulencji mas wody. Zaobserwowano, że na powierzchni takich pęcherzy są transportowane nie tylko cząstki martwe, ale także bakterie oraz wirusy (Johnson i Cooke 1980).

Najpowszechniej na kuli ziemskiej występuje układ graniczny **woda–powietrze atmosferyczne**, który pokrywa ponad 70% powierzchni planety. Na styku tych dwóch faz wytwarza się cienka warstwa wody o odmiennych właściwościach. Tworzy się ona na powierzchni wszystkich zbiorników wodnych (kałuże, stawy, jeziora, zbiorniki zaporowe, morza, oceany) i rzek. Siły elektrostatyczne, fizyczna i chemiczna adsorpcja, napięcie powierzchniowe są procesami zdolnymi utrzymać we względnej stabilności **mikrowarstwę powierzchniową** (Södergren 1987). Mikrowarstwa powierzchniowa ma grubość rzędu kilkunastu–kilkuset mikrometrów. Tworzą ją związki organiczne, przeważnie wysokocząsteczkowe, często koloidalne oraz związki mineralne, których stężenia są na ogół wyższe niż w głębszych masach wód (Nichols i Espey 1991). Mikrowarstwa powierzchniowa pośredniczy w wymianie gazowej oraz w transporcie nieorganicznej i organicznej materii

pomiędzy wodą a atmosferą. Jest jednocześnie środowiskiem bardzo niestabilnym: zmienność temperatury, nasłonecznienia, wiatru i falowania wymaga od organizmów z nią związanych przystosowania się do życia w bardzo zmiennych warunkach (Falkowska 1996). Mikrowarstwa powierzchniowa jest siedliskiem występowania wielu gatunków zwierząt, roślin i bakterii – opisanych po raz pierwszy przez Naumana (1917, za Hardy 1982) jako neuston, a także wielu gatunków okresowo tu występujących (np. larwy ryb). Organizmy żyjące na powierzchni wody nazywamy epineustonem, zaś te, które korzystają z głębszych warstw mikrowarstwy powierzchniowej – hiponeustonem (Banse 1975).

Wyżej wymienione układy graniczne/stykowe posiadają cechy wspólne. Oprócz tego, że stanowią siedliska dla wielu gatunków, są również miejscem intensywnej produkcji i procesów rozkładu. Stanowią zarówno pułapkę, jak i źródło materii organicznej. Powierzchnie takie są pokrywane przez biofilm – mniej lub bardziej zwartą warstewkę, a raczej osnowę złożoną ze związków organicznych (*polysaccharide matrix*) i kolonizowaną przez mikroorganizmy. Struktury te w procesie wymiany związków wyłapują nie tylko biopierwiastki, ale również stanowią miejsce kumulacji węgla organicznego (Freeman i Lock 1995), metali ciężkich, PCB i innych zanieczyszczeń (Schorer i Eisele 1997). Glony peryfitonowe i bakterie, które zamieniają materię organiczną w biomasę dostępną dalszym ogniwom sieci troficznej, tworzą początek pętli mikrobiologicznej, ponieważ są zjadane przez drobnych neustonowych konsumentów, takich jak pierwotniaki, wiciowce itp. (Lampert i Sommer 1996).

### 3. Rys historyczny i współczesne kierunki badań mikrowarstwy powierzchniowej

Pierwsze obserwacje **morskie** dotyczące wygładzania zmarszczonych powierzchni przez obecność naturalnego filmu olejowego były zarejestrowane przez marynarzy i żeglarzy kilka wieków temu. Benjamin Franklin, zaintrygowany tymi doniesieniami, w 1773 roku przeprowadził eksperyment polegający na wylaniu oleju na wzburzoną powierzchnię stawu; stwierdził, że dało to efekt wygładzenia powierzchni jak „lustro” (za Sieburth 1983). W nieco późniejszych latach (1880 i 1884) fakt wygładzania zmarszczonych powierzchni wody przez autochtoniczny, opalizujący film olejowy (*sea slick*) odnotowany został przez Reynoldsa i Aitkena (za Sieburth 1983).

W latach 60. i 70. dominowały prace metodyczne, opisujące urządzenia do pobierania próbek wody z mikrowarstwy powierzchniowej zarówno w

warunkach oceanicznych, jak i śródlądowych. Przy okazji stwierdzano kumulację zanieczyszczeń, takich jak DDT, węglowodory aromatyczne, metale ciężkie i inne zanieczyszczenia pochodzące z działalności człowieka na lądzie (Bidleman i Olney 1973, Atlas i Giam 1981, Hardy i in. 1985). Czas obecności w mikrowarstwie powierzchniowej tych składników sięga nawet kilkudziesięciu dni. Bakterie występujące w mikrowarstwie są często bardziej odporne na działanie antybiotyków czy metali ciężkich niż bakterioplankton (Jones i in. 1991), aczkolwiek stwierdzono, że aktywność metaboliczna bakterii (Kjelleberg i Håkansson 1977, Dietz i in. 1976) oraz aktywność fotosyntetyczna glonów (Albright 1980) jest wyższa wśród organizmów planktonowych niż neustonowych. Liczne są również prace eksperymentalne przeprowadzane w warunkach laboratoryjnych, dotyczące np. transportu bakterii na powierzchni pęcherzy gazów (Blanchard i Syzdek 1974) czy wpływu deszczu o różnym natężeniu na stan mikrowarstwy (Green i Houk 1979).

Mikrowarstwa powierzchniowa w środowisku morskim doczekała się opracowań w postaci prac przeglądowych. Wangersky (1976), przedstawiając krótko odmienną mikrowarstwę powierzchniową od wód podpowierzchniowych, badał głównie skład chemiczny oraz procesy w niej zachodzące. Hardy (1982) badał zarówno aspekt biologiczny, jak i fizyczno-chemiczny mikrowarstwy powierzchniowej wód morskich. Liss i Slinn (1983) przeanalizowali głównie procesy wymiany gazów i cząstek pomiędzy atmosferą a wodą. W pracy Norkrans (1980) dominowały problemy związane głównie z bakterioneustonem, na którego odmienną w stosunku do bakterioplanktonu mają wpływ warunki do jakich musiały się przystosować żyjąc w tej strefie. Maki (1993) również przedstawił mikrowarstwę jako ekstremalne środowisko życia dla organizmów z nią związanych. Maki i Hermansson (1994) przedstawili dynamikę mikrowarstwy powierzchniowej, z uwzględnieniem zarówno organicznej materii rozpuszczonej, jak i materii cząstkowej (bakterio-, fitoneuston i inne organizmy związane z mikrowarstwą powierzchniową). Jedną z najnowszych prac „*The sea surface and global change*” (Liss i Duce 1997) szczegółowo omawia większość składników i procesów związanych z mikrowarstwą powierzchniową w siedliskach morskich.

Jedną z pierwszych prac na temat mikrowarstwy powierzchniowej **wód śródlądowych** dotyczyła oceny napięcia powierzchniowego zbiorników wodnych oraz krótkiego podsumowania znaczenia „filmu powierzchniowego” (*surface film*, Goldacre 1949). W następnych pracach stwierdzono, że zanieczyszczenia wód, m.in. metalami ciężkimi, dotyczą nie tylko wód oceanicznych, ale także wód słodkich, jak np. Wielkie Jeziora Amerykańskie (Elzerman i Armstrong 1979). Niekiedy prace dotyczyły mikrowarstwy

powierzchniowej poszczególnych zbiorników (Saijo i in. 1974, Danos i in. 1983, Estep i Remsen 1985, Södergren 1987, Münster i in. 1998) lub specyficznych zagadnień, np. wpływu kwaśnych deszczy na skład mikrowarstwy powierzchniowej (Knulst i in. 1997), czy zmienności dobowej kumulacji w mikrowarstwie powierzchniowej zarówno chemicznych, jak i biologicznych składników (Södergren 1984, Maki i Remsen 1989).

Wobec wzrostu emisji gazów cieplarnianych i ich wpływu na zmiany globalnego klimatu oraz opadu na powierzchnie wód różnego typu zanieczyszczeń antropogenicznych, wzrostu promieniowania UV-B i temperatury wód powstaje wiele nowych pytań badawczych, np.: Jaki wpływ będą mieć te zmiany na organizmy neustonowe? Czy da się przewidywać zmiany lokalne i globalne? Jak eutrofizacja wód słodkich wpływa na wzbogacanie mikrowarstwy powierzchniowej? Jak szybko w czasie roztopów przetwarzany jest materiał kumulowany w lodzie podczas zimy? itd. Brak jest również badań eksperymentalnych czy *in situ* na temat potencjalnego wpływu mikroneustonów na wymianę gazów przez mikrowarstwę powierzchniową (Hardy i in. 1997). Wydaje się, że potrzebny jest system monitorowania mikrowarstwy powierzchniowej w wybranych rejonach Ziemi, aby stworzyć bazę danych dla uchwycenia długoterminowych zmian w jakości wód (Hardy i in. 1997).

#### **4. Struktura i modele fizyczne mikrowarstwy powierzchniowej wód**

Wszystkie modele dotyczące struktury mikrowarstwy powierzchniowej opisują ją jako warstwowy układ składników organicznych, a różnice dotyczą nazewnictwa niektórych warstw (Kjelleberg i in. 1979, Norkrans 1980, Maki 1993, Maki i Hermasson 1994, Falkowska 1996).

Zewnętrzna warstwa – lipidowa (o grubości 1–2 nm) zbudowana jest z wolnych kwasów tłuszczowych, glicerydów, fosfolipidów, węglowodorów. Zwana jest ona inaczej warstwą, filmem lub błoną lipidową (Norkrans 1980, Falkowska 1996). Pod nią leży warstwa polisacharydowo-białkowa o grubości 10–30 nm (Kjelleberg i in. 1979, Norkrans 1980, Falkowska 1996) lub 0,1 μm (Maki 1993, Maki i Hermasson 1994). Górną warstwę nazywa się także warstwą hydrofobnych związków powierzchniowo czynnych, w odróżnieniu od drugiej, głębszej, określanej jako warstwa hydrofilnych związków powierzchniowo czynnych. Często obie warstwy łącznie określa się terminem mikrowarstwa powierzchniowa lub organiczna mikrowarstwa powierzchniowa (Sieburth i in. 1976, Maki 1993). Pod warstwami składników organicznych grupuje się bakterio-, fito- i zooneuston.

Termin: mikrowarstwa powierzchniowa jest różnie rozumiany w różnych opracowaniach. Sieburth i in. (1976) określenie: mikrowarstwa powierzchniowa przypisali dwóm górnym warstwom, zaś dla całego układu – wraz z bakterioneustonem – użyli określenia: mikrowarstwy powierzchniowe. Knulst (1996) zaproponował rozróżnienie następujące: film – kiedy mówimy o wszystkich warstwach, porównując je z wodami podpowierzchniowymi, zaś mikrowarstwa na określenie pobranej próbki wody z mikrowarstwy powierzchniowej, czyli tej warstwy, która zbiera bardzo różnorodny materiał (zarówno organiczny, jak i nieorganiczny, np. zanieczyszczenia) zarówno z toni wodnej, jak i z atmosfery.

## 5. Procesy fizyczne zachodzące w mikrowarstwie powierzchniowej

Mikrowarstwa powierzchniowa jako strefa graniczna woda–atmosfera posiada odmienne właściwości w porównaniu do wód leżących głębiej. Dzięki specyficznej budowie cząsteczki wody (dwa atomy wodoru i atom tlenu, między którymi zachowany jest kąt  $105^\circ$ ) wykazuje ona dipolowy charakter i jest zdolna do tworzenia wiązań wodorowych. Asymetria rozmieszczenia ładunków elektrycznych powoduje wytwarzanie wokół cząsteczek wody pola elektrycznego, które z kolei powoduje łączenie się ich między sobą przeciwnymi biegunami (kohezja) lub ze spolaryzowanymi cząstkami innych substancji (adhezja) (Starmach i in. 1978). W głębi cieczy cząsteczki wody otaczające ze wszystkich stron daną cząsteczkę działają na nią siłami, które się wzajemnie znoszą. Wypadkowa sił wywieranych na powierzchniową cząsteczkę wody jest skierowana w głąb, co powoduje, że swobodna ciecz przyjmuje kształt kulisty (Przestalski 1993). Ten nierówny rozkład sił wzajemnego oddziaływania między cząsteczkami wody położonymi w warstwach powierzchniowych, kontaktujących się z fazą gazową, powoduje powstanie napięcia powierzchniowego. Istnienie sił spójności między cząsteczkami wody sprawia, że w warstwie powierzchniowej, obok sił skierowanych w głąb cieczy, występuje jeszcze siła działająca w kierunku stycznym, zmieniająca kierunek i wielkość siły wypadkowej. Siła ta, przypadając na jednostkę długości, jest miarą napięcia powierzchniowego, które mierzymy w miliniutonach na metr. Powyższe właściwości powierzchniowych warstw wody przyczyniają się do kumulacji wielu związków, materii rozpuszczonej i cząstkowej pochodzącej zarówno z atmosfery, jak i z głębi wód zbiorników. Są one kumulowane w bardzo cienkiej warstwie wody, która odgrywa istotną rolę w procesach wymiany pomiędzy dwiema fazami (Dragčević i Pravdić 1981).

Główne procesy zachodzące w mikrowarstwie powierzchniowej są mechanizmami zubożającymi lub wzbogacającymi tę warstewkę wody w materię, zanieczyszczenia czy mikroorganizmy. Kierunki transportu są następujące: do atmosfery z mikrowarstwy powierzchniowej lub z atmosfery na powierzchnię wód oraz do/z głębi wód poprzez powierzchnię zbiorników. Mechanizmy podnoszenia materiału z głębi wód obejmują: wynoszenie mas wodnych, struktury wirowe Langmuira oraz procesy flotacji (wynoszenie na powierzchni pęcherzy gazów podnoszących się z dna lub powierzchni roślin; Falkowska 1996). Wallace i Duce (1978) obliczyli, że transport na powierzchni pęcherzy gazów może być istotnym elementem wzbogacania mikrowarstwy powierzchniowej w cząstkowy węgiel organiczny. Materiał z atmosfery (pyły, pyłki, zanieczyszczenia itp.) jest gromadzony w mikrowarstwie powierzchniowej z opadem mokrym i suchym (Hardy 1982). Deszcz w zależności od intensywności i wielkości kropeł usuwa film z powierzchni wody w ciągu kilku do kilkunastu minut. Warstwowy układ mikrowarstwy prawie całkowicie odtwarza się w ciągu pierwszej 0,5 godz. po deszczu (Green i Houk 1979). Transport atmosferyczny i kumulacja w mikrowarstwie powierzchniowej obejmuje również zanieczyszczenia stałe, jak: PCB, DDT (Bidleman i Olney 1973, Södergren i in. 1990), metale ciężkie (Hatcher i Parker 1974, Elzerman i Armstrong 1979), środki ochrony roślin i inne. Hardy i in. (1985) oszacowali średni czas przebywania metali ciężkich w mikrowarstwie powierzchniowej na 1,5 do 15 godz. Transport cząstek z mikrowarstwy w głąb wody odbywa się poprzez: rozpuszczanie, sedymentację, dyfuzję, a także poprzez wiry Langmuira (jeden z najważniejszych mechanizmów pionowego transportu materii w wodach powierzchniowych). Szybkość krążenia wody na powierzchni i tuż pod nią jest skorelowana z prędkością wiatru (Hardy 1973, Harris i Lot 1973, Dobson 1983). Do atmosfery materiał z omawianej warstwy wynoszony jest z wiatrem bądź na skutek pęknięcia w mikrowarstwie powierzchniowej pęcherzy gazów (aerozole), które na swojej powierzchni transportują bakterie, wirusy, materię (Blanchard i Syzdek 1970, 1974, Norkrans 1980, Hardy 1982, Xhoffer i in. 1992), a które pękając „rozrywają” mikrowarstwę powierzchniową, porywając częściowo warstwę organiczną z powierzchni (Bezdek i Carlucci 1974). Ponadto wiatr i falowanie wzmagają procesy tworzenia pęcherzy i krążenia cząstek w obrębie mikrowarstwy powierzchniowej (Napolitano i Cicerone 1999). Pomimo wielu czynników wpływających zaburzająco na warstwowy układ mikrowarstwy powierzchniowej, wyjątkowo szybko się on odtwarza. Średnie tempo relaksacji (od momentu zadziałania czynnika destabilizującego do powrotu do stanu

równowagi, kiedy mikrowarstwa zaczyna się „odtworzać”) wynosić może nawet 0,2 sekundy (Dragčević i Pravdić 1981).

## 6. Mikrowarstwa powierzchniowa jako siedlisko życia

Mimo że mikrowarstwa jest układem łatwo ulegający zaburzeniom (np. w wyniku podmuchu wiatru), jest ona zasiedlona przez specyficzne dla niej organizmy neustonowe. Występują tu gatunki, dla których stanowi ono jedyne siedlisko życia (jak niektóre bakterie, glony, pierwotniaki, bezkręgowce). Tuż pod powierzchnią zbiorników można spotkać również pewne stadia rozwojowe innych gatunków, np. jaja komarów czy niektóre larwy ryb (szczególnie w warunkach morskich) i skorupiaków (Hardy 1982). Część organizmów przebywa w niej tylko nocą, a inne – w ciągu dnia (Tsyban 1971).

Kumulacja materii organicznej w mikrowarstwie powierzchniowej umożliwia występowanie organizmów korzystających z tego źródła pokarmu. Okresowo w mikrowarstwie występują duże ilości glonów, w tym najdrobniejszego ich składnika – pikoplanktonu (Hardy i in. 1997, Hillbricht-Ilkowska i in. 1997). Ze względu na dużą zmienność środowiska mikrowarstwy rzadko spotykamy tu trwałą kumulację organizmów autotroficznych (Hardy 1973, Albright 1980, Carlsson 1982, Hardy i Apts 1984, Södergren 1993, Hillbricht-Ilkowska i in. 1997, Münster i in. 1998, Kostrzevska-Szlakowska 2002), zaś różnice liczebności pomiędzy badaną warstwą a tonią wód są zmienne sezonowo i nieistotne (Danos i in. 1983, Estep i Remsen 1985, Estep i in. 1985, Kostrzevska-Szlakowska 2000). Jednakże niektóre gatunki fitoneustonów są dla tej warstwy charakterystyczne, gdyż zaadaptowały się do warunków intensywnego promieniowania słonecznego, zmienności temperatury i ruchliwości wód (falowanie, wiatr). Zespoły glonów występujące w mikrowarstwie powierzchniowej często są mniej różnorodne (mniejsza liczba gatunków) niż zespoły planktonowe niżej występujące, ale charakteryzują się wysokim współczynnikiem wydajności fotosyntetycznej (Hardy 1973, Hardy i Apts 1989). Södergren (1993) na podstawie stężenia chlorofilu *a* w mikrowarstwie i wodach podpowierzchniowych ocenił, że adaptacja glonów do intensywnego światła w tej pierwszej polega na redukcji zawartości chlorofilu. Carlson (1982) zaobserwował, że w mikrowarstwie jest więcej glonów niż w wodzie podpowierzchniowej, oraz że kumulacja glonów istotnie wzrasta w nocy. Hardy i Apts (1984) stwierdzili w mikrowarstwie wysokie stężenia feofityn, które mogą powstawać w wyniku działania silnego promieniowania słonecznego na chlorofil (fotooksydacja).

Kumulacja bakterii heterotroficznych w mikrowarstwie, wyspecjalizowanych w rozkładzie materii organicznej, występuje powszechnie (Niewolak 1971, Tsyban 1971, Dietz i in. 1976, Kjelleberg i Håkansson 1977, Hermansson i Dahlbäck 1983, Sieburth 1983, Hardy i Apts 1984, Carlucci i in. 1985, Jones i in. 1991, Södergren 1993, Münster i in. 1998, Donderski i in. 1999a, Walczak i in. 2000, Kostrzewska-Szlakowska 2002). Bakterie mają zdolności rozkładu substancji dzięki zewnątrzkomórkowym enzymom, a także aktywnie transportują lub dyfundują substancje rozpuszczone bezpośrednio do komórek (Sieburth 1983, Bratbak 1987). U bakterioneustonów musiał wystąpić dodatkowo proces uodpornienia komórek na działanie promieniowania słonecznego, umożliwiające życie w mikrowarstwie powierzchniowej (Hermansson i Dahlbäck 1983, Carlucci i in. 1985). Bardzo często dominują tu formy pigmentowane (Tsyban 1971) oraz formy „postrzępione” (*fimbriated*), które to strzępki mogą grać istotną rolę w adhezji komórek do mikrowarstwy (Hermansson i in. 1982). Kumulacja bakterii w mikrowarstwie powierzchniowej jest zjawiskiem dość często opisywanym, natomiast nie ma jednoznacznej opinii na temat ich aktywności. Kjelleberg i Håkansson (1977) oraz Hermansson i Dahlbäck (1983) wykazali, że bardziej aktywne są bakterie planktonowe niż neustonowe, aczkolwiek nie zawsze różnice są istotne statystycznie. Ponadto autorzy ci stwierdzili, że względnie mało gatunków bakterioneustonów aktywnie rozkładało związki tłuszczowe. Mudryk i in. (1999) uzyskali odwrotne wyniki. Większość bakterii neustonowych aktywnie rozkładała tłuszcze czy DNA, zaś wśród bakterii planktonowych dominowały ammonifikujące, bądź te, które aktywniej rozkładały pektyny i chitynę. Natomiast Carlucci i in. (1985) ocenili, że wbudowywanie węgla w komórkę jest bardziej intensywne u bakterii z mikrowarstwy jezior oligo- i mezotroficznych, natomiast nie stwierdzono, aby te różnice istniały w jeziorach eutroficznych.

Podsumowując można stwierdzić, że mikroheterotrofy warstwy powierzchniowej składają się z dwóch grup: „drzemiącej” (nieaktywnej, przetransportowanej z głębi wód i skumulowanej w tej strefie) oraz zdolnej do życia (fizjologicznie zaadaptowanej do życia i rozwoju w tym środowisku; Carlucci i in. 1985). Hatcher i Parker (1974) wymienili kilka przyczyn często wysokiej kumulacji bakterioneustonów: 1) mikrowarstwa powierzchniowa wód słodkich jest bogata w substancje organiczne, tworząc warunki korzystne dla rozwoju bakterii, 2) niektóre bakterie wykazują chemo-, aero-, termo-, geo- i fototaksję, 3) w mikrowarstwie zachodzą inne procesy wspomagające kumulację, jak wynoszenie na powierzchnię pęcherzy czy podnoszenie z masami wód, 4) bakterie przyczepione do powierzchni cząstek detrytusów, które z powodu

niskiej gęstości oraz z racji kształtu są wynoszone na powierzchnię, 5) siły fizyczne (siły elektrostatyczne, adsorpcja, napięcie powierzchniowe) utrzymują bakterioneuston w mikrowarstwie powierzchniowej.

W mikrowarstwie powierzchniowej spotykamy różne grupy organizmów neustonowych, np. pierwotniaki (ameby, wiciowce, orzęski, np. *Vorticella*, *Anthophysa*, *Podophyra*), wrotki (np. *Euchlanys*), skorupiaki i inne. Drobniejsze organizmy żyją bezpośrednio w mikrowarstwie powierzchniowej, zaś większe, które często okresowo korzystają z tego siedliska, przystosowały się do bardziej zmiennych niż w toni wodnej warunków. Specjalizacja polega na zmianach w budowie czy zachowaniu organizmów. Wiele gatunków wykorzystuje mikrowarstwę powierzchniową jak membranę, ślizgając się czy wędrując po powierzchni, jak np. nartnik (*Gerris*), czy krętakowate (*Gyrinus*). Inne organizmy, z powodu różnic gęstości (pływalność) oraz dzięki sile napięcia powierzchniowego, podczepiają się do mikrowarstwy od dołu, np. pluskolec (*Notonecta*), błotniarka (*Lymnaea*), ostrożanka (*Scapholeberis*). Dla niektórych organizmów mikrowarstwa powierzchniowa tylko na pewnym etapie rozwoju stanowi środowisko życia. Jaja komara (*Culex*) pływają po powierzchni wód zebrane w „tratwy”, zaś larwy podczepiają się do powierzchni albo całą powierzchnią ciała (*Anopheles*), albo tylko za pomocą syfonu oddechowego (*Culex*) (Sieburth 1983, Bratbak 1987, Guthrie 1989, Ricci i in. 1991).

## 7. Metody pobierania próbek wody z mikrowarstwy powierzchniowej

W badaniach nad warstwą graniczną pomiędzy wodą a powietrzem stosowano dotychczas szereg różnorodnych technik pobierania próbek wody. Są one zależne od celu pracy, ponieważ pobierane są warstwy różnej grubości. Techniki używane obejmują zarówno bardzo proste narzędzia, jak płyta szklana (Harvey i Burzell 1972), czy przykładane na powierzchnię wody filtry (Crow i in. 1975), aż do skomplikowanych pojazdów zdalnie kierowanych, z różnego rodzaju walcami „nanizującymi” powierzchniową warstewkę wody (Harvey 1966 – walec metalowy, Carlsson i in. 1988 – szklany, Hardy i in. 1988 – teflonowy). Hatcher i Parker (1974) porównali w warunkach laboratoryjnych 4 metody pobierania próbek z mikrowarstwy powierzchniowej. W przypadku walca Harveya (1966), czyli modelu katamaranu z walcem służącym do pobierania próbek wody z mikrowarstwy powierzchniowej, uzyskali warstwę o podobnej grubości do wcześniej notowanych w literaturze. Warstwy mniejszej grubości uzyskali płytą szklaną Harveya i Burzella (1972) (przyczyną mogło być wolniejsze tempo wyciągania płyty z wody), zaś dwukrotnie grubszą

warstwę – „ekranem z drutu”, który przypomina siatkę o zmiennej liczbie oczek, na których rozciąga się warstewka wody powierzchniowej (Garrett 1965). Autorzy ci stwierdzili, że trudno jest porównywać wyniki (tj. absolutne wartości stężeń badanych substancji) uzyskiwane różnymi metodami pobierania próbek z wody powierzchniowej. Urządzeniami dającymi bardzo cienką warstwę wody powierzchniowej okazały się walec i płyta szklana. Kjelleberg i in. (1979) stwierdzili, że próbki pobierane metodą hydrofobnej membrany dają wyższą liczebność mikroorganizmów w stosunku do techniki płyty czy „ekranu”. Przegląd różnych technik pobierania wody z mikrowarstwy powierzchniowej przedstawił w swojej pracy Hühnerfuss (1981). Z przeglądu tego wynika, że na uzyskaną próbkę wody o określonej miąższości mikrowarstwy powierzchniowej ma wpływ zastosowana technika. Techniki, które pobierają mikrowarstwę o grubości poniżej 100  $\mu\text{m}$  wydają się właściwe dla szczegółowych badań chemicznych, np. badań określonego składnika. Natomiast dane uzyskane z grubości mikrowarstwy poniżej 500  $\mu\text{m}$  wydają się właściwe, kiedy chodzi o cały układ powiązany z interfazą woda–powietrze, tzn. badanie pierwiastków biogenicznych, rozpuszczonej materii organicznej, neuston, czyli cały układ produkcji–destrukcji.

Ponieważ próbki wody z mikrowarstwy powierzchniowej pobiera się bardzo różnymi metodami (co oznacza, że pobiera się różną grubość powierzchniowej warstwy wody), stosuje się tzw. **współczynnik wzbogacenia** ( $E_f$  – z angielskiego *enrichment factor*), czyli liczbę informującą, o ile w mikrowarstwie powierzchniowej jest więcej danego składnika w stosunku do warstw wody leżących głębiej. Oblicza się go jako iloraz stężenia danego składnika w mikrowarstwie ( $X_{MP}$ ) do jego stężenia w wodach podpowierzchniowych ( $X_{WPP}$ ):

$$E_f = X_{MP} / X_{WPP} \text{ lub } E_f' = X_{MP} / X_{WPP} - 1$$

W pierwszym przypadku o kumulacji składnika w mikrowarstwie powierzchniowej świadczy liczba  $>1$ , w drugim  $>0$  (Maki i Hermansson 1994). Najpowszechniej w badaniach używa się pierwszego sposobu obliczania wielkości kumulacji w mikrowarstwie powierzchniowej.

## 8. Badania mikrowarstwy powierzchniowej w Polsce

Badania polskie nad mikrowarstwą powierzchniową wód dotyczą głównie trzech regionów: 1) wód południowego Bałtyku, w tym Zatoki Gdańskiej, 2) jezior słonawych i słodkich Pojezierza Pomorskiego i pobraża południowego Bałtyku oraz 3) jezior Pojezierza Mazurskiego.

Falkowska i Bolałek (1991) badali wymianę azotu i fosforu w kontaktowej strefie powietrze–woda południowego Bałtyku. Współczynniki wzbogacenia tych związków dochodziły do 5,0 i 1,5, odpowiednio. Badania bakteriologiczne Zatoki Gdańskiej wykazały, że w mikrowarstwie powierzchniowej kumulują się bakterie heterotroficzne (Mudryk i in. 1991, Mudryk i Donderski 1996, Mudryk i Skórczewski 1998). Badane warstwy wody (pobierane różnymi metodami, a więc dające różne grubości warstwy powierzchniowej) i wód podpowierzchniowych różniły się występowaniem poszczególnych szczepów bakterii (Mudryk i in. 1991, Mudryk 1998). W mikrowarstwie powierzchniowej o grubości ok. 90  $\mu\text{m}$  dominującą grupą (ok. 70% liczebności) były *Favobacterium–Cytophaga*. W warstwie o grubości 240  $\mu\text{m}$  oraz w wodach podpowierzchniowych dominowały dwie grupy (po ok. 30% liczebności): *Favobacterium–Cytophaga* i *Pseudomonas* (Mudryk 1998).

Antybiotyki produkowane przez niektóre bakterie i glony w wodach mogą być czynnikami stresogennymi dla innych bakterii (Mudryk i Skórczewski 1998). Autorzy nie znaleźli różnic pomiędzy bakterioneustonem a planktonem w odporności na szereg antybiotyków. Stwierdzili, że odporność zależy raczej od przynależności taksonomicznej niż od miejsca występowania. W laboratorium badano również wpływ różnych stężeń metali ciężkich na wzrost i aktywność oddechową neustonowych i planktonowych bakterii (Mudryk i in. 2000). Okazało się, że różne stężenia metali w podobnym stopniu hamują wzrost obu grup bakterii oraz negatywnie wpływają na aktywność oddechową.

Bakterie zdolne do rozkładu białka stanowiły 60–100% całkowitej liczby bakterii, a maksymalne ich koncentracje występowały w bardzo cienkiej i najbardziej powierzchniowej warstwie wody (Mudryk i Skórczewski 1998).

Bakterioneuston charakteryzował się niższą aktywnością proteolityczną w stosunku do bakterioplanktonu. Bakterie wykazywały ponadto dużą zmienność dobową kumulacji w mikrowarstwie powierzchniowej – minimum występowania osiągając w południe (Mudryk i Skórczewski 1998). Bakterioneuston również mniej aktywnie rozkłada organiczne związki fosforu niż bakterie z wód podpowierzchniowych (Mudryk 1998).

Grzybowski (2001) porównał dwie metody pobierania próbek wody podpowierzchniowej w Zatoce Gdańskiej i oznaczał w nich zawartość rozpuszczonego węgla organicznego (DOC – *dissolved organic carbon*). Jeden z aparatów został spuszczonej otwarty (aparat typu NISKIN), zaś drugi – zamknięty (HYDROBIOS). Autor wykazał statystycznie istotne różnice pomiędzy stężeniami węgla w poszczególnych próbkach wody. Wyższe stężenia były w wodzie pobranej aparatem typu NISKIN, ponieważ w aparacie typu „otwartego” mikrowarstwa powierzchniowa „oblepia” ścianki wewnętrzne,

wzbogacając pobraną próbkę wody. Różnice były jeszcze większe, kiedy wodę pobierano przy bezwietrznej pogodzie i spokojnym morzu, co dodatkowo wskazuje na zanieczyszczenie próbek przez mikrowarstwę, która jest lepiej wykształcona w takich warunkach pogodowych.

Falkowska (1996) badała mikrowarstwę powierzchniową wód Bałtyku używając trzech technik pobierania wody: płytę teflonową, płytę szklaną i ekran polietylenowy. Ponieważ różne techniki umożliwiają pobranie różnych grubości mikrowarstwy okazało się, że im mniejsza była grubość warstwy powierzchniowej, tym większe wartości osiągały stężenia biopierwiastków i chlorofilu *a*. Najwyższe współczynniki wzbogacenia i najbardziej zmienne dotyczyły fosforu organicznego i chlorofilu *a*. Najwyższe współczynniki wzbogacenia fosforu występowały w godzinach nocnych. Wyraźne wahania dobowe wykazywały stężenia DOC i kwasów humusowych. Bezpośrednie działanie wiatru powodowało wzrost stężeń substancji biogenicznych w mikrowarstwie powierzchniowej, szczególnie silnie antropogenicznych i terygenicznych związków azotu i fosforu przy wiatrach odlądowych. Z różnorodnych procesów dynamicznych zachodzących w powierzchniowej warstwie mieszania, największe znaczenie z punktu widzenia okresowej kumulacji materii w mikrowarstwie powierzchniowej mają wiry Langmuira i fale wewnętrzne (sejsze). Tlen i inne gazy tworzące drobne pęcherzyki wynoszą ku powierzchni substancje chemiczne rozpuszczone i zawiesinę. Stopień nasycenia wody powierzchniowej tlenem w istotny sposób wpływa na wielkość kumulacji fosforu organicznego i rozpuszczonych fosforanów w mikrowarstwie. Procesami zubożającymi tę warstwę są: zapadanie się mas wodnych i sedymentacja, szczególnie istotna dla dużych agregatów cząstek mineralnych, jak i tych składających się z obumarłej materii organicznej czy wydalin zooplanktonu. Falkowska (1996) przypisała mikrowarstwie powierzchniowej rolę „naskórka” morza, którego właściwości wyznaczają szczególną rolę w procesach zachodzących na granicy dwóch środowisk: hydrosfery i atmosfery. W następnych latach autorka ta badała zmienność grubości pobieranej mikrowarstwy różnymi metodami: płytą teflonową, płytą szklaną i siatką (Falkowska 1999a). Najcieńszą warstwę wody o grubości 10  $\mu\text{m}$  pobrano płytą teflonową, szklaną – 90  $\mu\text{m}$ , zaś siatką – 250  $\mu\text{m}$ . Na jakość pobierania wody w mikrowarstwie płytą szklaną i siatką istotny wpływ miały prędkość wiatru (do granicznej prędkości 8  $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , kiedy uwarstwienie wody zostawało zaburzone). Na pobieranie powierzchniowych próbek wody płytą teflonową istotny wpływ miały skład chemiczny i struktura materii organicznej, zaś przy zastosowaniu siatki – temperatura wody. Używając powyższych metod pobierania próbek wody z mikrowarstwy autorka oceniła, jak wygląda uwarstwienie maksymalnych

stężeń badanych składników (Falkowska 1999b). Rozpuszczony węgiel organiczny i fosfor organiczny kumulują się w powierzchniowych 10  $\mu\text{m}$ . Najwyższe stężenia azotanów i fosforanów stwierdzono w grubszej warstwie (90 i 250  $\mu\text{m}$ ). Różnice w kumulacji poszczególnych związków zależały prawdopodobnie od produkcji pierwotnej lub tempa rozkładu materii organicznej.

W estuariowym jeziorze Gardno stwierdzono kilkakrotnie wyższe stężenia związków fosforowych i azotowych w mikrowarstwie powierzchniowej niż w wodzie podpowierzchniowej, natomiast brak różnic w przypadku jonu chlorkowego (Trojanowski i in. 2001). Mudryk i in. (1999) badając mikrowarstwę powierzchniową jeziora Gardno wykazali kumulację bakterioneustonów. Bakterie zdolne do rozkładania tłuszczów były liczniejsze w mikrowarstwie niż w wodach podpowierzchniowych. Natomiast produkcja bakterii (oszacowana na podstawie tempa wbudowywania tymidyny do komórkowego DNA) była wyższa w wodach podpowierzchniowych. Prawdopodobnie promieniowanie słoneczne (UV), zmienne zasolenie czy temperatura, a także zanieczyszczenia (metale ciężkie, pestycydy) wpływały na zmniejszenie produkcji bakterii w mikrowarstwie. W późniejszej pracy Mudryk i in. (2001) ocenili przydatność różnych pożywek mikrobiologicznych do izolacji mikroflory bakteryjnej pobranej z mikrowarstwy powierzchniowej oraz prześledzili dynamikę zmian liczebności i biomasy bakterii heterotroficznych. Również Donderski i in. (1999a) potwierdzili, że całkowita liczebność bakterii, jak i liczebność bakterii heterotroficznych były istotnie wyższe w mikrowarstwie niż w wodach podpowierzchniowych, osiągając maksimum w lipcu. Większość gatunków była specyficzna dla jednej strefy.

Jedną z pierwszych polskich prac dotyczących neustonów mikrowarstwy powierzchniowej wód słodkich była prezentacja wyników badań mikrobiologicznych jezior Pojezierza Iławskiego (Niewolak 1971). Próby hiponeustonów pobierane były jałowymi pipetami. Ogólna liczba bakterii (szacowana metodą bezpośredniego liczenia na filtrach membranowych, jak i posiewu na agarze zwykłym) była wyższa w mikrowarstwie niż na głębokości 30 cm. W mikrowarstwie powierzchniowej występowały liczniej bakterie z rodzaju *Azotobacter*, które są bardziej odporne na działanie promieni ultrafioletowych. Wyniki badań przeprowadzonych w jeziorze Jeziorak Mały wykazały ponownie, że liczebność bakterioneustonów jest znacznie wyższa niż bakterioplanktonu, a maksymalne liczebności występują w lipcu i sierpniu (Donderski i in. 1999b). Bakterie neustonowe były bardziej odporne na jony metali ciężkich niż bakterie wyizolowane z wód podpowierzchniowych. Najbardziej hamująco na wzrost bakterii neustonowych wpływały jony ołowiu, a najslabiej jony miedzi. W

Jezioraku Małym całkowita liczba bakterii oraz liczba bakterii heterotroficznych były stale wyższe w mikrowarstwie niż w wodach podpowierzchniowych na głębokości 20 cm (Walczak i in. 2000). Węglowodory aromatyczne (pochodzenia zarówno naturalnego, jak i antropogenicznego) były lepiej rozkładane przez bakterioneuston.

Badania humusowego jeziora Flosek leżącego na Pojezierzu Mazurskim wykazały wzbogacenie mikrowarstwy w organiczne, a szczególnie cząstkowe formy azotu (Hillbricht-Ilkowska i in. 1997). Glony i ich najmniejszy składnik – pikoplankton „unikały” przebywania w mikrowarstwie powierzchniowej. Podobnie badania trzech jezior różniących się trofią wód wykazały, że kumulacja całkowitych i cząstkowych form biopierwiastków oraz bakterii w mikrowarstwie jest istotna, aczkolwiek występuje z różną intensywnością (Kostrzewska-Szlakowska 2000). Natomiast nie stwierdzono kumulacji chlorofilu *a* w mikrowarstwie powierzchniowej.

## 9. Podsumowanie

Mikrowarstwa powierzchniowa kontaktująca się zarówno z atmosferą, jak i wodami głębszymi, wraz ze swoimi fizyczno-chemicznymi właściwościami tworzy specyficzną strefę życia w wodach słodkich i oceanicznych. Jest narażona na działanie wiatrów, prądów, promieniowania słonecznego, opadów, zmiennej temperatury zarówno powietrza, jak i wody podpowierzchniowej. Stanowi granicę, przez którą nieustannie trwa wymiana pomiędzy atmosferą a wodą: gazów, ciepła, rozproszonych cząsteczek wody i substancji chemicznych. Specyficzne warunki panujące w tej strefie faworyzują rozwój niektórych organizmów, limitując rozprzestrzenianie innych. To prowadzi do powstania „powierzchniowego zespołu” organizmów – neuston, występującego na powierzchniach wszystkich zbiorników wodnych na całym świecie.

## Piśmiennictwo

- Albright L. J. 1980 – Photosynthetic activities of phytoneuston and phytoplankton – *Can. J. Microbiol.* 26: 389–392.
- Atlas E., Giam C. S. 1981 – Global transport of organic pollutants: ambient concentration in the remote marine atmosphere – *Science*, 211: 163–165.
- Banse K. 1975 – Pleuston and neuston: on the categories of organisms in the uppermost pelagial – *Int. Rev. ges. Hydrobiol.* 60: 439–447.
- Bezdek H. F., Carlucci A. F. 1974 – Concentration and removal of liquid microlayers from a seawater surface by bursting bubbles – *Limnol. Oceanogr.* 19: 126–132.
- Bidleman T. F., Olney C. E. 1973 – Chlorinated hydrocarbons in the Sargasso Sea atmosphere and surface water – *Science*, 183: 516–518.

- Blanchard D. C., Syzdek L. D. 1970 – Mechanism for the water-to-air transfer and concentration of bacteria – *Science*, 170: 626–628.
- Blanchard D. C., Syzdek L. D. 1974 – Bubble tube: Apparatus for determining rate of collection of bacteria by an air bubble rising in water – *Limnol. Oceanogr.* 19: 133–138.
- Bratbak G. 1987 – Carbon flow in an experimental microbial ecosystem – *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 36: 267–276.
- Carlson D. J. 1982 – Phytoplankton in marine surface microlayers – *Can. J. Microbiol.* 28: 1226–1234.
- Carlson D. J., Cantey J. L., Cullen J. J. 1988 – Description of and results from a new surface microlayer sampling device – *Deep-Sea Res.* 35: 1205–1213.
- Carlucci A. F., Craven D. B., Henrichs S. M. 1985 – Surface-film microheterotrophs: amino acid metabolism and solar radiation effects on their activities – *Mar. Biol.* 85: 13–22.
- Crow S. A., Ahearn D. G., Cook W. L., Bourquin A. W. 1975 – Densities of bacteria and fungi in coastal surface films as determined by a membrane-adsorption procedure – *Limnol. Oceanogr.* 20: 644–645.
- Danos S. C., Maki J. S., Remsen C. C. 1983 – Stratification of microorganisms and nutrients in the surface microlayer of small freshwater ponds – *Hydrobiologia*, 98: 193–202.
- Dietz A. S., Albright L. J., Tuominen T. 1976 – Heterotrophic activities of bacterioneuston and bakterioplankton – *Can. J. Microbiol.* 22: 1699–1709.
- Dobson F. 1983 – Introductory physical oceanography (W: Air–sea exchange of gases and particles. Red. P. S. Liss, W. G. D. Slinn) – Reidel Publishing Company, NATO ASI Series, Dordrecht, Boston, Lancaster, Series C. Mathematical and Physical Sciences No. 108: 53–120.
- Donderski W., Walczak M., Mudryk Z., Kobylński M. 1999a – Neustonic bacteria number, biomass and taxonomy – *Pol. J. Environ. Stud.* 8: 137–141.
- Donderski W., Walczak M., Mudryk Z., Skórczewski P. 1999b – The influence of heavy metal ions on neustonic bacteria – *Baltic Coastal Zone*, 3: 53–64.
- Dragčević D. J., Pravdić V. 1981 – Properties of the seawater–air interface. 2. Rates of surface film formation under steady state conditions – *Limnol. Oceanogr.* 26: 492–499.
- Elzerman W. A., Armstrong D. E. 1979 – Enrichment of Zn, Cd, Pb and Cu in the surface microlayer of lakes Michigan, Ontario, and Mendota – *Limnol. Oceanogr.* 24: 133–144.
- Estep K. W., Maki J. S., Danos S. C., Remsen C. C. 1985 – The retrieval of material from the surface microlayer with screen and plate samplers and its implications for partitioning of material within the microlayer – *Freshw. Biol.* 15: 15–19.
- Estep K. W., Remsen C. C. 1985 – Influence of the surface microlayer on nutrients, chlorophyll and algal diversity of a small eutrophic bog pond – *Hydrobiologia*, 121: 203–213.
- Falkowska L. 1996 – Mikrowarstwa powierzchniowa morza. Właściwości i procesy – Wyd. Uniwersytetu Gdańskiego, Rozprawy i monografie nr 218.
- Falkowska L. 1999a – Sea surface microlayer: a field evaluation of teflon plate, glass plat and screen sampling techniques. Part I. Thickness of microlayer samples and relation to wind speed – *Oceanologia*, 41: 211–221.
- Falkowska L. 1999b – Sea surface microlayer: a field evaluation of teflon plate, glass plat and screen sampling techniques. Part II. Dissolved and suspended matter – *Oceanologia*, 41: 223–240.
- Falkowska L., Bolałek J. 1991 – Nitrogen and phosphorus exchange in the air–sea contact zone – *Oceanologia*, 30: 47–56.

- Freeman C., Lock M. A. 1995 – The biofilm polysaccharide matrix: a buffer against changing organic substrate supply – *Limnol. Oceanogr.* 40: 273–278.
- Garrett W. D. 1965 – Collection of slicks-forming materials from the sea surface – *Limnol. Oceanogr.* 10: 602–605.
- Goldacre R. J. 1949 – Surface films on natural bodies of water – *J. Anim. Ecol.* 18: 36–39.
- Green T., Houk D. F. 1979 – The removal of organic surface films by rain – *Limnol. Oceanogr.* 24: 966–970.
- Grzybowski W. 2001 – Contamination of coastal water samples collected for organic carbon analysis by a surface microlayer – *Pol. J. Ecol.* 49: 191–193.
- Guthrie M. 1989 – Animals of the surface film – *Naturalists' Handbooks* 12, Richmond Publishing Co. Ltd., Slough.
- Hardy J. T. 1973 – Phytoneuston ecology of a temperate marine lagoon – *Limnol. Oceanogr.* 18: 525–533.
- Hardy J. T. 1982 – The sea surface microlayer: biology, chemistry and anthropogenic enrichment – *Prog. Oceanogr.* 11: 307–328.
- Hardy J. T., Apts C. W. 1984 – The sea–surface microlayer: phytoneuston productivity and effects of atmospheric particulate matter – *Mar. Biol.* 82: 293–300.
- Hardy J. T., Apts C. W. 1989 – Photosynthetic carbon reduction: high rates in the sea–surface microlayer – *Mar. Biol.* 101: 411–417.
- Hardy J. T., Apts C. W., Crecelius E. A., Fellingham G. W. 1985 – The sea–surface microlayer: fate and residence time of atmospheric metals – *Limnol. Oceanogr.* 30: 93–101.
- Hardy J. T., Coley J. A., Antrim L. D., Kiesser S. L. 1988 – A hydrophobic large-volume sampler for collecting aquatic surface microlayer: characterization and comparison with the glass plate method – *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 45: 822–826.
- Hardy J. T., Hunter K. A., Calmet D., Cleary J. J., Duce R. A., Forbes T. L., Gladyshev M. L., Harding G., Shenker J. M., Tratnyek P., Zaitsev Y. 1997 – Report Group – Biological effects of chemical and radiative change in the sea surface (W: The sea surface and global change. Red. P. S. Liss, R. A. Duce) – Cambridge University Press, Cambridge, 35–70.
- Harris G. P., Lott J. N. A. 1973 – Observation of Langmuir circulations in Lake Ontario – *Limnol. Oceanogr.* 18: 584–589.
- Harvey G. W. 1966 – Microlayer collection from the sea surface. A new method and initial results – *Limnol. Oceanogr.* 11: 608–613.
- Harvey G. W., Burzell L. A. 1972 – A simple microlayer method for small samples – *Limnol. Oceanogr.* 17: 156–157.
- Hatcher R. F., Parker B. C. 1974 – Microbial and chemical enrichment of freshwater–surface microlayers relative to the bulk–subsurface water – *Can. J. Microbiol.* 20: 1051–1057.
- Hermansson M., Dahlbäck B. 1983 – Bacterial activity at the air/water interface – *Microb. Ecol.* 9: 317–328.
- Hermansson M., Kjelleberg S., Korhonen T. K., Stenström T. A. 1982 – Hydrophobic and electrostatic characterization of surface structures of bacteria and its relationship to adhesion to an air–water interface – *Arch. Microbiol.* 131: 308–312.
- Hillbricht-Ilkowska A., Jasser I., Kostrzewska-Szlakowska I. 1997 – Air–water interface: dynamics of nutrients and picoplankton in the surface microlayer of a humic lake – *Verh. Int. Verein. Limnol.* 26: 319–322.

- Hühnerfuss H. 1981 – On the problem of sea surface film sampling: a comparison of 21 microlayer-, 2 multilayer-, and 4 selected subsurface-samplers – *mt* 12: 170–173.
- Johnson B. D., Cooke R. C. 1980 – Organic particle and aggregate formation resulting from the dissolution of bubbles in seawater – *Limnol. Oceanogr.* 25: 653–661.
- Jones G. W., Baines L., Genthner F. J. 1991 – Heterotrophic bacteria of the freshwater neuston and their ability to act as plasmid recipients under nutrient deprived conditions – *Microb. Ecol.* 22: 15–25.
- Kjelleberg S., Håkansson N. 1977 – Distribution of lipolytic, proteolytic, and amylolytic marine bacteria between the lipid film and the subsurface water – *Mar. Biol.* 39: 103–109.
- Kjelleberg S., Stenström T. A., Odham G. 1979 – Comparative study of different hydrophobic devices for sampling lipid surface films and adherent microorganisms – *Mar. Biol.* 53: 21–25.
- Knulst J. C. 1996 – Interface in aquatic ecosystems: implications for transport and impacts of anthropogenic compounds – *Rozpr. dokt.*, Lund, Szwecja.
- Knulst J. C., Backlund P., Hessen D. O., Riise G., Södergren A. 1997 – Response of surface microlayers to artificial acid precipitation in a meso-humic lake in Norway – *Water Res.* 31: 2177–2186.
- Kostrzevska-Szlakowska I. 2000 – Air–water interface in lakes: relations to in-lake trophism – *Verh. Int. Verein. Limnol.* 27: 1871–1874.
- Kostrzevska-Szlakowska I. 2002 – Nutrient composition and microbial biomass at surface microlayer of a small, humic lake (Poland) – *Verh. Int. Verein. Limnol.* 28: 1721–1723.
- Lampert W., Sommer U. 1996 – *Ekologia wód śródlądowych* – Wyd. Naukowe PWN, Warszawa.
- Lapedes D. N. (red.) 1976 – *McGraw-Hill Dictionary of the life sciences* – McGraw-Hill Book Company, New York., St. Louis, San Francisco.
- Liss P. S., Duce R. A. (red.) 1997 – *The sea surface and global change* – Cambridge University Press, Cambridge.
- Liss P. S., Slinn W. G. (red.) 1983 – *Air–sea exchange of gases and particles* – Reidel Publishing Company, NATO ASI Series, Series C. Mathematical and Physical Sciences No. 108.
- Maki J. S. 1993 – The air–water interface as an extreme environment (W: *Aquatic microbiology, an ecological approach*. Red. T. E. Ford) – Blackwell Scientific Publications, Boston, 409–439.
- Maki J. S., Hermasson M. 1994 – The dynamics of surface microlayers in aquatic environments (W: *The biology of particles in aquatic systems*. Red. R. S. Wotton) – Lewis Publishers, Boca Raton, Ann Arbor, London, 161–181.
- Maki J. S., Remsen C. C. 1989 – Examination of a freshwater surface microlayer for diel changes in the bakterioneuston – *Hydrobiologia*, 182: 25–34.
- Mudryk Z. 1998 – Occurrence and distribution of bacteria decomposing organic phosphorus compounds in the surface seawater layers – *Oceanol. Stud.* 3: 43–55.
- Mudryk Z., Donderski W. 1996 – Distribution and activity of proteolytic bacteria in the surface and subsurface water layers in the region of the Gdańsk Deep – *Oceanol. Stud.* 4: 3–17.
- Mudryk Z., Donderski W., Skórczewski P., Walczak M. 1999 – Neustonic and planktonic bacteria isolated from a brackish lake Gardno – *Pol. Arch. Hydrobiol.* 46: 121–129.
- Mudryk Z., Donderski W., Skórczewski P., Walczak M. 2000 – Effect of some heavy metals on neustonic and planktonic bacteria isolated from the Deep of Gdańsk – *Oceanol. Stud.* 29: 89–99.

- Mudryk Z., Donderski W., Skórczewski P., Walczak M. 2001 – Liczebność i biomasa heterotroficznych bakterii neustonowych i planktonowych w estuariowym jeziorze Gardno – Słupskie Pr. Przyr. 1: 95–104.
- Mudryk Z., Korzeniewski K., Falkowska L. 1991 – Bacteriological investigation of the surface microlayer of the Gulf of Gdańsk – *Oceanologia*, 30: 93–103.
- Mudryk Z., Skórczewski P. 1998 – Antibiotic resistance in marine neustonic and planktonic bacteria isolated from the Gdańsk Deep – *Oceanologia*, 40: 125–136.
- Münster U., Heikkinen E., Knulst J. 1998 – Nutrient composition, microbial biomass and activity at the air–water interface of small boreal forest lakes – *Hydrobiologia*, 363: 261–270.
- Napolitano G. E., Cicerone D. S. 1999 – Lipids in water–surface microlayers and foams (W: *Lipids in freshwater ecosystems*. Red. M. T. Arts, B. C. Wainman) – Springer-Verlag, New York, 235–262.
- Nichols P. D., Espey Q. I. 1991 – Characterisation of organic matter at the air–sea interface, in subsurface water, and in bottom sediments near the Malabar Sewage Outfall in Sydney's coastal region – *Aust. J. Mar. Freshw. Res.* 42: 327–348.
- Niewolak S. 1971 – A microbiological study on the hyponeuston of the Iława lakes in the summer season – *Acta Hydrobiol.* 13: 295–311.
- Norkrans B. 1980 – Surface microlayers in aquatic environments (W: *Advances in microbial ecology*. Red. M. Alexander) – Plenum Press, New York, London, Vol. 4: 51–85.
- Przestalski S. 1993 – *Fizyka z elementami biofizyki i agrofizyki* – Wyd. Akademii Rolniczej, Wrocław.
- Ricci N., Erra F., Russo A., Banchetti R. 1991 – The air–water interface: a microhabitat for hypotrichous settlers (Protista, Ciliata) – *Limnol. Oceanogr.* 36: 1178–1188.
- Saijo Y., Mitamura O., Ogiyama K. 1974 – Chemical composition of surface film in the coastal sea area and in freshwater lakes – *Jap. J. Limnol.* 35: 110–116.
- Schorer M., Eisele M. 1997 – Accumulation of inorganic and organic pollutants by biofilms in the aquatic environment – *Water Air Soil Pollut.* 99: 651–659.
- Sieburth J. N. 1983 – Microbial and organic-chemical processes in the surface and mixed layers (W: *Air–sea exchange of gases and particles*. Red. P. S. Liss, W. G. N. Slinn) – Reidel Publishing Company, NATO ASI Series, Dordrecht, Boston, Lancaster, Series C. Mathematical and Physical Sciences No. 108: 121–172.
- Sieburth J. N., Wilis P. J., Johnson K. M., Burney C. M., Lavoie D. M., Hinga K. R., Caron D. A., French III F. W., Johnson P. W., Davis P. G. 1976 – Dissolved organic matter and heterotrophic microneuston in the surface microlayers of the North Atlantic – *Sciences*, 194: 1415–1418.
- Södergren A. 1984 – Small-scale changes in the biological and chemical composition of surface microlayers in a eutrophic lake – *Verh. Int. Verein. Limnol.* 22: 765–771.
- Södergren A. 1987 – Origin and composition of surface slicks in lakes of differing trophic status – *Limnol. Oceanogr.* 32: 1307–1316.
- Södergren A. 1993 – Role of aquatic surface microlayer in the dynamics of nutrients and organic compounds in lakes, with implications for their ecotones – *Hydrobiologia*, 251: 217–225.
- Södergren A., Larsson P., Knulst J., Bergqvist C. 1990 – Transport of incinerated organochlorine compounds to air, water, microlayer, and organisms – *Mar. Pollut. Bull.* 21: 18–24.
- Starmach K., Wróbel S., Pasternak K. 1978 – *Hydrobiologia* – PWN, Warszawa.

Trojanowski J., Trojanowska C., Antonowicz J. 2001 – Nitrogen and phosphorus in surface microlayers of an estuarine, shallow lake (north Poland) – *Ecohydrology & Hydrobiology*, 1: 457–463.

Tsyban A. V. 1971 – Marine bakterioneuston – *J. Oceanog. Soc. Japan*, 27: 56–66.

Walczak M., Donderski W., Mudryk Z., Skórczewski P. 2000 – Aromatic hydrocarbon decomposition by neustonic bacteria. I. Single-ring hydrocarbon biodegradation – *Pol. J. Environ. Stud.* 9: 471–474.

Wallace G. T., Duce R. A. 1978 – Transport of particulate organic matter by bubbles in marine waters – *Limnol. Oceanogr.* 23: 1155–1167.

Wangersky P. J. 1976 – The surface film as a physical environment – *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 7: 161–176.

Weiss P., Schweitzer B., Amann R., Simon M. 1996 – Identification in situ and dynamics of bacteria on limnetic organic aggregates (Lake Snow) – *Appl. Environ. Microbiol.* 62: 1998–2005.

Wetzel R. G. 1983 – *Limnology* – Saunders College Publishing, New York, Berlin, Heidelberg.

Xhoffer C., Wouters L., Grieken R. 1992 – Characterization of individual particles in the North Sea surface microlayer and underlying seawater: comparison with atmospheric particles – *Environ. Sci. Technol.* 26: 2151–2162.

## Summary

The atmosphere–water interface interacts through the surface microlayer – a boundary layer, up to one mm in depth, with unique physical, chemical and biological properties. The surface microlayer covers approximately 71% of the surface of our planet. Compared with the sub-surface water, the surface layer is generally more physically stable, and rich in particulate matter, organic compounds, metals and organisms.

According to modern description it is a layer's system of strata of organic constituents. The layer of water nearest atmosphere consists mainly of free fatty acids, glycerides, phospholipids, hydrocarbons and is called the lipid film. Beneath polysaccharide–protein layer occur. The deepest layer, the biological stratum is inhabited by bacterio-, phyto- and zooneuston consistently.

First methodological papers dealing with the techniques of collections of the aquatic surface microlayer were published in sixties and seventies of the last century. The methods used to collect samples vary, from a reasonably simple technique like glass plate, to rotating teflon drum device mounted in front of slow-moving boat.

Main processes which take place in the surface microlayer becomes an accumulation layer, where the concentration of various chemical compounds and microorganisms exceeds that of the subsurface water by orders of magnitude, or depletion layer, where concentration are less than that in the bulk water. There are two directions of the processes: transport mechanisms from the water column to the atmosphere and *vice versa*, *via* surface microlayer.

Dissolved substances, particles and microorganisms are brought to the interface by rising bubbles, convergent circulation and upwelling from sediments and subsurface water. Dissolution, sedimentation, diffusion, Langmuire circulation all aid in the transport of material from the surface microlayer to the subsurface water. The damping effect of the film on the capillary waves influences the aerosol formation and hence, the transport mechanisms from the surface water to the atmosphere. The microlayer is also a sink for fallout from the atmosphere. Several authors have

observed accumulation of polychlorinated biphenyls (PCB), heavy metals, DDT, insecticides and pesticides and other toxic substances in freshwater and marine systems.

The presence of a surface microlayer creates a unique environment for microorganisms, known as the neuston. Organisms from the most major divisions of the plant and animal kingdom either live there, reproduce or feed. Of particular interest are the microneuston, which may be involved in biogeochemical cycling (especially bacteria and algae), and neustonic eggs and larvae of commercially important fish and shellfish (in marine ecosystems). The surface microlayer hosts different microflora, less diversified and a considerably greater number of microorganisms than the subsurface water. Most studies suggest, that the surface microlayer represent a highly productive, metabolically active interface. Organisms inhabiting the surface microlayer experience potentially detrimental factors such as solar radiation, temperature fluctuations, the presence of toxic organic substances and heavy metals at high concentrations, wind and wave.

Polish research concern on biological and chemical composition, and activity of bacterioneuston of the surface microlayer started during last ten years. The research focused in three regions of the Northern Poland: south part of the Baltic Sea, including Gdańsk Gulf, and freshwater and salinity lakes of Pomeranian and Masurian District.

(wpłynęło: 24 II 2003 r.)