

JAN IGOR RYBAK
Instytut Ekologii PAN
Warszawa

Przegląd badań nad osadami dennymi jezior

W dotychczasowych badaniach osadów dennych jezior wyróżnić można 4 zasadnicze kierunki:

- 1 — badania składu chemicznego osadów dennych i na tej podstawie próby ich klasyfikacji;
- 2 — badania procesów zachodzących w osadach dennych (mineralizacja, odkładanie różnych związków i substancji itp.);
- 3 — paleolimnologiczna charakterystyka jezior;
- 4 — badania bentosu.

W niniejszym artykule omówione zostaną dwa pierwsze kierunki badań nad osadami dennymi jezior.

W literaturze światowej, szczególnie w okresach wcześniejszych zdecydowanie przeważają prace dotyczące składu chemicznego i próby klasyfikacji mułów różnych zbiorników. Niemniej, szczególnie w Stacji Limnologicznej w Kosinie i w Laboratorium Badań Sapropelu (ZSRR) w latach trzydziestych powstał cały szereg prac dotyczących przemian zachodzących w osadach dennych jezior, roli w nich fauny dennej, procesów bakteriologicznych i wymiany pierwiastków i związków chemicznych między dnem i przydenną warstwą wody. Tamże, bodajże po raz pierwszy, zwrócono uwagę na możliwość badania skutków działalności bakterii w mule jeziornym (wydzielanie się gazów, pochłanianie tlenu) jako wskaźnik intensywności i tempa procesów mineralizacji.

Stosunkowo dużo publikacji ukazało się na temat zawartości w osadach dennych materii organicznej, będącej poważnym źródłem zasobów energetycznych i w procesie mineralizacji włączanych następnie do obiegu materii i przepływu energii w zbiorniku.

Wreszcie, szczególnie w ostatnim okresie ukazał się cykl prac poświęconych zużyciu w różnych warunkach (przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych) tlenu przez osady denne i roli w tym procesie fauny dennej.

Charakterystyka osadów dennych jezior

Badania osadów dennych zapoczątkował w 1862 r. Post (wg Lundquista 1927), który jako pierwszy dokonał podziału osadów jeziornych na „gyttja” i „dy”. Terminy te stosowane są w literaturze do dziś. Pod określeniem „gyttja” rozumiał Post osady składające się z mieszaniny szczątków roślin i zwierząt, skorupki mięczaków, ziarn kwarcu i innych

minerałów. Osady typu „dy”, poza wymienionymi składnikami, zawierały jeszcze substancje o charakterze humusowym. P o t o n i e (1908) wprowadził termin „sapropel” dla oznaczenia brunatnoczarnych, tworzących się w środowisku beztlenowym osadów oraz termin „tyrfopel” dla osadów, których głównym składnikiem są szczątki roślin wyższych, a proces ich rozkładu, prowadzący do zwęglania, zachodzi w środowisku kwaśnym (kwasy humusowe). Dalej komplikowano ten prosty dotychczas podział. I tak L u n d q u i s t (1927) wyróżnił 6 typów osadów: 1) gliniaste, 2) wapienne, 3) gyttya glonowa, 4) gyttya gliniasta, 5) dy, 6) żelaziste. Opierał się przy tym na proporcji w występowaniu gliny, CaCO_3 i szczątków organizmów roślinnych. Podobny podział dotyczący osadów sapropelowych podaje L e p n e v a (1950). Opierając się na terminach wprowadzonych przez P o s t a, T h i e n e m a n n (1925) podzielił według tego kryterium jeziora na 2 grupy: 1) jeziora z dy — o wodzie brązowej i kwaśnym humusie w osadach dennych i 2) jeziora z gyttya — o słabo zabarwionej wodzie i obojętnym humusie. Wreszcie klasyfikacją i typologią osadów dennych, a w szczególności osadów typu sapropel, zajmowali się również m. in. D e k s b a c h (1937), S t u r m (1939) i K o r d e (1956, 1959). Dalsze klasyfikacje osadów dennych i na ich podstawie jezior, idą w kierunku podziału dwóch zasadniczych grup — gyttya i dy oraz określenia szczegółowych kryteriów rozdziału tych typów (H a n s e n 1950, 1959a, 1959b, 1961). Szczegółowe omówienie tego problemu znaleźć można w obszernie udokumentowanej pracy W i e c k o w s k i e g o (1966).

Często jednak unikano zdecydowanej klasyfikacji, opierając się przy charakteryzowaniu osadów na konkretnie stwierdzonym składzie chemicznym. Dla przykładu podać można obszerną pracę U n g e m a c h a (1960), poświęconą szczegółowej chemicznej analizie osadów dennych 40 jezior środkowo-europejskich, K l e e r e k o p e r a (1955) — poświęconą osadom 50 jezior kanadyjskich, prace amerykańskich badaczy — F r e y a (1960a, 1960b), D e C o s t a (1964) i M u e l l e r a (1964) omawiające podobne zagadnienia oraz W i l s o n a i O p d y k e (1941), którzy pierwsi zwrócili uwagę na to, że osady w obrębie śródzieżerza nie mają jednakowego składu chemicznego i mogą być różnego typu. Badania składu chemicznego niektórych jezior angielskich dokonali: M a c k e r e t h (1965) — który swoje analizy przeprowadził w warstwie mułu sięgającej 6 m oraz G o r h a m i S w a i n e (1965) — którzy przeanalizowali zawartość całego szeregu pierwiastków w powierzchniowej warstwie mułu. Badania chemiczne mułu przeprowadzone były również na wielu jeziorach Zw. Radzieckiego. Wymienić tu można prace K u z n e c o v a, S p e r a n s k e j i K o n š i n a (1939), którzy przebadali skład materii organicznej kilkudziesięciu jezior, R o s s o l i m o i K u z n e c o v a (1934), C h a r t u l a r i (1939), którzy analizowali gazy wydzielające się z osadów dennych w procesie mineralizacji, F a t c h i n e j (1939) badającej pochłanianie przez muł związków fosforowych i I v l e v a (1937), który badał rozmieszczenie żelaza.

W Polsce badania składu chemicznego osadów dennych dotyczyły głównie jezior Suwalszczyzny. Na szczególną uwagę zasługują badania przeprowadzone przez S t a n g e n b e r g a (1938), obejmujące ponad 100 jezior. Autor na podstawie składu chemicznego badanych osadów dokonał ich klasyfikacji, omówił zależność między typem osadów a charakterem zbiornika i przeanalizował współwystępowanie poszczególnych składników chemicznych w osadach. W innej pracy tenże autor (S t a n g e n b e r g 1949) przeprowadził próbę powiązania zawartości azotu w osa-

dach z typem troficznym niektórych jezior Suwalszczyzny. Poszukiwaniem zależności pomiędzy typem troficznym jezior a zawartością materii organicznej i wapnia oraz wartością energetyczną osadów w powierzchniowej warstwie mułu zajął się autor niniejszego artykułu (Rybak w druku), analizując to zagadnienie na przykładzie 50 jezior różnych typów troficznych, leżących na terenie kilku pojezierzy i w Tatrach. W pracy tej przeprowadzono również analizę zróżnicowania przestrzennego i pionowego uwarstwienia wymienionych parametrów w obrębie śródziejzemia.

Szczegółową analizę rozmieszczenia wapnia, fosforanów oraz zawartości materii organicznej w osadach Jeziora Charzykowskiego przeprowadzili Stangenberg i Żemoytel (1952). Dokonali również analizy współwystępowania poszczególnych składników w osadach tego jeziora. Na uwagę zasługują również szczegółowe badania osadów byłego jeziora Żuchowo, obejmujące całą miąższość złoża (Stangenberg i inni 1957). W pracy przeprowadzono korelację między zawartością C org. i N org. w osadach.

Badania osadów jeziora Drużno przeprowadził Tadajewski (1956), znajdując zależność między występowaniem materii organicznej a wapniem. Ten sam autor (Tadajewski 1956, 1966) przeprowadził chemiczną analizę osadów dennych Jeziora Kortowskiego, gdzie m. in. analizowano występowanie wapnia, żelaza i azotu oraz zawartość materii organicznej w różnych strefach tego zbiornika. Wymienić również można opracowanie grupy jezior dorzecza Raduni (Januszkiewicz 1964), w którym podano skład chemiczny osadów dennych 12 jezior.

Na uwagę zasługują również prace Więckowskiego (1963, 1966), w których autor zajął się zagadnieniem genezy i wieku niektórych jezior mazurskich. Analizował on głębinowe warstwy osadów określając ich skład chemiczny, barwę, konsystencję i zawartość szczątków roślin i zwierząt.

Materia organiczna w osadach dennych jezior

Obumarły plankton oraz różne szczątki organiczne ulegają podczas opadania w toni wodnej częściowemu rozkładowi (Järnefelt 1955, Thomas 1955). W zależności od szeregu czynników (m. in. długość przebytej drogi) osiągające dno zbiornika szczątki organiczne znajdują się w różnym stanie rozkładu. Dotychczasowe badania osadów dennych wykazały, że zawartość materii organicznej w mule jezior wzrasta wraz ze wzrostem stopnia troficzności zbiornika (Deevey 1955, Rybak w druku) i jest uzależniona od wielkości produkcji pelagialu. Jednak do dna zbiornika dociera jedynie część tej produkcji. Skopincev (1949) stwierdza, że w głębokich zbiornikach zdecydowana większość planktonu nie dochodzi do dna i jest całkowicie mineralizowana w wodzie. O pewnej mineralizacji planktonu w wodzie świadczą dane Tutin (1955), która stwierdziła, że materia organiczna w sestonie jez. Windermere wynosi 30%, zaś w mule 26—28%. Źródłem substancji organicznej w osadach może być również materia rozpuszczona w wodzie. Skadovskij (1949) wyliczył, że ilość materii organicznej rozpuszczonej w wodzie może w morzach przewyższać ilość materii organicznej zawartej w organizmach do 300 razy, w jeziorach mało produktywnych — kilkanaście razy. Substancja ta, według niego, w określonych warunkach koaguluje i tworzy osady.

Osadzaniu temu sprzyja działalność organizmów filtrujących w planktonie. Tak więc, stwierdza Skadovskij, wytrącająca się materia organiczna a nie obumarły plankton jest głównym źródłem osadów. Stałym dawcą materii organicznej do wody są glony, przy czym część jej jest wydzielana przez komórki przyzyciowo. Według wyliczeń Kuznecova (1951) ilości te w przeliczeniu na węgiel wynoszą od 7 do 13% ilości węgla zawartego w komórkach.

Materia organiczna osadów dennych różnych typów troficznych jezior ma skład bardzo podobny. Jak wykazały badania Skadovskiego (1941) zarówno w jeziorach oligotroficznych jak i eutroficznych, wosków i substancji bitumicznych jest 5 — 8%, cukrów 10 — 14%, celulozy 7%, kompleksów humusowo-lipidowych 51 — 60%, azotu ogólnego ok. 4%.

Badania autora (Rybak w druku) wykazały, że wartość energetyczna materii organicznej osadów jezior różnych typów troficznych (przebadano 50 jezior) jest bardzo zróżnicowana i zawiera się w granicach od 1197 do 6775 cal/1 g materii organicznej osadu. Porównując wartości energetyczne materii organicznej pochodzącej z różnych środowisk Gorham i Sanger (1967) wykazali, że najwyższą wartość kaloryczną ma materia organiczna osadów dennych (5240 cal/1 g). Poza osadami analizowali oni materię organiczną fitoplanktonu, runa leśnego, roślin zielnych bagnisk, makrofitów wodnych itd.

Znaczną część materii organicznej w osadach stanowią bakterie. Jak podają zgodnie Chartulari (1939) oraz Kuznecov (1951), biomasa bakterii stanowi od 2,3% w jeziorach o humusowym charakterze osadów do 7,8% materii organicznej w jeziorach o osadach sapropelowych. Poważnym źródłem bakterii są według opinii Kuznecova (1951) glony, na powierzchni których (np. *Aphanisomenon*, *Microcystis*, *Pediastrum*) wytwarza się otoczka złożona z ogromnej ilości bakterii („planktonosfera”) odżywiających się przede wszystkim wydzielaną przez komórki materią organiczną. Liczebność bakterii szczególnie silnie wzrasta przy zamieraniu glonów (dotyczy to zresztą również i zooplanktonu). W szeregu przypadkach biomasa bakterii może osiągać 8 mg/1 l, przewyższając biomasę fitoplanktonu. Zawartość bakterii w mule wynosić może do 1500 g/1 m² dna w jeziorach eutroficznych i do 80 g/1 m² dna w jeziorach oligotroficznych. Dla jeziora Białego w Kosinie stwierdzono, że biomasa bakterii ok. 40-krotnie przewyższa biomasę makrobentosu.

Procesy mineralizacji w osadach dennych

Opadła na dno zbiorników substancja organiczna przechodzi, głównie na powierzchni osadów dennych, dalsze procesy mineralizacji. Vallentyne (1962) podaje za Kleerekoperem, że naturalne procesy rozkładu przebiegają dwoma drogami: 1) biochemiczny i bakteryjny rozkład w przewodach pokarmowych fauny dennej oraz 2) rozkład chemiczny. Rozkład biochemiczny zachodzi przede wszystkim na powierzchni osadów dennych i w wodzie, natomiast rozkład na drodze chemicznej głównie w głębszych warstwach osadów. Rozkład materii organicznej w osadach przez bakterie może być tak intensywny, że w niektórych przypadkach, jak podaje Vallentyne (1957), powoduje to podwyższenie temperatury mułu o 5° w porównaniu z temperaturą wody przydennej.

Jeżeli w wodzie naddennej znajduje się wolny tlen, to na powierzchni mułu odbywa się rozkład materii organicznej charakteryzujący się prze-

wagę procesów utleniających, ułatwiających mineralizację. Natomiast w środowisku beztlenowym zachodzą procesy gnilne, wywiązują się siarkowodór i metan, a zamiast wodorotlenków powstają siarczki żelaza, nadające osadowi barwę czarną. W dnie jezior dystroficznych znajdują się ogromne złoża dobrze zachowanych szczątków roślinnych, których rozkład jest bardzo powolny. Przyczyną tego jest prawdopodobnie alkalofilny charakter bakterii rozkładających błonnik, lub też nadmiar szczątków pochodzenia allochtonicznego (mchy torfowe itp.).

Badania nad rozkładem materii organicznej przeprowadzane były przede wszystkim w warunkach laboratoryjnych, chociaż podejmowane były również próby w warunkach naturalnych. Badania nad rozkładem martwego zooplanktonu w anaerobowych warunkach przeprowadzane były przez K r a u s e g o (1961). Badania przeprowadzał on zarówno w laboratorium jak i w warunkach naturalnych. Tempo rozkładu było w obu przypadkach podobne, jeśli do doświadczenia używał wody jeziornej. G o r b u n o v (1953), który ocenił intensywność rozkładu trzciny w zbiornikach delty Wołgi, stwierdził zależność między ilością mikroorganizmów a tempem rozkładu. Podobne zagadnienie podjął S o l s k i (1962) badając wymywanie fosforu i potasu z roślin wodnych. Znalazł on zależność między ilością światła a ilością związków wymywanych z roślin i pozostających w postaci rozpuszczonej w wodzie, oraz określił wpływ drobnoustrojów na ilość fosforu i potasu pozostających w wodzie. K u z n e c o v (1950) badając rozkład materii organicznej w anaerobowych warunkach mułowych, doszedł do wniosku, że obserwowane zahamowanie rozpadu substancji organicznej w głębszych warstwach osadu wynika z wcześniejszego całkowitego rozłożenia dostępnego dla mikroorganizmów kompleksu węglowodanowego. Wreszcie D e e v e y (1964) badał w warunkach naturalnych szybkość rozpadu poszczególnych grup planktonu. Stwierdził, że większość *Diaptomidae*, *Cyclopidae* i *Rotatoria* rozkładane jest w wodzie i do dna docierają jedynie fragmenty ich ciała. Z wioślarek (*Bosminidae* i *Hydoridae*) tylko skorupki osiągają dno.

Prowadzone były również badania nad rozkładem wprowadzanych do zbiornika substancji. Metodę tę zastosowali B r a n d t i K l u s t (1950) do oceny stopnia rozkładu sieci rybackich, stwierdzając zależność tempa rozkładu od temperatury. Autorzy sugerują stosowanie tej metody dla celów typologii jezior i jako miernika intensywności krążenia materii. Badano także wpływ wprowadzanych na dno zbiornika substancji na procesy tam zachodzące. K u z n e c o v (1950) stwierdził, że wprowadzenie związków organicznych w postaci glukozy i peptonu wzmaga tempo procesów rozpadu materii organicznej zawartej w mule. Substancje organiczne wprowadzane były do mułu jeziornego również w celu troficznego wzbogacenia dna (K a j a k 1965), co z jednej strony zwiększa liczebność fauny dennej, z drugiej najprawdopodobniej liczebność mikroorganizmów, przez co zwiększa się tempo przemiany substancji organicznej dna.

Rola tlenu w mineralizacji materii organicznej osadów dennych

Od dawna już zwracano uwagę na ogromną rolę, jaką w procesach rozkładu materii organicznej odgrywa tlen rozpuszczony w wodzie. Pierwszą próbę wyliczenia ogólnego zużycia tlenu przez osady denne dokonał już w roku 1908 w jeziorze Piestovo Lebedincev (wg S e m e n o v i c a

1960). Przeprowadził on laboratoryjne badania nad intensywnością pochłaniania tlenu przez osady dennie i podał przybliżone wyliczenie wielkości zużycia tlenu w okresie zimy przez powierzchniową warstwę mułu tego jeziora. Według jego obliczeń zużycie to wynosi 83% całego zużywanego w zbiorniku tlenu. K u z n e c o v (1939), który dokonał oceny zużycia tlenu w hypolimnionie jezior, stwierdził, że w okresie cyrkulacji przeważają procesy oddychania, w czasie zaś stagnacji — procesy utleniania wydzielających się z dna gazów. Te ostatnie zużywają 40 — 60% rozpuszczonego tlenu.

Zużycie tlenu przez osady dennie odbywa się na skutek: 1) działalności bakterii (rozkładających i utleniających materię organiczną) i fauny (zużywającej tlen na swoje potrzeby oddechowe) oraz 2) procesów chemicznych. Z pierwszym, biochemicznym zużyciem tlenu mamy głównie do czynienia w osadach typu gyttja, z drugim chemicznym — w osadach typu dy (L ö n n e r b l a d 1930). Z ogólnej ilości pochłanianego przez osady dennie tlenu, duża jego część jest zużywana na procesy życiowe fauny dennej. Z danych E d w a r d s a i R o l l e y a (1965) wynika, że w przypadku osadów rzecznych wynosi ona ok. 40% (obserwacje laboratoryjne). Własne eksperymenty autora (R y b a k w druku) wykazały, że w przypadku mułów jeziornych o nienaruszonej naturalnej strukturze i zachowaniu stratyfikacji tlenu w przydennych warstwach wody, zużycie tlenu powodowane obecnością w mule *Chironomus plumosus* (przy zagęszczeniu 3500 osobn/1 m²) zwiększyło się o 50%. Udział fauny dennej w oddychaniu całej biocenozy jeziornej wynosi według wyliczeń V e r d u i n a (1956) ok. 4%.

Zużycie tlenu przez osady badane było również przez wielu autorów przy okazji badań nad wymianą między wodą i mułem (M o r t i m e r 1941, 1942, S e m e n o v i č 1960). Pochłanianie tlenu w jeziorze i w warunkach laboratoryjnych badane było przez S t a l m a k o v á (1941), która nie stwierdziła różnic w pochłanianiu tlenu w czasie letniej i zimowej stagnacji, jak również przy różnych temperaturach.

W strefie warstwy wody przydennej, w zbiornikach stojących na skutek pochłaniania tlenu przez osady wytwarzać się mogą większe lub mniejsze deficyty tlenowe. Tego rodzaju deficyty obserwowano niejednokrotnie w wielu jeziorach eutroficznych o bogatych w materię organiczną osadach. Obserwowano je również w jeziorach oligotroficznych (B r u n d i n 1951), a także w morzu (B r o u a r d e l i F a g e 1955). Szczególnie silne deficyty tlenowe przydennych warstw wody obserwuje się w okresach stagnacji, niemniej na skutek intensywnego zużywania tlenu przez osady gradient tlenowy w przydennych warstwach wody w jeziorze eutroficznym obserwowano także i w czasie cyrkulacji mas wodnych jeziora (R y b a k w druku). Zburzenie tworzącego się przy dnie zbiorników gradientu tlenowego może mieć miejsce zarówno w okresie cyrkulacji przez unoszenie do góry mułu — przez krążącą wodę (G o r h a m 1958) jak i w okresie stagnacji, kiedy z mułu jezior wydzielają się duże ilości gazów (K u z n e c o v 1939, O h l e 1958, 1959, 1960). Ten ostatni proces jest tym większy, im większy jest deficyt tlenowy osadów (R o s s o l i m o i K u z n e c o v a 1934, O h l e 1958) i szczególnie silny w wypadku osadów jezior typu eutroficznego i dystroficznego (R y b a k w druku).

Metodę określenia tempa zużywania tlenu przez osady dennie w warunkach naturalnych opracował G a m b a r j a n (1952). Polega ona na opuszczeniu na dno zbiornika cylindra pobierającego wycinek dna wraz

z przydenną warstwą wody. Po okresie ekspozycji cylindra z próbą na dnie mierzy się zawartość pozostałego w wodzie nad dnem tlenu. Metoda ta nie pozwala na uwzględnienie wielkości gradientu powstałego w warstwie wody przylegającej do dna. Przy znanej znikomej dyfuzji tlenu w wodzie i braku mieszania wody naddennej, powstający deficyt tlenowy odcina dostęp tlenu do osadu, co sztucznie obniża otrzymane wyniki. Inną metodę proponują Edwards i Rolley (1965). Podobnie jak u Gambarjana pobrane próby inkubowali w warunkach laboratoryjnych, mieszając wodę w cylindrach przez cały okres trwania doświadczenia, aby nie dopuścić do wytworzenia się gradientu tlenowego na granicy woda — muł. Stosowane dotychczas metody badania zużycia tlenu przez osady dennie w warunkach naturalnych i laboratoryjnych dotyczyły bądź to wymieszanych prób osadów dennych (Caspers 1962), tzn. o zaburzonej naturalnej strukturze, czyli nie odpowiadające warunkom naturalnym panującym w profundalu jezior, bądź też nie uwzględniały powstającego nad osadem deficytu tlenowego. Należy więc stosować metodę pozwalającą uniknąć zaburzenia naturalnej struktury osadów i umożliwiającą obserwację charakteru uwarstwienia tlenowego nad osadem. Obydwa te warunki spełnia metoda rur „gradientowych” (Rybák 1966). Pozwala ona na analizę zmian koncentracji tlenu w wodzie leżącej bezpośrednio nad osadem dennym. Nienaruszone próby osadów o grubości ok. 10 cm (o naturalnej strukturze), razem z przydenną warstwą wody o wysokości ok. 18 cm, pobrane zmodyfikowanym rurowym chwytaczem dna (Kajak, Kacprzak, Polkowski 1965), inkubuje się w rurach ze szkła organicznego w stałych warunkach laboratoryjnych. Po okresie ekspozycji (24, 48 lub 72 godz.), przy pomocy igieł od zastrzyków, uprzednio wprowadzonych przez ścianki do wnętrza rur gradientowych pobiera się (w odstępach co 2 cm) próby wody do analizy zawartości tlenu. Dzięki tej metodzie obserwuje się wielkość i tempo tworzenia się gradientu tlenowego nad dnem, który świadczy o intensywności zachodzących w powierzchniowej warstwie procesów mineralizacji materii organicznej.

Wymiana substancji między dnem a wodą przydenną

Znaczna część substancji zawartych w osadach powraca do wody. Alsterberg (1922, 1925, 1927, 1929, 1930, 1935), który szereg swoich prac poświęcił temu zagadnieniu, obserwując zmętnienie przydennej warstwy wody doszedł do wniosku, że jest ono skutkiem przenikania różnych substancji z mułu do przydennych warstw wody. Z poglądem tym dyskutuje Rossolimo (1939), który badał wydzielanie do wody żelaza i amoniaku. Twierdzi on mianowicie, że mamy tu do czynienia z wynoszeniem przez organizmy bentosowe substancji z głębszych warstw osadów na powierzchnię mułu i do przydennych warstw wody. Tessenow (1964) dowiódł, że larwy *Chironomus plumosus*, przy naturalnej gęstości populacji (ok. 1000 osobn./1 m² dna), mogą 4-krotnie przyspieszyć przechodzenie krzemu z mułu do wody. Również Edwards i Rolley (1965) stwierdzili, że bezkręgowce dennie przyspieszają powrót substancji z mułu do wody. Omawianym zagadnieniem zajmowano się wielokrotnie. Zicker, Berger i Hasler (1956) — wymianą fosforu, Kjensmo (1964) — żelaza, Trifonova (1963) — azotu, Hayes, Reid i Cameron (1958) oraz Semenovič (1960) — zmianami warunków oksydacyjno-redukcyjnych. Ostatnią z wymienionych, bardzo obszerną pracę przeprowadzono w warunkach naturalnych. Na uwagę zasługują także prace

Mortimera (1941, 1942, 1949), poświęcone wymianie szeregu związków chemicznych. Szczególnie dwie pierwsze, w których autor przedstawił sezonowe zmiany warunków fizyczno-chemicznych w przydennej warstwie wody.

Zdecydowana większość prac omawiających rezultaty badań nad osadami dennymi jezior traktuje o stanie i charakterze osadów. Stosunkowo niewiele prac dotyczy procesów zachodzących w osadach, szczególnie w naturalnych warunkach jeziornych. Odczuwa się dotkliwy brak opracowań typu eksperymentalnego terenowego, prowadzonego w warunkach naturalnych, w nieznacznym jedynie stopniu zmieniającym warunki środowiskowe. Jest to sprawa niezwykle trudna i nastęrczająca wiele problemów metodycznych, niemniej pewne próby są już czynione w wielu instytucjach, w tym również i w Dziale Hydrobiologii Zakładu Ekologii PAN.

Piśmiennictwo

- Alsterberg, G. 1922 — Die respiratorischen Mechanismen der Tubificiden — Lunds Univ. Arkskr. Adv. 2: 1—176.
- Alsterberg, G. 1925 — Die Naturungszirkulation einiger Binnenseetypen — Arch. Hydrobiol. 15: 291: 338.
- Alsterberg, G. 1927 — Die Sauerstoffschichtung der Seen — Bot. Notiser: 255—274.
- Alsterberg, G. 1929 — Über das aktuellen und absolute O_2 — Defizit der Seen im Sommer — Bot. Notiser: 354—376.
- Alsterberg, G. 1930 — Die Thermischen und Chemischem Ausgleiche in dem Seen zwischen Boden und Wasserkontakt sowie ihre Biologische Bedeutung — Int. Revue ges. Hydrobiol. u. Hydrographie 24: 290—327.
- Alsterberg, G. 1935 — Die Dynamik des Stoffwechsels der Seen im Sommer — Lund Slerupoka Univ.: 1—180.
- Brandt, A., Klust, G. 1950 — Zelluloseabbau im Wasser — Arch. Hydrobiol. 43: 223—263.
- Brouardel, J., Fage, L. 1955 — Variation eu mer, de la teneur eu oxygène dissous au proche voisinage des sédiments — Marine Biol. and Oceanogr. suppl. 3: 40—44.
- Brundin, L. 1951 — The relation of O_2 — microstratification as the mud surface to the ecology of the profundal bottom fauna — Rep. Inst. Fresh. Res. Drott. 1950: 32—42.
- Caspers, H. 1962 — Die Bestimmung der Sediment aktivitat. Eine Methode zur Abschätzung der organischen Substanz im Benthos durch Messung der Sauerstoffzehrung — Int. Rev. ges. Hydrobiol. u. Hydrographie 47: 581—586.
- Chartulari, E. M. 1939 — Bakteriologičeskie i chimičeskie issledovanija riada podmoskovnych ozer v svjazi s voprosom razloženiya ıla s obrazovaniem gazov — Trudy Limnol. St. Kosino 22: 115—127.
- De Costa, J. J. 1964 — Latitudinal Distribution of Chydorid *Cladocera* in the Mississippi Valley, based on their remains in surficial lake sediments — Invest. Indiana Lakes and Streams 6: 65—101.
- Deevey, E. S. 1955 — The obliteration of the hypolimnion — Mem. Ist. Ital. Idrobiol. 8: 9—38.
- Deevey, E. S. 1964 — Preliminary account of fossilization of zooplankton in Rogers Lake — Verh. Internat. Verein. Limnol. 15: 981—992.
- Deksbach, N. K. 1937 — O terminie „sapropel” i o terminologii ilovych otloženiij voobščee — Trudy Gidrobiol. St. AN USSR 15: 1—10.

- Edwards, R. W., Rolley, H. L. J. 1965 — Oxygen consumption of river muds — *J. Ecol.* 53: 1—19.
- Fatčichina, O. F. 1939 — Poglōtiteľnaja sposobnost ilovych czernych otłoženij — *Trudy Limnol. St. Kosino* 22: 5—30.
- Frey, D. G. 1960a — The ecological significance of cladoceran remains in lake sediments — *Ecology* 41: 684—699.
- Frey, D. G. 1960b — On the occurrence of cladoceran remains in lake sediments — *Proc. Nat. Acad. Sci.* 46: 917—920.
- Gambarjan, M. E. 1962 — K metodike opredelenija intensivnosti destrukcii organičeskich veščestv v donnych otłoženijach glubokovodnych vodoemov — *Mikrobiologija* 31: 895—898.
- Gorbunov, K. V. 1953 — Rospad ostatkov vyžšich vodnych rastenij i ego ekologičeskaja rol v vodoemach nižnej zony delty Volgi — *Trudy Vsesojuz. Gidrobiol. Obsč.* 5: 158—202.
- Gorham, E. 1958 — Observations on the formation and breakdown of the oxidized microzone at the mud surface in lakes — *Limnol. Oceanogr.* 3: 291—298.
- Gorham, E., Sanger, J. 1967 — Caloric values of organic matter in woodland, swamp and lake soils — *Ecology* 48: 492—494.
- Gorham, E., Swaine, D. J. 1965 — The influence of oxidizing and reducing conditions upon the distribution of some elements in lake sediments — *Limnol. Oceanogr.* 10: 268—279.
- Hansen, K. 1950 — The geology and bottom deposits of Lake Tystrup So, Zealand — *Denmarks Geologiska* 76: 1—51.
- Hansen, K. 1959a — The terms Gyttja and Dy — *Hydrobiologia* 13: 309—315.
- Hansen, K. 1959b — Sediments from Danish Lakes — *J. Sediment. Petrology* 29: 38—46.
- Hansen, K. 1961 — Lake types and lake sediments — *Verh. Internat. Verein. Limnol.* 44: 285—290.
- Hayes, F. R., Reid, B. L., Cameron, M. L. 1958 — Lake water and sediment. II oxidation-reduction relations at the mud-water interface — *Limnol. Oceanogr.* 3: 308—317.
- Ivlev, V. S. 1937 — Materijaly po izučeniju balansa veščestva v ozere. Balans železa — *Trudy Limnol. St. Kosino* 21: 21—61.
- Januszkiewicz, J. 1964 — Porównanie typologiczne grupy jezior między rz. Radunią a Klasztorną Strugą i Supiną Małą w powiecie Kartuskim — *Dysertacja doktorska*: 103 pp.
- Järnefelt, H. 1955 — Über die Sedimentation des Sestons — *Verh. Internat. Vereinig. Limnol.* 12: 144—158.
- Kajak, Z. 1965 — Remarks of the causes of the scarcity of benthos in lake Lisunie — *Ekol. Pol. A* 13: 23—32.
- Kajak, Z., Kacprzak, K., Polkowski, R. 1965 — Chwytnacz rurowy do pobierania prób dna — *Ekol. Pol. B*, 11: 159—165.
- Kjensmo, J. 1964 — Exchange of iron between mud and water in a small Norwegian lake — *Schweitz. Zeitschr. für Hydrol.* 26: 69—73.
- Kleerekoper, H. 1955 — The chemistry of the sediments of fifty lakes in the ordovician and postordovician of Southern Ontario — *Verh. Internat. Vereinig. Limnol.* 12: 828—830.
- Korde, N. V. 1956 — O nomenklature i tipologii sapropelovych otłoženij — *Trudy Lab. Sapropel. Otłoženij* 6: 5—39.
- Korde, N. V. 1959 — O tipach otłoženij ozera Galičskogo i ego istoričeskom razvitij — *Trudy Lab. Sapropel. Otłoženij* 7: 106—119.
- Krause, H. R. 1961 — Einige Bemerkungen über den postmortalen Abbau von

- Süsswasser-Zooplankton unter Laboratorium und Freilandbedingungen — Arch. Hydrobiol. 57: 539—543.
- Kuznecov, S. I. 1939 — Opredelenie intensivnosti pogloščeniya kisloroda iz vodnoj massy ozera za ščet bakteriologičeskich processov — Trudy Limnol. St. Kosino 22: 53—74.
- Kuznecov, S. I. 1950 — Mikrobiologičeskaja charakteristika processov rospada organičeskogo veščestva v ilovyh otložnijach — Trudy Lab. Sapropel. Otložnij 4: 15—28.
- Kuznecov, S. I. 1951 — Rol mikroorganizmov v obrazovanii sapropelnyh otložnij — Mikrobiologija 3: 245—255.
- Kuznecov, S. I., Speranskaja, T. A., Konšin, V. D. 1939 — Sostav organičeskogo veščestva ilovyh otložnij različnyh ozer — Trudy Limn. St. Kosina 22: 75—104.
- Lepeva, S. G. 1950 — Žizn v ozerach (Žizn presnyh vod. 3.) — Moskva, 257—483.
- Lönnnerblad, G. 1930 — Über die Sauerstoffabsorption des Bodensubstrates in einiger Seetypen — Bot. Notiser. 53—60.
- Lundquist, G. 1927 — Bodenablagerungen und Entwicklungstypen der Seen — Die Binnengewässer II. Stuttgart, 124 pp.
- Mackereth, F. J. 1965 — Chemical investigation of lake sediments and their interpretation — Proc. of the Royal Soc. B 161: 295—309.
- Mortimer, C. H. 1941 — The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes — J. Ecology 29: 280—329, 30: 147—201.
- Mortimer, C. H. 1942 — The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes — J. Ecology 30: 147—201.
- Mortimer, C. H. 1949 — Seasonal changes in chemical conditions near the mud surface in two lakes of the English Lakes District — Verh. Internat. Vereinig. Limnol. 10: 353—356.
- Mueller, W. P. 1964 — The distribution of cladoceran remains in surficial sediments from three northern Indiana lakes — Invest. Indiana Lakes a. Streams 6: 1—63.
- Ohle, W. 1958 — Die Stoffwechselfynamik der Seen im Abhängigkeit von der Gasausscheidung ihres Schlammes — Vom Wasser 25: 127—149.
- Ohle, W. 1959 — Blick in die Tiefe des Grossen Plöner Sees mit Fernseh — und Photo — Kameras — Natur u. Volk 89: 177—188.
- Ohle, W. 1960 — Fernsehen, Photographie und Schallortung der Sedimentoberfläche in Seen — Arch. Hydrobiol. 57: 135—160.
- Potonié, H. 1908 — Die rezenten Kaustobiolithe und ihre Lagerstätten — Geol. L. A. Abh. 55.
- Rossolimo, L. L. 1939 — Rol ličinek *Chironomus plumosus* v obmene veščestvom meždu ilovymi otložnijam i vodoj ozera — Trudy Limnol. St. Kosino 22: 35—52.
- Rossolimo, L. L., Kuznecova, Z. 1934 — Donnoe gazooddelenie kak faktor kislorodnogo režima ozer — Trudy Limnol. St. Kosino 17: 87—117.
- Rybak, J. I. 1966 — Method for analyzing the microstratifications in near-bottom water layers — Bull. Acad. Pol. Sci. 14: 321—325.
- Rybak, J. I. (w druku) — Bottom sediments of the lakes of the different trophic type — Ekol. Pol. A.
- Semenovič, N. I. 1960 — Issledovanija kemičeskogo obmena meždu dnom i vodnoj massoj ozera — Lab. Ozerov. ANSSSR 11: 3—47.
- Skadovskij, S. N. 1941 — Faktory nakoplenija i preobrazovanija organičeskogo veščestva ilovyh otložnij — Trudy Lab. Sapropel. 2: 169—184.
- Skopincev, B. A. 1949 — O skorosti razloženiya organičeskogo veščestva otmeršego planktona — Trudy Vsesojuz. Hidrobiol. Obšč. 1: 34—43.

- Solski, A. 1962 — Mineralization of water plants. I. Extraction of phosphor and potassium in water — *Pol. Arch. Hydrobiol.* 10: 167—196.
- Stalmakova, T. O. 1941 — O poglošćenii kisloroda donnymi otloženijami nekotorych ozer Zalučija — *Trudy Lab. Sapropel.* 2: 36—43.
- Stangenberg, M. 1938 — Skład chemiczny osadów głębinowych jezior Suwalszczyzny. — *Rozpr. i sprawozd. Inst. Bad. Lasów Państw. A* 31: 7—44.
- Stangenberg, M. 1949 — Nitrogen and carbon in the bottom-deposits of lakes and in the soils under carp-ponds — *Verh. Internat. Vereinig. Limnol.* 10: 422—437.
- Stangenberg, M., Zemoytel, K. 1952 — Skład chemiczny osadów Jeziora Charzykowskiego — *Bull. Państw. Inst. Geolog.* 68: 139—172.
- Stangenberg, M., Zemoytel-Kolanko, K., Solski, Stangenberg, K. 1957 — Osady jeziora w Żuchowie koło Karnkowa — *Geolog. Biul. Inform.* 118: 267—310.
- Šturm, L. D. 1939 — K terminologii ozernych otloženij — *Trudy Lab. Sapropel.* 1: 1—10.
- Tadajewski, A. 1956 — Osady jeziora Družno jako siedlisko fauny dennej — *Ekol. Pol. A* 4: 293—316.
- Tadajewski, A. 1965 — Chemizm osadów dennych jeziora Kortowskiego — *Zesz. Nauk. WSR Olsztyn* 19: 59—79.
- Tadajewski, A. 1966 — Bottom sediments in different limnetic zones of an eutrophic lake — *Ekol. Pol. A* 14: 321—341.
- Tessenov, U. 1964 — Experimental Untersuchungen zur Kieselsäurerückführung aus dem Schlamm der Seen durch Chironomiden-larven (*Plumosus*-Gruppe) — *Arch. Hydrobiol.* 60: 497—504.
- Thienemann, A. 1925 — Die Binnengewässer Mitteleuropas — *Die Binnengewässer* 1: 255 pp.
- Thomas, E. A. 1955 — Sedimentation in oligotrophen und eutrophen Seen als Ausdruck der Productivität — *Verh. Internat. Vereinig. Limnol.* 13: 383—393.
- Trifonova, N. A. 1963 — Obmen rastvorimymi formami azota mežu gruntom i prodonnym sloem vody Ribinskogo vodočráníšča — *Materialy po Biol. Hidrobiol. Volžskich Vodočran.*: 116—116.
- Tutin, W. 1955 — Preliminary observations on a years cycle of sedimentation in Windermere, England — *Mem. Ist. Ital. Idrobiol.* 8: 469—484.
- Ungemach, H. 1960 — Sedimentchemismus und seine Beziehungen zum Stoffhaushalt in 40 europäischen Seen — *Disertation, Kiel*, 420 pp.
- Vallentyne, J. F. 1957 — The molecular nature of organic matter in lakes and oceans with lesser reference to sewage and terrestrial soil — *Fisheries Board of Canada* 14: 33—82.
- Vallentyne, J. F. 1962 — Solubility and the decomposition of organic matter in nature — *Arch. Hydrobiol.* 58: 423—434.
- Verduin, J. 1956 — Energy fixation and utilization by natural communities in western lake Erie — *Ecology* 37: 40—50.
- Więckowski, K. 1963 — Preliminary results of examinations of bottom deposits in the large Masurian Lakes — *Bull. Acad. Pol. Sci.* 11: 107—114.
- Więckowski, K. 1966 — Osady denne Jeziora Mikołajskiego — *Inst. Geogr., PAN* 57: 1—112.
- Wilson, I. T., Opdyke, D. F. 1941 — The distribution of the chemical constituents in the accumulated sediment of Tippecanoe lake — *Invest. Ind. Lakes* 2: 16—42.
- Zicker, E. L., Berger, K. C., Hasler, D. D. 1956 — Phosphorus release from beg lake muds — *Limnol. Oceanogr.* 1: 296—303.

A review of studies on the bottom sediments of lakes

Summary

The article contains a discussion of the more important studies concerned with chemical analysis of sediments, and classification of sediments and lakes on this basis. Particular attention has been paid to the problem of the contents and composition of organic matter in bottom sediments and its energy value in different habitats, and its origin in the sediments discussed. A review is given of studies dealing with mineralization process in bottom sediments, emphasising the important role of oxygen in these process. In conclusion some methodical aspects of investigations of oxygen consumption by sediments are discussed. Attention is drawn to the lack of studies on processes taking place in bottom sediments and to the insignificant number of elaborations of this type of field experiment carried out under natural conditions.