

KRYSPINA ŚMIERZCHALSKA
Instytut Warzywnictwa w Skierniewicach

ZASTOSOWANIE PROMIENIOWANIA JONIZUJĄCEGO W PROCESIE OCZYSZCZANIA ŚCIEKÓW PRZEZNA- CZONYCH DO WYKORZYSTANIA W ROLNICTWIE*)

Zagadnieniem zastosowania radiacji w procesie oczyszczania ścieków i odpadów miejskich w ostatnich latach zainteresowało się wiele krajów. Wobec rozwijającej się urbanizacji usuwanie i wykorzystywanie ścieków i odpadów stałych urasta do problemów niezwykle ważnych.

W wielu krajach duży procent ścieków wykorzystuje się do nawożenia upraw rolniczych, łąk, pól uprawnych, także ogrodniczych i leśnych.

Odpady miejskie, stosowane do nawożenia lub poprawiania właściwości gleb, nie mogą być źródłem infekcji drobnoustrojami chorobotwórczymi, ani skażenia toksycznymi związkami organicznymi lub mineralnymi.

Ścieki surowe oczyszcza się i odkaża a także odwadnia różnymi sposobami. Najczęściej stosuje się metody biologiczne, chemiczne i termiczne. Każda z tych metod posiada cechy ujemne o konsekwencjach szkodliwych dla środowiska, niekorzystnych z punktu widzenia technologii lub ekonomiki procesu oczyszczania. Metody chemiczne wymagają dużych ilości kosztownych środków odkażających; biologiczne i termiczne nie gwarantują dobrego stanu sanitarnego ścieków. Te ostatnie wymagają dużych ilości energii, z których niedoborem poważnie liczą się niektóre kraje. Ujemną cechą wszystkich metod jest to, że przy stale rosnących ilościach oczyszczanych odpadów, stanowią one dodatkowe poważne źródło skażenia środowiska.

W dążeniu do ulepszenia istniejących metod sięgnięto do technik nuklearnych.

Z badań prowadzonych w innych dziedzinach nauk wiadomo, że promieniowanie jonizujące przy odpowiednio wysokich dawkach niszczy drobnoustroje i zmienia właściwości fizyczne i chemiczne związków or-

*) Przegląd badań prowadzonych w ostatnich latach. Przy jego opracowaniu korzystano z materiałów dostępnych w literaturze i diskutowanych na międzynarodowych konferencjach. W roku 1977 autorka uczestniczyła w posiedzeniach Grupy Roboczej „Napromieniowania Odpadów” (Waste Irradiation) w Uppsali, a w roku 1978 w Brnie. Grupa ta działa w ramach Europejskiego Stowarzyszenia dla Stosowania Techniki Nuklearnych w Rolnictwie — ESNA.

ganicznych i mineralnych. To było podstawą do podjęcia badań nad zastosowaniem promieniowania jonizującego w oczyszczaniu ścieków. Początkowo nie miały one szerokiego zakresu ze względu na brak technicznych rozwiązań zastosowania zabiegu w praktyce. Dopiero opracowanie i skonstruowanie różnego typu urządzeń na skalę półtechniczną oraz perspektywy rozwiązań na skalę użytkową spowodowały, że w wielu krajach przystąpiono do realizacji obszernych programów badawczych.

Koncentrują się one na następujących zagadnieniach.

1. Wpływ promieniowania jonizującego na organizmy chorobotwórcze — określenie wysokości dawki i warunków skuteczności.
2. Wpływ promieniowania jonizującego na własności fizyczne i chemiczne ścieków.
3. Wykorzystanie napromieniowanych ścieków (płynnych lub osadów pościekowych) w rolnictwie.
4. Technologiczne rozwiązania urządzeń do napromieniowywania na skalę techniczną i ekonomiczna ocena metody.

Badania nad tymi zagadnieniami są intensywnie prowadzone w USA, gdzie rolnictwo wykorzystuje 25% ścieków miejskich. Obecnie dąży się do zwiększenia tych ilości, a także większe wymagania stawia się ich stanowi sanitarnemu.

Również w Republice Federalnej Niemiec prowadzi się na szeroką skalę zakrojone badania w aspekcie praktycznego zastosowania metody. W ostatnich latach stwierdzono przypadki infekcji ścieków przeznaczonych do nawożenia drobnoustrojami powodującymi groźne choroby przewodu pokarmowego.

Metodą radiacyjną jest też zainteresowana Szwajcaria. Stwierdzono bowiem, że metoda pasteryzacji termicznej nie eliminuje patogenów wystarczająco. Analiza ścieków z różnych oczyszczalni, stosujących tlenowe i beztlenowe metody fermentacji wykazała, że w 90% prób liczebność komórek bakterii grupy *Salmonella* nie odpowiadała wymaganej czystości sanitarnej. Przy stosowaniu ścieków do nawożenia łąk bakterie te mogą być źródłem infekcji dla zwierząt i ludzi.

Obszerny program badań jest realizowany we Francji przy współpracy wielu placówek naukowych oraz instytucji i organizacji zainteresowanych praktycznym zastosowaniem radiacji do oczyszczania ścieków a także wód pitnych. Doświadczeniami objęto wody Sekwany jednego z ujęć pod Paryżem.

Badania nad radiacyjną metodą i jej zastosowaniem w oczyszczalnictwie ścieków miejskich, przemysłowych i z ferm hodowlanych są prowadzone również w Holandii, Anglii, na Węgrzech, w Indiach, ZSRR, we

Włoszech. Wyniki stanowią podstawę dyskusji na konferencjach, organizowanych przez Międzynarodową Agencję Energii Atomowej (IAEA), Europejskie Stowarzyszenie dla Stosowania Technik Nuklearnych w Rolnictwie (ESNA), a także instytuty i organizacje naukowe w USA.

Wpływ promieniowania jonizującego na organizmy chorobotwórcze występujące w ściekach i odpadach — bakterie, wirusy, robaki

Badania nad tymi zagadnieniami prowadzono w wielu placówkach naukowych różnych krajów. Wyniki nowszych prac uwzględniono w niniejszym przeglądzie [3, 4, 8, 10, 11, 12, 19—24, 28, 29, 33, 36—43, 48, 51, 52, 54].

Celem doświadczeń było ustalenie parametrów dla najbardziej skutecznego zabiegu, a więc wysokości dawki promieniowania jonizującego i warunków środowiska, które w dużym stopniu mogą modyfikować jej działanie. Czynniki o dużym znaczeniu są temperatura, stopień utlenienia ścieków, ich uwilgotnienie skład chemiczny, odczyn — pH, a także właściwości fizyczne.

Stosowano różne źródła promieniowania, a mianowicie: wysokoenergetyczne elektrony z urządzeń maszynowych oraz promieniowanie gamma izotopów Co-60 i Cs-137.

Badania obejmowały drobnoustroje chorobotwórcze najczęściej występujące w ściekach miejskich i odpadach rolniczych, stanowiące źródło groźnych infekcji dla ludzi i zwierząt. Do takich należy szereg bakterii powodujących schorzenia przewodu pokarmowego, a mianowicie: z rodziny *Enterobacteriaceae*:

Salmonella typhi — pałeczki duru brzuszego

Salmonella paratyphi — duru rzekomego

Shigella — p. czerwoni

Escherichia coli — p. okrężnicy (niektóre typy powodują zakażenia jelit u niemowląt oraz u zwierząt (cieląt, prosiąt).

Z rodziny *Clostridiaceae* groźne są bakterie jadu kiełbasianego-*Clostridium botulinum*, których istnieje wiele typów o różnej toksyczności.

Jedną z bardziej rozpowszechnionych bakterii jest paciorkowiec-kałowy — *Streptococcus faecalis*.

Jeżeli chodzi o wirusy wywołujące choroby infekcyjne i występujące w ściekach miejskich lub rolniczych badania koncentrują się na różnych typach paraliżu (poliomyelitis) oraz pryszczycy.

W ściekach mogą występować liczne jaja pasożyta ludzkiego z grupy nicieni — *Ascaris lumbricoides*. Niszczenie ich przy pomocy promieniowania jonizującego było przedmiotem wielu badań.

Niektórzy badacze zajmowali się również innymi organizmami chorobotwórczymi o znaczeniu regionalnym (ameby, promieniowce).

Wszystkie wyżej wymienione organizmy wykazują różnicowanie w radioczułości. Do ich inaktywacji potrzebne są różne dawki promieniowania jonizującego. I tak np. jaja nicieni ulegają zniszczeniu pod wpływem działania niższych dawek promieniowania niż bakterie. Te ostatnie wykazują duże różnicowanie pomiędzy gatunkami, a czasem w ramach tego samego gatunku. Najbardziej odporne na działanie promieniowania jonizującego są wirusy. Wszystkie wymienione organizmy są wrażliwe na warunki temperaturowe oraz środki chemiczne. Przy łącznym stosowaniu z napromieniowaniem podwyższonej temperatury lub niewielkich ilości środków chemicznych modyfikuje się wysokość wymaganej dawki w kierunku jej obniżenia. Podane przykłady badań ilustrują niektóre z tych zależności.

Lessel i wsp. [22, 23], w latach 1973—76 prowadzili badania nad wpływem promieniowania gamma Co-60 (ze źródła urządzenia na skalę półtechniczną w oczyszczalni w Geiselbullach) na bakterie, wirusy i nematody. Na podstawie wyników doświadczeń określili wysokość dawki skutecznie niszczącej badane organizmy patogenne na 3,0 kGy. Redukowała ona w stopniu wystarczającym liczebność bakterii *Salmonella* i *B. coli*. Efekt napromieniowania dawką tej wysokości był z higienicznego punktu widzenia równorzędny pasteryzacji termicznej w temperaturze 70°C, w ciągu 30 minut. Wyniki dotyczą badań prowadzonych na ściekach fermentowanych. W późniejszych doświadczeniach ze ściekami surowymi stwierdzono, że znacznie wyższe dawki 4,0 i 6,0 kGy nie wystarczyły do osiągnięcia wymaganej czystości mikrobiologicznej. Efekt niepełnej sterylizacji tłumaczono nierównomiernym rozłożeniem dawki na skutek wadliwej cyrkulacji ścieków w zbiorniku w czasie napromieniowywania. Wnioskowano o potrzebie homogenizacji ścieków surowych przed poddaniem ich napromieniowywaniu.

W doświadczeniach Lessela i wsp. [22] nad wpływem promieniowania jonizującego na inaktywację wirusów, w kulturach czystych dawka 3,0 kGy zmniejszyła liczebność wirusa poliomyelitis o więcej niż 90%.

W roztworach i zawiesinach obserwuje się działanie ochronne i do inaktywacji wirusów wymagane są wyższe dawki. Środki chemiczne (ozon, jony amonowe) a także podwyższona temperatura skutecznie niszczą wirusy. Czynniki te uwzględnili wyżej wymieniani badacze w późniejszych doświadczeniach, które miały naświetlić wpływ stopnia natleniania ścieków i podwyższonej temperatury na efekt działania promieniowania jonizującego. Doświadczenia laboratoryjne wykazały, że radioczułość bakterii, wirusów i pasożytów zwiększa się w temperaturze 40—55°C, a wrażliwość bakterii i robaków wzrasta w obecności tlenu.

W trakcie prowadzenia są badania na skalę półtechniczną (w Geiselbüllach) nad natlenianiem ścieków poddawanych napromieniowywaniu, a także nad wpływem podwyższonej temperatury z 28°C do 40—58°C na efekt zabiegu.

Badania Clelanda [6] potwierdzają dużą efektywność łącznego działania promieniowania i podwyższonej temperatury. Może to mieć znaczenie dla obniżenia dawki i skrócenia czasu wykonania zabiegu. Napromieniowanie dawką 0,6 kGy w temperaturze ok. 60°C w ciągu 12 minut inaktywowało *B. coli* znacznie silniej niż ta sama dawka przy niższej temperaturze. Efekt zabiegu był również silnie modyfikowany w warunkach dobrego natlenienia ścieków. Dla zniszczenia *B. coli* w ściekach silnie natlenionych wysatrczała dawka 0,5 kGy, a w normalnych znacznie wyższa 1,0—2,0 kGy dawała ten efekt.

Woodbridge i wsp. [53] stwierdzili synergiczne działanie promieniowania jonizującego oraz zwiększonej koncentracji tlenu na bakterie chorobotwórcze w ściekach.

Obszerne badania na te tematy są od kilku lat prowadzone w USA, w Sandia Laboratorium [29, 33, 39, 40, 41, 42—43]. Ich celem było określenie wysokości dawki i wpływu warunków środowiska na inaktywację drobnoustrojów chorobotwórczych. Spośród bakterii badaniami były objęte *B. coli*, *Salmonella* i *Streptococcus faecalis*. Doświadczenia prowadzono ze ściekami fermentowanymi i surowymi. Badano łączny wpływ radiacji i temperatury oraz stopnia natlenienia ścieków. Wyniki tych badań potwierdzają dużą skuteczność działania promieniowania jonizującego, przy obniżonych dawkach ale w podwyższonej temperaturze i dobrym natlenieniu.

Badania prowadzone w ostatnich latach koncentrowały się na określeniu efektywności zabiegu wykonywanego przy różnym stopniu uwilgotnienia ścieków, a także na osadzie pościekowym.

W Sandia Laboratorium przeprowadzono obszerne badania nad wpływem promieniowania i podwyższonych temperatur (termoradiacja) na wirusy paraliżu. Dużą efektywność czynnika temperaturowego stwierdzono w kulturach czystych. W ściekach efekt był modyfikowany i zależał od dodatku ścieków. Wykazano, że substancje powodujące efekt ochronnego działania występowały w płynnej fazie ścieków. Wydzielona ze ścieków faza stała nie wykazała tego działania. Celem wyjaśnienia mechanizmu działania substancji ochronnych prowadzono badania znakując wirusy aminokwasem z wbudowanym radioaktywnym węglem C-14. Wysuniętą hipotezę blokady RNA wirusa przez niektóre substancje występujące w płynnej fazie ścieków sprawdzano znakując RNA ³H-urydyną.

Wszechstronne badania teoretyczne i praktyczne dotyczące określenia wpływu promieniowania jonizującego i warunków wykonania zabiegu na mikroorganizmy chorobotwórcze, i inne cechy związane z rolniczym wykorzystaniem ścieków, mają dać podstawę dla opracowania technologicznych założeń do stosowania metody w niektórych oczyszczalniach ścieków w USA. Założeniem jest wykorzystanie cezu-137 jako źródła promieniowania jonizującego odzyskiwanego z odpadów reaktorowych (wypalonych prętów uranowych), nad którymi to zagadnieniami pracuje specjalny dział w Sandia Laboratorium.

Obszerne badania bakteriologiczne prowadził Gallien i wsp. [11, 12] na ściekach i wodach Sekwany uzdatnianych na wody pitne. Stosowano w nich wysokoenergetyczne elektrony. Badano wpływ wysokości dawek w granicach od 2,0 do 10,0 kGy na *B. coli* (*Escherichia coli*), *Streptococcus faecalis* i *Klebsiella pneumoniae* (bakteria mogąca wywołać zapalenie płuc). Jako dawkę niszczącą badane organizmy, lub redukującą formy przetrwalnikowe w stopniu odpowiadającym wymaganym przepisom ustalono 2,0 kGy. Prowadzono również badania nad radiacyjną inaktywacją wirusów i nematod.

Badania Simona i wsp. [36, 37, 38] miały na celu opracowanie technologii radiacyjnej dezynfekcji różnego rodzaju ścieków miejskich i płynnych nawozów pochodzących z dużych ferm produkcyjnych. Określano wpływ dawek w zakresie od 4,0 do 28,0 kGy na drobnoustroje chorobotwórcze-bakterie i wirusy. Wyniki wykazują, że dla inaktywacji wirusa pryszczycy trzeba było stosować duże dawki promieniowania jonizującego (Co-60). Dawki 4,0—8,0 kGy wystarczyły do inaktywacji wirusa w czystych kulturach. Dawka 12,0 kGy w małym stopniu inaktywowała go w płynnych nawozach organicznych.

Niektórzy badacze [10, 53] stwierdzali synergiczny wpływ promieniowania i niektórych związków chemicznych stosowanych w oczyszczalniach ścieków (chlor, ozon, chlorek cynku) na organizmy chorobotwórcze. Przy łącznym stosowaniu efekt małej koncentracji związku chemicznego i obniżone dawki promieniowania był równorzędny z działaniem znacznie wyższej koncentracji związku chemicznego lub dużej dawki promieniowania.

Wpływ promieniowania jonizującego na organizmy patogenne był również przedmiotem badań innych autorów, m.in.: Berga i wsp. [4], Hessa i wsp. [19], Holla i wsp. [20], Lewisa [24], Osterstocka [28], Warda i wsp. [51]. Przytoczenie wyników wszystkich badań, a także szczegółowsze omówienie cytowanych, nie jest możliwe ze względu na ograniczoną objętość artykułu.

Wpływ promieniowania jonizującego na właściwości fizyczne i chemiczne ścieków

Z doświadczeń przeprowadzonych nad tymi zagadnieniami przez wielu badaczy [2, 3, 4, 10, 11, 13, 14, 15, 16, 22, 23, 41, 53] wynika, że dawki promieniowania stosowane w celu poprawienia stanu sanitarnego ścieków mogą poprawiać niektóre właściwości fizyczne jak np. zdolności sedymentacyjne i filtracyjne, które mają duże znaczenie w procesie odwadniania ścieków.

Mniejszy jest wpływ promieniowania jonizującego na właściwości chemiczne, chociaż niektóre badania wskazują na możliwość indukowania rodników utleniających, które mogą rozkładać związki toksyczne.

Lessel i wsp. [23] badali wpływ promieniowania na zdolności sedymentacyjne i filtracyjne ścieków. Wyniki wstępnych badań wykazały szybszą sedymentację ścieków napromieniowanych w porównaniu z nietraktowanymi lub pasteryzowanymi. Ponieważ wyniki rokowały możliwość obniżenia kosztów urządzeń odwadniających, rozwijano je, aby bliżej naświetlić te zagadnienia, które miałyby istotne znaczenie dla technologicznych ulepszeń. Badaniami objęto różnego rodzaju ścieki: a) z oczyszczalni w Geiselbullach-miejskie o niedużej zawartości zanieczyszczeń przemysłowych, po fermentacji beztlenowej, b) ścieki miejskie z dużym ładunkiem zanieczyszczeń przemysłowych, c) ścieki pochodzące głównie z odpadów domowych. Napromieniowywano je dawkami 1,0—3,0 kGy. Sedymentację oznaczano w osadnikach laboratoryjnych w różnych odstępach czasu po 24, 48 i 72 godzinach. Efektywność mniejszych dawek 1,0 i 2,0 kGy była zbliżona do dawki 3,0 kGy. Pod wpływem napromieniowania zwiększyła się szybkość osadzania się części stałych zawierających około 3% suchej masy. Przy wyższej zawartości suchej masy w ściekach około 8% napromieniowanie dawką 1,5 oraz 3,0 kGy nie poprawiło zdolności sedymentacyjnych. W innych doświadczeniach badano zdolności filtracyjne ścieków. Wpływ promieniowania na flokulację porównywano z działaniem związków chemicznych używanych ścieków do tego celu: $\text{Ca}(\text{OH})_2$ oraz FeCl_3 . Wyniki wykazały, że tak zwana oporność właściwa na filtrowanie, przyjęta jako cecha dla określania zdolności filtracyjnych, w ściekach napromieniowanych wynosiła 35—40% wartości stwierdzonej dla ścieków nietraktowanych. W toku są badania nad wpływem promieniowania na poprawianie zdolności odwadniających przy stosowaniu odwirowywania.

Hegeman i Günthert [16], a także inni badacze [20, 41, 42] również stwierdzali polepszenie zdolności sedymentacyjnych ścieków pod wpływem działania promieniowania jonizującego.

Groneman [14] badał wpływ promieniowania gamma na fizyczne i chemiczne właściwości ścieków fermentowanych, pochodzących z oczyszczalni w Zeist oraz surowych z oczyszczalni w Benekom (Holandia). Napromieniowanie dawką 20 kGy bardzo silnie zmieniało strukturę fizyczną ścieków — polepszało ich właściwości filtracyjne. Napromieniowanie ścieków fermentowanych dawką 3,0 kGy zmniejszało oporność właściwą do 50% wartości początkowej, a dawką 5,0 kGy do 30%.

Gallien i Lavaillant [11] również badali wpływ promieniowania na zdolności sedymentacyjne i filtracyjne ścieków surowych i fermentowanych, a także właściwości fizyczne i chemiczne niektórych związków organicznych i mineralnych występujących w wodach przeznaczonych do spożycia. Wyniki tych oznaczeń są przytoczone w tabeli.

Tabela

Wpływ promieniowania jonizującego (strumienia wysokoenergetycznych elektronów) na właściwości wody i ścieków

Rodzaj materiału biologicznego, poddanego działaniu promieniowania jonizującego	Wysokość dawek kGy	Uzyskane efekty
Wody Sekwany pod Paryżem przeznaczone na wodę pitną	od 0,05 do 5,0	Dawki poniżej 0,5 kGy skutecznie usuwały smak powodowany metabolitami glonów i promieniowców
Wody sztucznie skażone metabolitami niebieskich glonów	od 0,05 do 5,0	Skuteczność dawek do 0,5 kGy
Wody zawierające 60 mg/l Hg w postaci metylenu rtęci	1,0; 2,0; 5,0; 20,0	Dawki poniżej 5,0 kGy inicjowały mineralizację organicznych połączeń rtęci; 20,0 kGy powodowało całkowity rozkład.
Wody zawierające organiczne połączenia azotu	1,0; 2,0; 5,0	Dawki poniżej 2,0 kGy powodowały znaczną mineralizację organicznych połączeń azotu.
Wody zawierające dużo substancji organicznej w postaci koloidalnej	1,0; 2,0; 5,0	Dawki powyżej 2,0 kGy zwiększały flokulację.
Ścieki surowe i fermentowane (po miesiącu fermentacji)	od 1,0 do 10,0	Przy dawkach wzrastających od 1,0 do 10,0 kGy wzrastała szybkość osadzania się cząstek stałych.
Ścieki surowe i fermentowane	od 1,0 do 20,0	Zdolności filtracyjne zarówno fermentowanych jak i surowych ścieków polepszały się pod wpływem napromieniowania i były funkcją wysokości dawki w granicach do 20,0 kGy. Wpływ na ścieki surowe był większy niż na fermentowane.

Zmiany właściwości chemicznych związków organicznych lub mineralnych występowały w wodach pod wpływem stosowania większych dawek promieniowania jonizującego. Efekt działania promieniowania na związki występujące w ściekach może być modyfikowany obecnością innych połączeń, a także stanem fizycznym ścieków.

Lessel i wsp. [23] na podstawie przeprowadzonych badań wnioskuje że przy napromieniowywaniu ścieków w niskich temperaturach 25—30°C nie może nastąpić dostrzegalny rozkład związków organicznych azotu ani powstawanie substancji lotnych.

Gilbert [13] określił wpływ promieniowania gamma na rozkład związków aromatycznych i substancji toksycznych nie ulegających degradacji biologicznej, występujących w ściekach przemysłowych.

Berg i wsp. [4] stwierdzali niewielkie zmiany niektórych związków pod wpływem napromieniowania: w ściekach surowych zwiększała się nieznacznie zawartość amonu. Zawartość azotanów w ściekach niefermentowanych nieznacznie spadła, a w ściekach fermentowanych zwiększała się. Stwierdzono również zmiany w zawartości fosforanów — pod wpływem napromieniowania ich koncentracja malała.

Badania nad fizycznymi i chemicznymi zmianami w ściekach po napromieniowaniu prowadzili również Brandon i Sivinski [2, 3, 41, 43]. Potwierdzają one polepszenie się zdolności sedymentacyjnych. Szczególną uwagę zwrócono na wyjaśnienie, czy poprzez zastosowanie radiacji można byłoby wyeliminować niektóre środki chemiczne stosowane w procesie odwadniania. Badano również wpływ na substancje lotne.

Niektórzy badacze rozważali możliwość zmian chemicznych związków występujących w ściekach na drodze ich utleniania przez rodniki powstające pod wpływem promieniowania jonizującego. Ballantine i wsp. (cyt. za Feates 10) określili prawdopodobieństwo tego rodzaju reakcji obliczając wartość G. Jest to liczba molekuł lub połączeń chemicznych, jaka ulega zmianom przy zasorbowaniu przez substancję 100 eV energii. Jak wynika z tych obliczeń, aby zmiany pod wpływem promieniowania jonizującego zaistniały w ilościach odpowiadających procesom utleniania stosowanym w oczyszczalнях, wartość G musiałaby wynosić 100. Tymczasem przy dawkach promieniowania stosowanych do inaktywacji drobnoustrojów chorobotwórczych w ściekach wynosi ona kilka jednostek, a nie przekracza 10. W doświadczeniach nad radiolitycznym rozkładem fenoli o koncentracji 100 mg/l i pestycydu 2-4 D 50 mg/l, wartość G dla wodnych roztworów tych związków wynosiła 2—5.

Istnieją w literaturze prace nad wpływem promieniowania jonizującego na występujące w ściekach detergenty, środki ochrony roślin oraz organiczne i nieorganiczne związki dostające się z odpadami przemy-

słowymi. Są to jednak przeważnie badania modelowe, prowadzone w niezbyt skomplikowanych układach czy mieszaninach, często w roztworach pojedynczych. Zagadnienie zmian zachodzących pod wpływem promieniowania jonizującego w poszczególnych związkach, gdy występują one w ściekach komplikuje się niezwykle ze względu na dużą ich różnorodność i ciągłe przemiany. Dlatego zagadnienia te są trudne do przebadania.

Badania dotyczące wykorzystania napromieniowanych ścieków w rolnictwie

Równocześnie z badaniami omawianymi w poprzednich rozdziałach prowadzono doświadczenia nad oceną napromieniowywanych ścieków przy ich wykorzystywaniu przez rolnictwo — do nawożenia roślin, poprawiania żyzności gleb, czy też jako dodatku do pasz.

Problematyka tych badań jest podobna do prac nad ściekami uzdatnianymi metodami dotychczas stosowanymi. Od wielu lat są one przedmiotem doświadczeń prowadzonych w rejonach, gdzie ścieki stosuje się na uprawy rolnicze czy ogrodnicze. Mają one ustalić nie tylko wartość nawozową ścieków, ale również określić ewentualną toksyczność niektórych związków czy pierwiastków w nich występujących.

W badaniach nad ściekami napromieniowanymi Süss i wsp. [46, 47] określili wpływ nawożenia ściekami na kiełkowanie nasion roślin rolniczych i ogrodniczych. W doświadczeniach wazonowych i polowych badano wpływ różnych dawek na wzrost roślin w pierwszych fazach, plony końcowe, ich skład chemiczny — zawartość podstawowych składników, a także pierwiastków metali ciężkich. Porównywano ścieki napromieniowane (w urządzeniu w Geiselbullach) oraz pasteryzowane termicznie i ich działanie nawozowe na różne gatunki roślin.

Ogólne wnioski, jakie autorzy wyciągnęli z tych doświadczeń są następujące: ścieki dezynfekowane, radiacyjnie i termicznie wykazały podobne działanie nawozowe. Plony roślin nawożonych nimi były jednak niższe w porównaniu z kombinacją kontrolną, która otrzymywała nawożenie mineralne (P, K).

Szczegółowe badania składu chemicznego ścieków z Geiselbullach wykonał Stärk i wsp. [45]. W ściekach napromieniowywanych i zwykłych oznaczali zawartość makro i mikroskładników, stosując metodę absorpcji atomowej i neutronową analizę aktywacyjną. Oznaczenia obejmowały zawartość suchej masy, azotu ogólnego i amonowego, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Zn, oraz pierwiastki metali ciężkich: Mn, Cu, Pb, Cd, Co, Ni, Hg.

Lessel i wsp. [23] w doświadczeniach laboratoryjnych oznaczali szybkość mineralizacji ścieków dodawanych do trzech rodzajów gleb w ilościach 130, 260, i 360 ml/2 kg gleby. Były to ścieki napromieniowane, pasteryzowane termicznie i nietraktowane niczym. Zawartość suchej masy w badanych ściekach wynosiła 5,1—6,2%. Stopień ich mineralizacji oznaczano po 10 dniach, jednym i dwóch miesiącach. Nie stwierdzono istotnych różnic pomiędzy ściekami, natomiast rodzaj gleby miał istotny wpływ na mineralizację zawartych w nich związków organicznych.

Na podstawie 4-letnich doświadczeń polowych przeprowadzonych w Bawarii wymienieni autorzy wnioskowali o zbliżonej wartości nawozowej ścieków napromieniowanych i pasteryzowanych. W doświadczeniach tych wystąpił wyraźny wpływ terminu stosowania. Przy wiosennym stosowaniu działanie nawozowe ścieków było istotnie lepsze w porównaniu z jesiennym. Plon roślin zbożowych (ogólny i ziarna) wzrastał wraz ze wzrostem dawki do 130 m³ (ha) rok. Stosując dawkę większą, 400 m³/ha raz na trzy lata uzyskiwano gorsze efekty, wyrażające się plonami niższymi o 30—60%, w porównaniu do corocznego stosowania mniejszych ilości. Dawka większa niż 400 m³ ścieków płynnych zawierających 4% suchej masy wywierała ujemny wpływ na kiełkowanie nasion i wzrost roślin w pierwszych fazach.

Wartość nawozowa ścieków napromieniowywanych i zwykłych była przedmiotem obszernych badań prowadzonych w Sandia Laboratorium [30, 31, 33, 41]. Obejmowały one doświadczenia wazonowe z różnymi roślinami. Oznaczano wpływ na plony oraz ich jakość. Dodatkowo przeprowadzono badania nad zawartością około 20 pierwiastków w profilu glebowym i plonach roślin uprawianych na glebach co roku nawożonych ściekami w ciągu 40 lat. Oznaczano pierwiastki podstawowe dla wzrostu i plonowania roślin (N, P, K, Ca, Mg), a także pierwiastki metali ciężkich (Ag, Cd, Cr, Cu, Hg, Mn, Ni, Zn).

W ostatnich latach zwrócono uwagę na możliwość wykorzystania osadów pościekowych jako dodatku do karmy dla niektórych zwierząt. Obszerny program badań na ten temat realizowano w Sandia Laboratorium [29, 30, 31, 33, 41]. Dotyczył on oceny osadów i ścieków surowych, dezynfekowanych radiacyjnie jako dodatku do karmy w żywieniu bydła i owiec. Pierwsze doświadczenia żywieniowe prowadzono na szczurach, następne na owcach i krowach rzeźnych i hodowlanych. W doświadczeniach tych stosowano różny procentowy dodatek suszonych osadów pościekowych (20—60%) do karmy zawierającej ziarno sorga, mączkę z nasion bawełny, melasę oraz mocznik. Mieszanekę tę sporządzono w formie granul. Karmiono nią zwierzęta doświadczalne w ciągu różnych okresów czasu do kilku miesięcy. Prowadzono dokładne obserwacje wzrostu,

rozwoju, przyrostków wagowych, wpływu na reprodukcję. W organach zwierząt doświadczalnych (wątrobie, nerkach, mięśniach), a także krwi i moczu oznaczono zawartość podstawowych związków i pierwiastków oraz zawartość pierwiastków metali ciężkich, które przy zwiększonej koncentracji mogłyby działać toksycznie.

Z przeprowadzonych badań wyciągnięto wnioski, że zwierzęta żywione przez kilka miesięcy karmą z dodatkiem suszonych osadów pościekowych nie wykazały żadnych nieprawidłowości z tytułu zastosowania promieniowania jonizującego, występowania organizmów patogennych lub zawartości pierwiastków metali ciężkich. Wartość kaloryczną osadów pościekowych użytych jako dodatek do karmy oceniono jako równą połowie wartości kalorycznej nasion bawełny. Tego rodzaju wykorzystywanie osadów ściekowych wyłoniło się w wyniku poszukiwania rezerw energetycznych — żywnościowych i paszowych. W odchodach zwierząt stwierdza się niewykorzystanie 25—35% energii dostarczonej w karmie.

Urządzenia do napromieniowywania ścieków na dużą skalę i ekonomiczna ocena metody

Równocześnie z badaniami omawianymi uprzednio prowadzono prace nad technologicznymi rozwiązaniami urządzeń do stosowania zabiegu na skalę półtechniczną i przemysłową oraz nad oceną kosztów inwestycji [1, 4, 5, 6, 7, 11, 12, 15, 17, 18, 22, 23, 26, 41, 43, 44, 48, 49, 50].

Skonstruowano wiele urządzeń laboratoryjnych do napromieniowywania ścieków i osadów pościekowych dla celów badawczych i w oparciu o nie przeprowadzono szereg doświadczeń cytowanych w poprzednich rozdziałach. Są to źródła promieniowania gamma (Co-60) lub źródła maszynowe wytwarzające wysokoenergetyczne elektrony.

W badaniach prowadzonych we Francji [11, 12] korzystano z dwóch akceleratorów — medycznego i przemysłowego. Ten pierwszy (CGR MeV) stosowano przy napromieniowywaniu niskimi dawkami do 0,7 kGy; posiadał strumień elektronów o energii 6—20 MeV. W badaniach nad napromieniowaniem wody i ścieków energia elektronów wynosiła 9 MeV. Parametry zapewniające dokładność dozymetryczną kontrolowano za pomocą komputera podłączonego do układu działania akceleratora.

Akcelerator przemysłowy (CIRCE) stosowano dla wysokich dawek promieniowania — wyższych niż 0,7 kGy. Energia elektronów wynosiła 6 MeV. Urządzenie posiadało kontrolowane w sposób ciągły na monitorku parametry działania aparatury, wysokości dawek itp. Kontrolę dozymetryczną prowadzono również za pomocą specjalnych filmów umieszczonych na próbkach.

Urządzenie na skalę półtechniczną w Geiselbullach zbudowano w latach 1973—75. Zawierało źródło promieniowania gamma Co-60, o aktywności 12 600 TBq. Dokładny opis technologiczny urządzenia podany jest w pracach Lessela i wsp. [22, 23]. Uwzględnia on koszty budowy i eksploatacji.

Koszt napromieniowania 1 m³ ścieków zależy od wielu czynników m.in. od przepustowości dziennej urządzenia. Im większa masa ścieków może być poddana zabiegowi tym niższy koszt jednostkowy. I tak np. przy zwiększaniu aktywności źródła w Geiselbullach i wzroście przepustowości dziennej z 30 do 100, a następnie 150 m³, koszt operacji przypadający na 1 m³ malał i wynosił: 3,8, 2,5 i 2,2 DM/m³.

Herrnhut [18] w oparciu o urządzenie w Geiselbullach opracował projekt ulepszonych urządzeń (pod względem technologicznym) ze źródłem Co-60 o aktywności 24 000 TBq.

Herkert [17] w projekcie urządzenia do ciągłego napromieniowywania ścieków również zastosował źródło promieniowania gamma Co-60, ale zwiększył jego aktywność do 34 400 TBq i dzienną przepustowość do 250 m³. Przy tych parametrach koszt napromieniowania 1 m³ zmalał do 3,5 S.Fr. (franków szwajcarskich), podczas gdy dla małego źródła o aktywności 4 440 TBq i dziennej przepustowości 30 m³ wynosiłby 9,4 S.Fr.

Cleland [6] dokonał analizy kosztów budowy i eksploatacji źródeł maszynowych. Obecnie najczęściej budowane są źródła elektronów o energii 1—3 MeV. Źródła wyżej energetycznych elektronów 5 MeV mogą mieć szersze zastosowanie praktyczne ze względu na niższy koszt zabiegu przypadający na jednostkę produktu.

W USA skonstruowano wiele urządzeń laboratoryjnych oraz na skalę półtechniczną ze źródłami maszynowymi i izotopowymi [1, 5, 15, 41, 43, 50].

W roku 1978 w Sandia Laboratorium uruchomiono urządzenie na skalę techniczną, ze źródłem promieniowania gamma Cs—137, o aktywności 38 850 TBq. Jak już wspomniano w poprzednich rozdziałach, Cs—137 pochodzi z odpadów reaktorowych, wypalonych prętów paliwowych, które w ten sposób mogą być reutilizowane. Oblicza się, że przy udoskonalonych technologiach produkcji koszt takiego źródła może być niższy. Zaletą w porównaniu ze źródłem kobaltowym jest większa trwałość, wynikająca z faktu, że izotop Cs—137 jest długożyciowy — jego okres połowicznego zaniku wynosi 30 lat, podczas gdy dla Co-60 $T_{1/2}$ wynosi tylko 5,3 lat i stąd konieczność corocznego uzupełniania źródła, aby utrzymać ten sam poziom aktywności.

Cezowe źródło w urządzeniu w Sandia Laboratorium jest umieszczone w komorze radiacyjnej pod ziemią. Przenośniki taśmowe z pojemni-

kami przesuwają się na przemian nad źródłem i poniżej, co zapewnia równomierny rozkład dawki. Dziennie można napromieniować 8 ton osadu pościekowego dawką do 10,0 kGy, a koszt napromieniowania 1 tony osadu wynosi 9 dolarów.

Jeżeli badania prowadzone na dużą skalę w tym nowouruchomionym urządzeniu potwierdzą dotychczasowe wyniki, zostaną opracowane projekty urządzeń dla niektórych większych miast USA. Obliczono, że przy rosnącej ilości odpadów, konkretnie ścieków miejskich zastosowanie radiacji i przejście na ich kompostowanie, pozwoliłoby znacznie zredukować wydatki na uzdatnianie ścieków, które mają być reutylizowane przez rolnictwo.

Wprowadzenie radiacyjnej metody do dezynfekcji odpadów może mieć znaczenie dla niedużych lokalnych obiektów, jak np. szpitale, lotniska, gdzie odprowadzane czy użytkowane odpady i ścieki mogłyby grozić niebezpieczeństwem chorób infekcyjnych. Może to mieć również duże znaczenie przy użytkowaniu rolniczym nawozów pochodzących z ferm wielkotowarowych.

LITERATURA

1. Ballantine D.S.: Alternative high-level radiation sources for sewage and waste-water treatment. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March 1975. Radiation for a Clean Environment, 309—328, 1975.
2. Brandon J.R.: Sandia's sludge irradiation program. Proc. National Conference: Sludge Management, Disposal and Utilization, 14—16 December 1976, Florida, USA, 135—137, 1977.
3. Brandon J.R.: Parasites in soil-plant systems. Rep. Sandia Laboratories, New Mexico, 5—6, 1978.
4. Berg van der A.J., Hollis H.D., Musselman H.D., Lowe H.N., Woodbridge D.D.: Gamma irradiation for sewage treatment at US Army facilities. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 191—196, 1975.
5. Cleland M.R., Farrel J.P., Malnati R.L., Morganstein K.H.: Use of high power electron beam radiation for the treatment of municipal and industrial wastes. Proc. Symp. IAEA, Munich 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 325—342, 1975.
6. Cleland M.R.: The technology and economics of treating waste water with electron beam radiation. Proc. Conference ESNA, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 135—164, 1976.
7. Desroches J.: Quality and security on the uses of Cobalt-60 sources for industrial irradiators. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June 1976. Radiation for Pollution Abatement, 191—193, 1976.

8. Epp C.: Experience with a Pilot-Plant for the irradiation of sewage sludge. Experiments on the inactivation of viruses in sewage sludge after radiation treatment. Proc. Symp. IAEA, Munich 17—21 March 1975. Radiation for a Clean Environment, 485—490, 1975.
9. Farrell J.B., Stern G.: Methods for reducing the infection hazard of waste-water sludge. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 19—28, 1975.
10. Feates F.S., George D.: Radiation treatment of wastes. A Review. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 61—72, 1975.
11. Gallien C.L., Levailant C.: A CGR MeV study on the utilisation of high energy electron beams for the treatment of waters and sludges. Report 1977. Lecture presented ESNA Meeting, Uppsala, 1977.
12. Gallien C.L., Icre P., Levailant C., Montiel A.: CGR MeV programme for water and liquid sludges treatment with high-energy electron beams. Preliminary investigation. Proc. Conference ESNA, Munich 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 43—69, 1976.
13. Gilbert E.: Effect of gamma-radiation on the degradation of substituted aromatics and of industrial waste water. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement 121—134, 1976.
14. Gromeman A.F.: Effect of gamma irradiation on physical-chemical properties and dewatering characteristics of sludges. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 99—107, 1976.
15. Hay W.C.: Pilot plant experience in the treatment of industrial and municipal waste-water by means of radiation-induced oxidation. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March 1975. Radiation for a Clean Environment, 433—446, 1975.
16. Hegeman W., Günther W.: Influence of gamma-irradiation on the behaviour of sewage sludges. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June 1976. Radiation for a Pollution Abatement, 108—120, 1976.
17. Herkert B.: Concept for continuous sludge irradiation with radioisotopes. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 183—190, 1976.
18. Herrnhut H., Marsch U., Bosshard E.: Technical and economical aspects of a large and small plant irradiation of liquid waste. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 200—206, 1976.
19. Hess E., Breer C.: Sanitary effect of gamma irradiation on sewage sludge. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 203—208, 1975.
20. Holl P., Schneider W.: Desinfection of sludge and waste-water by irradiation with electrons of low accelerating voltage. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 123—138, 1975.
21. Lemke H.S., Sinskey A.J.: Viruses and ionizing radiation in respect to waste-water treatment. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 99—120, 1975.
22. Lessel T., Hennig E.: The pilot-plant in Geiselbullach for the gamma irradiation of sewage sludge—design, operation experience and cost calculations. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June 1976. Radiation for Pollution Abatement, 165—182, 1976.

23. Lessel T., Süß A., Schurmann G.: New investigation at the sludge irradiation plant in Geiselbullach. Rep. ESNA Meeting, Brno, 4—9 September 1978.
24. Lewis N.F.: Scope for utilizing gamma radiation for microbiological control of sewage waste-water in India. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 197—202, 1975.
25. Lund E.: Public health aspects of waste-water treatment. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 45—60, 1975.
26. Morris M.E.: Cost and effectiveness comparisons of various types of sludge irradiation and sludge pasteurization treatments. Proc. National Conference. Sludge Management, Disposal and Utilization, 14—16 Dec. 1976, Florida USA, 28—31, 1976.
27. Nielson N.E.: The need for the use of high-level radiation in water treatment and in waste-water (sewage) treatment. Proc. Symp. IAEA, Munich 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 73—82, 1975.
28. Osterstock G.: Investigations of the effect of electron-beam irradiation on bacteria in sewage sludge. Proc. Conference ESNA Munich 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 27—38, 1976.
29. Progress Report Beneficial Uses Program (June 1977). Sandia Lab., New Mexico, USA, 9—57, 1977.
30. Progress Report Beneficial Uses Program (September, 1977), Sandia Lab., New Mexico, USA, 7—25, 1977.
31. Progress Report Beneficial Uses Program (December, 1977), Sandia Lab., New Mexico, USA, 7—32, 1978.
32. Progress Report Beneficial Uses Program (March, 1978), Sandia Lab., New Mexico, USA, 9—11, 1978.
33. Progress Report Beneficial Uses Program (June, 1978), Sandia Lab. New Mexico, USA, 9—43, 1978.
34. Schönborn W.: Use of sewage sludge as fodder. Proc. Symp. IAEA, Munich 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 579—588, 1975.
35. Shelef G., Lapidot M.: Recent advances in the treatment of solid wastes. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 555—576, 1975.
36. Simon J., Gacs F., Urban A.: The waste-water and sludge reuse project by gamma irradiation at Keéskemet, Hungary: Some approaches and investigations. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 411—417, 1975.
37. Simon J., Tamasi G.: Data on the disinfection of liquid manure by gamma irradiation at Baja, Hungary. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 209—216, 1975.
38. Simon J., Solyom F., Felkai V., Oroszlany P.: Data on the irradiation of liquid manure artificially infected with Foot-and Mouth disease virus. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976, Radiation for Pollution Abatement, 39—42, 1976.
39. Sivinski H.D.: Treatment of sewage sludge with combinations of heat and ionizing radiation (Thermoradiation). Proc. Symp. IAEA, Munich 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 151—167, 1975.

40. Sivinski H.D.: Thermoradiation treatment of sewage sludges using reactor waste to obtain acceptable fertilizer or animal supplement feed. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement 70—86, 1976.
41. Sivinski H.D. et al: Recent developments in the Sandia Laboratories sewage sludge irradiation program. Rep. Sandia Lab. New Mexico, USA, 3—72, 1977.
42. Sivinski H.D., Morris M.E.: Cost and value of pathogen reduction for land application of sludges. Rep. Sandia Lab. New Mexico, 7—24, 1978.
43. Sivinski H.D., Smith G.S.: The Sandia waste resources utilization program. Proc. of Amer. Nuclear Society Annual Meeting, Toronto Canada, June 13—18, 1976.
44. Smith G.S., Kiesling H.E., Cadle J.M., Staples C., Bruce L.B., Sivinski H.D.: Recycling sewage solids as feedstuffs for livestock. Proc. Conference. Sludge Management, Disposal and Utilization, 14—16 Dec. 1976, Florida, 119—127, 1977.
45. Stärk H., Rosopulo A., Henkelmann R., Hahn M.: Chemical analyses in sewage sludge after different treatments. Proc. Conference ESNA, Munich 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 231—246, 1976.
46. Süß A., Schurmann G., Hauser M., Schmid R.: Experience with differently treated sewage sludge in agriculture. Proc. Conference ESNA, Munich 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 207—230, 1976.
47. Süß A., Rosopulo A., Borchert H. Beck Th.; Bachhenns J., Schurmann G.: Experience with a pilot-plant for the irradiation of sewage sludge. Results on the effect of differently treated sewage sludge on plant and soil. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 503—533, 1975.
48. Tauber M., Hoffmann E.G., Offerman B.P.: Practical aspects of the pasteurization of sewage sludge by electron irradiation. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 359—366, 1975.
49. Tauber M.: Sewage sludge irradiation with electrons. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 194—199, 1976.
50. Trump J.G. et al.: Large scale electron treatment of MDC-Boston sludge—physical and chemical aspects. Proc. National Conference: Sludge Management, Disposal and Utilization, 14—16 Dec. 1976. Florida, USA 142—147, 1977.
51. Ward R.L., Ashley C.S.: Methods to inactivate enteric viruses in wastewater sludge. Rep. Sandia Laboratories, New Mexico, USA, 9—12, 1978.
52. Wizigmann J.: Experience with a pilot for the irradiation of sewage sludge: bacteriological and parasitological studies after irradiation. Proc. Conference ESNA, Munich, 8—11 June, 1976. Radiation for Pollution Abatement, 87—98, 1976.
53. Woodbridge D.D., Cooper P.C., Berg van den A.J., Musselman H.D., Lowe H.N.: Synergis effects of irradiation of waste-water. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March, 1975. Radiation for a Clean Environment, 169—189, 1975.

54. Yano K., Cho B., Yoshinaka T.; Yamaguchi H.: Surveys on radiation-resistant asporogenic bacteria in natural environments. Proc. Symp. IAEA, Munich, 17—21 March 1975, Radiation for a Clean Environment, 85—98, 1975.