

# WPLYW ŚRODKÓW KONTRASTUJĄCYCH NA ŚRODOWISKO NATURALNE

## EFFECT OF CONTRAST MEDIA ON THE ENVIRONMENT

**Magdalena Hildebrandt\*, Tomasz K. Nowicki**

*Uniwersyteckie Centrum Kliniczne  
ul. Smoluchowskiego 17  
80-214 Gdańsk  
e-mail: mhildebrandt@uck.gda.pl*

---

### Abstract

#### Wprowadzenie

1. Rola środków kontrastujących w procesie diagnostycznym
  - 1.1. Zastosowanie środków kontrastujących
  - 1.2. Rodzaje środków kontrastujących
  - 1.3. Droga podania i wydalania środków kontrastujących
2. Ilość używanych substancji
3. Produkty przemiany środków kontrastujących w środowisku
4. Oczyszczalnie ścieków a środki kontrastowe
5. Działanie biologiczne środków kontrastujących i ich metabolitów

#### Uwagi końcowe

#### Piśmiennictwo cytowane

---

**Lek. Magdalena Hildebrandt** - lekarz rezydent w dziedzinie radiologii i diagnostyki obrazowej.



<https://orcid.org/0000-0003-1656-3118>

---

**Dr n. med. Tomasz K. Nowicki** - specjalista radiologii i diagnostyki obrazowej, ekspert w zakresie obrazowania głowy i szyi oraz rezonansu magnetycznego.



<https://orcid.org/0000-0002-6536-3094>

## ABSTRACT

Contrast media are used in imaging modalities such as x-rays, ultrasound, computed tomography and magnetic resonance. Contrast media enhance tissues to help make a diagnosis. This review covers information about types of contrast agents, their chemical compositions, routes of administration, imaging applications and biological effects. Scientific studies indicate the presence of contrast agents in wastewater. They are not fully removed in conventional treatment processes and therefore enter surface waters with treated wastewater. At the University Clinical Center in Gdansk, the most frequently used contrast agents are iodinated contrast media, secondly gadolinium contrast agents. Iodinated contrast media are pharmaceuticals which are metabolically stable during their passage through the body and are excreted into wastewater. All transformation products of the iodinated contrast medium iopromide were found in municipal effluents because of their formation during biological wastewater treatment. Four products formed at the end of the transformation pathway were also found in bank filtrate and in groundwater of a wastewater irrigation area. The contrast agents themselves do not carry a risk of toxicity, but it can be predicted from the chemical structure that the transformation products may be toxic and mutagenic. On the other hand, MRI contrast agents can cause histopathological changes. Gadolinium deposition in tissues has been proven. The toxicity of gadolinium is well known. Further research on the toxicity of gadolinium contrast agents is needed to be able to prevent unwanted consequences and produce safe contrast agents. Conventional methods currently used do not ensure high efficiency of removing pharmaceuticals from wastewater, which makes it necessary to introduce advanced methods of treatment. The article presents strategies for removal of the compounds in wastewater-treatment plants.

Keywords: iodinated contrast media, natural environment, biodegradation, ozonation, gadolinium toxicity

Słowa kluczowe: jodowe środki kontrastowe, środowisko naturalne, biodegradacja, ozonowanie, toksyczność gadolinu

---

## WPROWADZENIE

Środki cieniujące, zwane też kontrastowymi lub potocznie kontrastami, to związki chemiczne wykorzystywane w badaniach radiologicznych. Środki kontrastowe znacznie zwiększają wartość diagnostyczną wykonywanych procedur, umożliwiając ocenę czy dane struktury anatomiczne pozostają wolne od cech patologicznych. W organizmie człowieka środki kontrastowe zachowują stabilność metaboliczną. W niezmienionej, pierwotnej formie, wydalane w moczu i kale pacjentów, trafiają do sieci kanalizacyjnej, a następnie do oczyszczalni ścieków. Na podstawie badań przeprowadzonych przez autorów cytowanych prac, można przyrzeć się, co dzieje się z litrami stosowanych codziennie środków kontrastowych oraz na jakie skutki możemy być narażeni w przyszłości. Aktualne możliwości metod analitycznych pozwalają na precyzyjne pomiary i wykrywanie śladowych ilości środków kontrastowych w próbkach pobranych ze środowiska [1]. Skuteczne usuwanie potencjalnie szkodliwych substancji jest w stanie zapobiec negatywnym wpływom na środowisko i ludzi.

### 1. ŚRODKI KONTRASTOWE W MEDYCYNIE

#### 1.1. ZNACZENIE ŚRODKÓW KONTRASUJĄCYCH W RADIOLOGII

W badaniach radiologicznych często wykorzystuje się środki kontrastujące (z ang. contrast medium, CM, lub contrast agent, CA), których zadaniem jest zwiększenie rozdzielczości tkankowej. W badaniach angiograficznych w tomografii komputerowej oraz klasycznej angiografii pod kontrolą promieniowania X możliwe jest uwidocznienie światła naczyń, ich poszerzenie, zwężenie lub zamknięcie. Środki kontrastujące pozwalają ocenić unaczynienie zmian patologicznych i dzięki temu przybliżyć charakter danej zmiany. Przydatne są również w celu wykazania funkcji narządów, na przykład w urografii, gdzie możemy obserwować proces wydalania przez nerki środka kontrastującego. Kolejną ważną właściwością jest odtworzenie wyglądu ścian struktur anatomicznych, co pozwala zdiagnozować przetoki, uchyłki, ocenić szczelność zespoleń po operacjach chirurgicznych czy uwidocznić ciało obce tkwiące w przełyku.

#### 1.2. RODZAJE ŚRODKÓW KONTRASUJĄCYCH

Podczas badań z zastosowaniem promieniowania X stosuje się pozytywne i negatywne środki kontrastowe. Pozytywne środki kontrastowe zwiększają pochłanianie promieniowania i „rozjaśniają” struktury anatomiczne na obrazach radiologicznych. Do pozytywnych środków kontrastowych używanych w codziennej

praktyce klinicznej zalicza się siarczan baru oraz jodowe środki kontrastowe. Siarczan baru jest związkiem chemicznym nierozpuszczalnym w wodzie, natomiast jodowe środki kontrastowe są wodorocieńczalne. Negatywne środki kontrastujące zmniejszają pochłanianie promieniowania X i w rezultacie „zaciemniają” badany obszar, w którym się znajdują. Przykładami negatywnych środków kontrastujących są gazy jak tlen cząsteczkowy, ditlenek węgla czy powietrze oraz woda [2].

W badaniach rezonansu magnetycznego również istnieje podział na pozytywne i negatywne środki kontrastowe, lecz wynika on z właściwości magnetycznych substancji posiadających niesparowane elektrony. Podstawowymi składnikami pozytywnych środków, skracającymi czas relaksacji T1, są takie pierwiastki jak gadolin, mangan, żelazo. Gadolin ma zastosowanie kliniczne, natomiast dwa pozostałe używane są eksperymentalnie. Do grupy negatywnych środków kontrastowych, skracających czas relaksacji T2, należą superparamagnetyki o małych cząsteczkach oraz ferromagnetyki o dużych cząsteczkach [3]. Kontrasty z gadolinem podawane są w dawkach około 10 razy mniejszych niż w tomografii komputerowej – 0,1 lub 0,2 mL/kg masy ciała pacjenta.

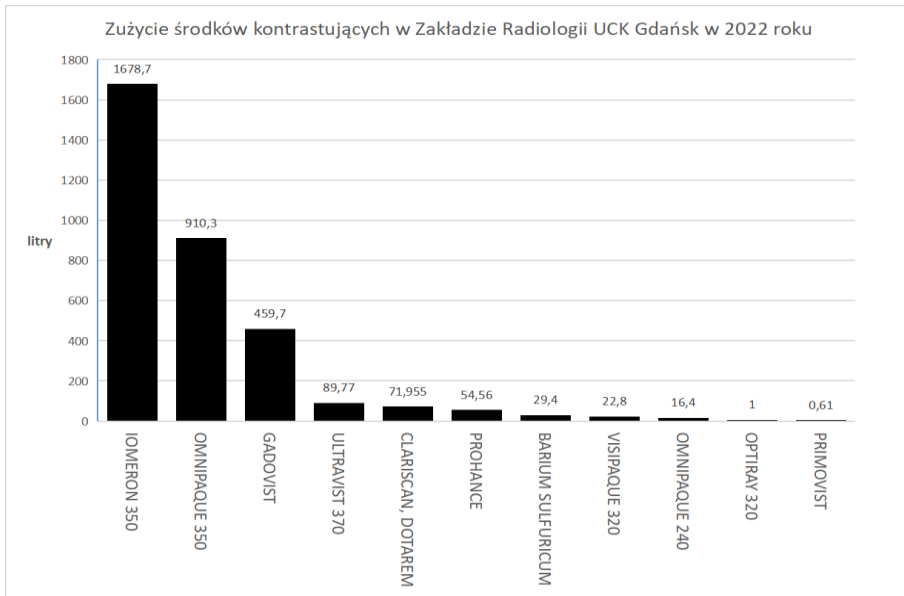
W ultrasonografii wykorzystuje się preparaty złożone z mikropęcherzyków, przechodzących przez naczynia włosowate i zmieniające impedancję płynącej krwi [4].

## 1.2. DROGA PODANIA I WYDALANIA ŚRODKÓW KONTRASUJĄCYCH

W diagnostyce przewodu pokarmowego pacjent wypija lub otrzymuje w formie wlewu doodbytniczo siarczan baru, a w przypadku występowania przeciwwskazań klinicznych – jodowy środek kontrastujący. Jodowe środki kontrastowe poza przewodem pokarmowym, mogą być podawane do dróg moczowych, dróg rodnych, dróg żółciowych, kanału kręgowego, do jamy stawu, dożylnie i dotętniczo. W badaniach rezonansu magnetycznego preparaty stosowane są doustnie, dożylnie lub dostawowo. Środki wykorzystywane w ultrasonografii aplikowane są jedynie dożylnie. Siarczan baru nie wchłania się z przewodu pokarmowego i jest wydalany w niezmienionej formie z kałem. Jodowe środki kontrastowe wydalane są głównie przez nerki i w mniejszym stopniu przez wątrobę z żółcią. Środki kontrastowe zawierające gadolin wydalane są przez nerki z wyjątkiem środków hepatotropowych, wykazujących jednocześnie powinowactwo do hepatocytów i nerek. Środki stosowane w ultrasonografii usuwane są z organizmu przez płuca wraz z wydychanym powietrzem [2,3,4].

## 2. ILOŚĆ UŻYWANYCH SUBSTANCJI

Przez ostatnią dekadę ilość wykonywanych badań radiologicznych i badań z użyciem kontrastów rośnie. W Uniwersyteckim Centrum Klinicznym w Gdańsku, w Zakładzie Radiologii w 2022 roku podczas wykonywania badań rezonansu magnetycznego, tomografii komputerowej, badań klasycznych oraz w pracowni radiologii zabiegowej zużyto około 3335 litrów środków kontrastujących. Większość z tego stanowiły jodowe środki kontrastujące - łącznie 3088 litrów (wykres 1 i tabela 1). Wśród nich najczęściej stosowany był jomeprol. Ilość gadolinowych środków kontrastujących wyniosła 216 litrów, a najczęściej stosowany był kwas gadoterowy. Siarczaniu baru użyto około 29 litrów.



Rysunek 1. Zużycie środków kontrastujących w roku 2022 w UCK w Gdańsku, uwzględniając skład chemiczny

Figure 1. Consumption of contrast agents in 2022 at UCK Gdansk, taking into account chemical composition.

Tabela 1. Rodzaje środków kontrastujących i ich dawka  
 Table 1. Types of contrast agents and their dose

Nazwa handlowa	Nazwa chemiczna	Stężenie mg/ml
<b>Barytowe środki kontrastujące</b>		
BARIUM SULFURICUM MEDANA	Siarczan baru	1000
<b>Gadolinowe środki kontrastujące</b>		
CLARISCAN, DOTAREM	Kwas gadoterowy	279,3
GADOVIST	Gadobutrol	604,72
PRIMOVIIST	Gadoksetynian disodu	181,43
PROHANCE	Gadoteridol	279,3
<b>Jodowe środki kontrastujące</b>		
IOMERON 350	Jomeprol	714,4
OMNIPAQUE 240	Joheksol	518
OMNIPAQUE 350	Joheksol	755
OPTIRAY 320	Jowersol	678
ULTRAVIST 370	Jopromid	768,86
VISIPAQUE 320	Jodiksanol	652

### 3. PRODUKTY PRZEMIANY ŚRODKÓW KONTRASTUJĄCYCH

Liczne badania wykazały, że w wodach powierzchniowych występuje mnóstwo substancji stosowanych w diagnostyce i leczeniu pacjentów [5]. Wśród nich znajdują się środki kontrastujące. Gdańska Infrastruktura Wodociągowo-Kanalizacyjna nigdy nie podjęła się wykonania pomiarów stężeń środków kontrastujących w ściekach. Jednakże w Niemczech przeprowadzono pomiary i wykryto środki kontrastujące w ściekach oraz wodach powierzchniowych [6,7]. Stężenie substancji było na

podobnym poziomie w nieczystościach pochodzących ze szpitali, jak tych pochodzących z gospodarstw domowych. Pacjenci hospitalizowani oddają mocz wraz ze środkami kontrastującymi w szpitalu, natomiast grupa osób leczonych w trybie ambulatoryjnym prawdopodobnie najpierw w placówkach medycznych, a następnie w domach. Najwyższe stężenia uzyskano w dni powszednie [6,8], kiedy wykonywana jest większość badań planowych. Wpływ na zmianę stężenia zauważono również w zależności od pory roku. Jest to związane z obniżoną temperaturą wody, a co za tym idzie utrudnionym procesem biodegradacji, oraz ze znacznie krótszym dniem, co z kolei zmniejsza wydajność fotolizy [10].

Zbadano biodegradowalność i okazało się, że związki kwasu amidotriozoesowego, jodiksanolu, joheksolu, jopentolu, jopromidu i jotrolanu, z których wszystkie są pochodnymi kwasu trijodobenzoesowego, uległy degradacji w 20%. Przeprowadzono laboratoryjne oczyszczanie ścieków, gdzie badaną substancją modelową był jopromid. Jopromid ulega degradacji, w wyniku której powstaje amina jopromidu. Dalsza degradacja metabolitu jopromidu następowała powoli, całkowicie po 23 tygodniach. Udowodniono, że wolna amina jest wrażliwa na fotolizę. Wykazano, że początkowo powstaje krótkotrwały produkt pośredni - jodek, a w efekcie końcowym fotolizy produkt całkowicie odjodowany. Trudno przewidzieć co dzieje się w środowisku naturalnym, ale jeżeli dzieje się to samo, co w warunkach laboratoryjnych, wolna amina ze ścieków, w górnych warstwach wody ulega fotodegradacji do 5-amino-N,N'-bis(2,3-dihydroksypropylo)-N-metyloizoftalamidu, natomiast w głębszych warstwach przez degradację bakteryjną, a mianowicie przez rozszczepienie łańcuchów bocznych, dzięki czemu szybciej następnie ulegają fotolizie niż pierwotny związek – jopromid. Ocena porównawcza wyników uzyskanych w laboratorium i w naturalnym środowisku jest utrudniona z różnych względów: przez różnice w zużyciu w danym miejscu, niejednakowo przebiegający proces oczyszczania ścieków oraz zmienny stopień rozcieńczenia wód powierzchniowych i gruntowych [11].

#### 4. OCZYSZCZALNIE ŚCIEKÓW A ŚRODKI KONTRASTUJĄCE

Oczyszczalnie ścieków tworzą barierę przed przedostaniem się potencjalnie szkodliwych substancji do środowiska wodnego. W wyniku braku dostatecznej degradacji, związki chemiczne mogą przedostawać się do wód. Inną ścieżką dostawania się potencjalnie szkodliwych substancji do gleby jest stosowanie osadów ściekowych jako nawozu lub do rekultywacji gruntów [1,12].

Oczyszczalnie ścieków prowadzą jednostopniowy, dwustopniowy lub trójstopniowy system oczyszczania ścieków. Trójstopniowy system oczyszczania stosowany jest w przypadku uzyskania wody o wysokiej jakości. Konwencjonalne



metody nie usuwają farmaceutyków. Pozostałości mogą być wyeliminowane poprzez filtrację powolną na filtrach piaskowych, ozonowanie, techniki oparte na procesie zaawansowanego utleniania oraz utleniania elektrochemicznego, adsorpcję na granulowanym węglu aktywnym oraz techniki membranowe, a w szczególności nanofiltrację i odwróconą osmozę [13,14,15]. Jedną z zaawansowanych metod, pozwalającą na usuwanie mikrozanieczyszczeń ze ścieków i wody jest proces pogłębionego utleniania (z ang. Advanced Oxidation Processes, AOPs). Metoda ta polega na generowaniu reaktywnych rodników, które mają właściwość utleniania praktycznie każdego związku organicznego do dwutlenku węgla, wody i związków nieorganicznych. Do uzyskania rodników stosuje się nadtlenek wodoru, ozon, promieniowanie UV, dodatki katalizatorów ( $MnO_2$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $TiO_2$ ) oraz ich kombinacji. Lepsze rezultaty uzyskuje się stosując układy zawierające np. dwa ( $O_3/UV$ ,  $O_3/H_2O_2$ ,  $H_2O_2/UV$ ) lub trzy ( $O_3/H_2OH/UV$ ) składniki. W literaturze obecne są doniesienia na temat prowadzenia zaawansowanych procesów utleniania elektrochemicznego (EAOPs), takich jak utlenianie anodowe (AO), elektro-Fenton (EF) i fotoelektro-Fenton (PEF) w celu usunięcia farmaceutyków. Kolejnym rodzajem zaawansowanych metod oczyszczania są technologie membranowe. Elektrodializa jest najprostszą metodą membranową opartą na technologii elektrochemicznej, w której stosuje się membrany jonowymienne. Służy ona do oddzielania wody od zanieczyszczeń takich jak metale ciężkie i związki organiczne. W usuwaniu mikrozanieczyszczeń z wody skuteczne są także metody adsorpcyjne. Jednym z rodzaju badanych adsorbentów są polimery cyklodekstrynowe. Wykazywały one dobrą skuteczność usuwania z wody barwy, amin aromatycznych, fenolu, pestycydów oraz chlorofenolu [16-18].

W wielu oczyszczalniach ścieków dominują tradycyjne metody oczyszczania ścieków, co jest wynikiem względów finansowych, ograniczeń technologicznych i braku uregulowań prawnych. Wykazano, że w oczyszczalni ścieków środki kontrastujące nie są usuwane w dużych ilościach przez konwencjonalne metody oczyszczania [6]. W procesie ozonowania potrzebne są wyższe stężenia ozonu, aby zredukować ilość jodowych środków kontrastujących (z ang. Iodinated Contrast Media, ICM) niż innych farmaceutyków. W AOP na bazie ozonu nieznacznie zwiększyła się wydajność utleniania dla niektórych środków kontrastowych w porównaniu z samym ozonowaniem. Ozonowanie ma duży potencjał w usuwaniu mikrozanieczyszczeń ze ścieków, jednak istotnym ograniczeniem są ponoszone koszty [10].

## 5. DZIAŁANIE BIOLOGICZNE ŚRODKÓW KONTRASTUJĄCYCH I ICH METABOLITÓW

Zastosowanie jodu w środkach kontrastowych wynika z jego niskiej toksyczności i silnego pochłaniania promieniowania rentgenowskiego. Wszystkie obecnie stosowane jodowe środki kontrastujące są chemicznymi modyfikacjami pierścienia 2,4,6-trijodowanego benzenu. Kwas benzoesowy otrzymuje się przez wprowadzenie grupy kwasowej w pozycji 1 pierścienia benzenu, co pozwala na tworzenie soli lub amidów wpływających na rozpuszczalność w wodzie. Kwas 2,4,6-trijodobenzoesowy otrzymuje się przez wprowadzenie atomów jodu w pozycjach 2, 4 i 6. Kwas trijodobenzoesowy jest mniej toksyczny i mniej lipofilowy (rozpuszczalny w tłuszczach) dzięki wprowadzeniu łańcuchów bocznych [11]. W krótko- i długoterminowych (trwających 20 dni) testach, nie wykazano żadnych skutków obecności jodowych środków kontrastujących na bakterie, algi, skorupiaki oraz ryby [6].

Niska toksyczność wolnej aminy jopromidu na organizmy wodne jest porównywalna z samym jopromidem. U szczurów biodostępność metabolitów jopromidu po podaniu doustnym była mniejsza niż jopromidu [9]. Metabolity nie zostały zidentyfikowane w przeprowadzonych badaniach. Same środki kontrastujące nie niosą ryzyka toksyczności, ale można przewidywać na podstawie budowy chemicznej, że produkty przemiany mogą być toksyczne i mutagenne [1].

W 2022 roku w Uniwersyteckim Centrum Klinicznym zużyto 14 razy mniej gadolinowych środków kontrastujących niż jodowych. Gadolin jest toksycznym metalem ciężkim z grupy lantanowców. W badaniach laboratoryjnych wykazano, że gadolin kumuluje się w tkankach po podaniu środka kontrastującego. Zauważono liniowy związek korelacyjny między podawaną dawką, a ilością pierwiastka skumulowaną w tkance. Uważa się, że przyczyną toksyczności jest dysocjacja gadolinu z chelatowanych kompleksów z czasem, różnie nasiloną w poszczególnych rodzajach środków kontrastujących. Porównano pośmiertnie tkankę mózgową osób, u których podano gadolinowy środek kontrastujący i osób po wykonanym rezonansie magnetycznym bez podawania środka kontrastującego. U pacjentów z pierwszej grupy wykryto gadolin w tkance nerwowej, a jego najwyższe stężenie osiągnęło jądro zębate [19,20]. W badaniach przeprowadzonych na szczurach udowodniono, że gadolin odkłada się w skórze, kościach i wątrobie, przy czym stężenia w wymienionych tkankach były wyższe przy zastosowaniu formy liniowej środka kontrastującego w porównaniu do makrocyklicznej [21]. W innym badaniu pobrano próbki z głowy kości udowej pacjentów, którzy przeszli endoprotezoplastykę stawu biodrowego. U pacjentów narażonych na gadolinowy środek kontrastujący wykryto w tkance kostnej gadolin nawet do 8 lat od momentu narażenia [22]. W badaniach

*in vitro* wykazano zwiększoną indukcję apoptozy i martwicę kanalików nerkowych [23]. Powstała nowa jednostka chorobowa – nerkopochodne włóknienie układowe – diagnozowana u pacjentów z upośledzoną funkcją nerek oraz w większości przypadków narażonych na gadolinowe środki kontrastujące. Obecność jonu gadolinu powoduje włóknienie [24]. W doświadczeniu przeprowadzonym na myszach, wykazano, że zmiany histopatologiczne i apoptoza zachodzą w tkankach wątroby i płuc. U badanych osobników zmniejszyła się liczba białych krwinek, a zwiększyła ilość cytokin prozapalnych [23]. W celu zbadania neurotoksyczności wywołanej gadolinem, wstrzyknięto szczurom do komory bocznej gadolinowy środek kontrastujący - gadoben dimeglubiny. Zaobserwowano mioklonie, ataksję i drżenie [25]. Gadolin może przedostawać się do rzek i wód gruntowych wraz ze ściekami z oczyszczalni ścieków. W przyszłości stężenie antropogenicznego gadolinu, pochodzącego ze środków kontrastujących, będzie rosło w ekosystemach wodnych z powodu coraz większej ilości wykonywanych badań rezonansu magnetycznego wykonywanych po podaniu CM. Największy niepokój budzą miejsca, w których woda pitna jest produkowana z zasobów wody surowej z dużą zawartością ścieków pochodzących z recyklingu. W wyniku transmetalacji z udziałem jonów metali, a w szczególności żelaza, cynku i miedzi, dochodzi do uwolnienia cząsteczek gadolinu [27,28]. Kompleksy chelatowe gadolinu są podatne na dysocjację. W żywych organizmach dysocjacji sprzyja interakcja z biologicznymi konkurentami - ligandami takimi jak trójfosforan adenozyliny (ATP) [29]. Stopień w jakim gadolinowe środki kontrastujące mogą być przekształcane w ludzkim organizmie i dokładnie odbywające się procesy pozostają wciąż nieznanne [27]. W celu dokładnej, miarodajnej oceny potrzebne są badania retrospektywne i prospektywne na temat toksyczności gadolinowych środków kontrastujących, aby móc zapobiec niepożądanym następstwom retencji gadolinu w tkankach i w środowisku naturalnym oraz produkować bezpieczne środki kontrastujące.

## UWAGI KOŃCOWE

Ciągły rozwój medycyny powoduje wzrost ilości wykonywanych badań, a wraz z tym zwiększoną ilość używanych środków kontrastowych. Wprowadzenie jopromidu do środowiska nie stanowi zagrożenia dla organizmów wodnych. To, że stężenia zmniejszają się w obiegu wody, wskazuje na jego degradację w naturalnych warunkach środowiska. Ocena ekotoksyczności trójjodowych środków kontrastowych musi obejmować produkty jego przemiany. Potrzebne są dalsze badania na ten temat. Pomocne może okazać się uregulowanie prawne kwestii dopuszczalnych stężeń w ściekach oczyszczonych oraz w wodach powierzchni-

wych [30]. Monitorowanie stężeń w wodzie pozwoliłoby na ocenę wydajności fotolizy i biodegradacji bakteryjnej, aby w momencie spadku wydajności w porę zareagować przez zastosowanie dodatkowych metod oczyszczania ścieków. Dodatkowo zmniejszenie ilości środków kontrastujących wprowadzanych do ścieków można zmniejszyć za pomocą optymalizacji ilości podawanych pacjentom.

#### PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] S.Schittko,A. Putschew,M.Jekel, *Sci. Total. Environ.*, 2000, **255**, 129.
- [2] H. S. Thomsen, F. Stacul, T. Almén, M. Bellin, M. Bertolotto, G. Bongartz, O. Clement, P. Leander, Heinz-Peer, S. K. Morcos, P. Reimer, A. J. van der Molen, J. AW Webb, Wytyczne ESUR (European Society of Urogenital Radiology) dotyczące środków kontrastowych, [online], Bayer. Dostępny w Internecie: <http://www.polradiologia.org/files/pdf/ESUR10.0%20-%20wersja%20polska.pdf>
- [3] Y. Xiao, R. Paudel, J. Liu, C. Ma, Z. Zhang, S. Zhou, *Int J Mol Med*, 2016, **38**, 1319.
- [4] M. Hofer, Podręcznik ultrasonografii, Medipage, Warszawa, 2005.
- [5] T. A. Ternes, M. Bonerz, N. Herrmann, D. Löffler, E. Keller, B. Bagó Lacida, A. C. Alder, *Journal of Chromatography A*, 2005, **1067**, 213.
- [6] S. Pérez, D. Barceló, *Anal. Bioanal. Chem.*, 2007, **387**, 123.
- [7] T. A. Ternes, A. Joss, H. Siegrist, *Environ Sci Technol.*, 2004, **38**, 392A.
- [8] J.E. Drewes, P. Fox, M. Jekel, *J Environ Sci Heal A*, 2001, **36**, 1633.
- [9] M. Schultz, D. Löffler, M. Wagner, T. A. Ternes, *Environ. Sci. Technol.* 2008, **42**, 7207.
- [10] T. A. Ternes, J. Stuber, N. Herrmann, D. McDowell, A. Ried, M. Kampmann, B. Teiser, *Water Research*, 2003, **37**, 1976.
- [11] T. Steger-Hartmann, R. Lange, H. Schweinfurth, M. Tschampel, I. Rehmann, *Water Research*, 2002, **36**, 266.
- [12] S.Schittko,A. Putschew,M.Jekel, *Water Sci. Technol.* 2004, **50**, 261.
- [13] A. Bogdanowicz, J. Wąsowski, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2018, **2**, 63.
- [14] B. Czech, *Adsorbenty i Katalizatory Wybrane Technologie a Środowisko*, 2012, 433.
- [15] K. Wontorska, J. Wąsowski, *Gaz, Woda i Technika Sanitarna*, 2018, **1**, 30.
- [16] E.M. Chellquist, W.O. Nelson, H.L. Storflor, *J Pharm Biomed Ana.* 1997, **16**, 39.
- [17] A. Węgrzyn, M. Machura, S. Żabczyński, *Ochrona Środowiska*, 2015, **37**, 55.
- [18] U. Wydro, E. Wołejko, J. Struk-Sokołowska, M. Puchlik, *Interdyscyplinarne zagadnienia w inżynierii i ochronie środowiska*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2006.
- [19] N. Murata, L. F Gonzalez-Cuyar, K. Murata, C. Fligner, R. Dills, D. Hippe, K. R. Maravilla, *Investig Radiol.*, 2016, **51**, 447.
- [20] T. Kanda, M. Osawa, H. Oba, K. Toyoda, J. Kotoku, T. Haruyama, K. Takeshita, S. Furui, *Radiology*, 2015, **275**, 803.
- [21] Y.-X. J Wang, J. Schroeder, H. Siegmund, J.-M. Idee, N. Fretellier, G. Jestin-Majer, C. Factor, M. Deng, W. Kang, S. K Morcos, *Quant Imaging Med Surg.*, 2015, **5**, 534.
- [22] T. H Darrah, J. J Prutsman-Pfeiffer, R. J Poreda, M E. Campbell, P. V Hauschka, R. E Hannigan, *Metallomics*, 2009, **1**, 479.
- [23] M. C. Heinrich, M.K.Kuhlmann, S. Kohlbacher, M. Scheer, A.Grgic, M.B. Heckmann, M. Uder, *Radiology*, 2007, **242**, 425.
- [24] A. Galan, S. E. Cowper, R Bucala, *Current Opinion in Rheumatology*, 2006, **18**, 614.

- 
- [25] R. Chen, D. Ling, L. Zhao, S. Wang, Y. Liu, R. Bai, S. Baik, Y. Zhao, C. Chen, T. Hyeon, *ACS Nano*, 2015, **9**, 12425.
- [26] D. E. Ray, J. B. Cavanagh, C.C. Nolan, S.C. Williams, *AJNR*, 1996, **17**, 365.
- [27] R. Brunjes, T. Hofmann, *Water Res.*, 2020, 182, 115966.
- [28] M. Le Fur, P. Caravan, *Metall*, 2019, **11**, 240.
- [29] C. Bazzicalupi, A. Bianchi, C. Giorgi, M. P. Clares, E. Garcia-Espana, 2012, **256**, 13.
- [30] D. Kempieńska, J. Namieśnik, A. Kot-Wasik, *Analityka: nauka i praktyka*, 2018, **1**, 44

Praca wpłynęła do Redakcji 31 stycznia 2023 r.

