

## Konieczność walidacji monitoringu wód podziemnych w rejonach starych składowisk na przykładzie składowiska fosfogipsów w Wiślince (Żuławy Gdańskie)

Andrzej Sadurski<sup>1</sup>, Danuta Trokowicz<sup>1</sup>



A. Sadurski



D. Trokowicz

**The necessity of validation of groundwater monitoring in the regions of old dumping sites – a case study of a phosphogypsum dump at Wiślinka (Vistula Delta Plain).** *Prz. Geol.*, 68: 894–901; doi: 10.7306/2020.38

*Abstract.* The phosphogypsum waste dump near Gdańsk was located within the Vistula delta depression on alluvial and lacustrine deposits close to the Dead Vistula River in the early 1970s. More than 16 million tonnes of waste deposits was accumulated until 2009. The loam outcrop of the old brick-yard was used for phosphogypsum. The leachates from the waste deposits causes the migration of contaminants due to density and hydraulic gradients down to the Vistula delta aquifers. The leachate is characterised by low pH, very high concentrations of phosphates and sulphates, metal ions, and radioactive elements. The waste dump was ultimately closed in 2009. The dump's surface has been covered with municipal sewage sludge, as

the so-called biological reclamation reduces the dustiness of phosphogypsum and the quantity of leachate, but generated additional threat resulting from the chemical compounds of the sludge. The matter from the municipal sewage sludge, dumped on the surface of the phosphogypsum waste heap, contained hormone disruptive compounds (EDCs), nitrogen compounds, viruses, bacteria and other pathogens.

The existing groundwater monitoring started in the mid-1970s and was projected and constructed in a very simple way. The observation wells and piezometers have been screened over a short distance at the bottom. Contaminants of different densities, liberated to the aquifers underneath, cannot be properly detected. The new analytical procedures are implemented in chemical laboratories and new methods of monitoring, e.g. low flow sampling, are now in practice. Also the climate changes and sea level rise along the Baltic coast require a new approach and validation of groundwater monitoring in the surroundings of the old waste dumps of chemical and mining industry.

**Keywords:** phosphogypsum waste, dumping site, Vistula Delta Plain, validation of groundwater monitoring

Celem artykułu jest uzasadnienie konieczności walidacji starych systemów monitoringu osłonowego wysypisk i składowisk odpadów przemysłowych, istniejących już od lat 70. XX w. W ciągu półwiecza zmieniły się standardy ochrony środowiska, projektowanie i wykonawstwo składowisk, a także, wskutek stosowania lepszych technik i interkalibracji metod, prowadzenie systemów monitoringu, metody poboru próbek, zakresy oznaczeń oraz chemiczne procedury analityczne. Trudno nawet porównywać wyniki analiz fizykochemicznych próbek wody sprzed 50 lub 25 lat.

Pięćdziesiąt lat temu składowiska odpadów budowano bez należytego rozpoznania warunków geologicznych i bez ekranów szczelnych lub membran ilastych w podłożu. Dokumentacje i wyniki pomiarów stężeń zanieczyszczeń uwalnianych ze składowisk odpadów do środowiska glebowego i wodnego świadczą o braku stacjonarnych monitoringu. Zamiast nich były prowadzone akcyjne projekty poboru próbek wody i gleb, wykonywane przez różne firmy na zlecenia zakładów przemysłowych. W rozpatrywanym przypadku Gdańskich Zakładów Nawozów Fosforowych (GZNF) Fosfory Spółka z o.o. wykonano ponad 100 ekspertyz, projektów i dokumentacji okresowych badań. Obecnie, dzięki dużej świadomości ekologicznej dyrekcji GZNF, Oddział Geologii Morza PIG-PIB w Gdańsku wykonuje nowy projekt monitoringu wód podziemnych. Informacje o tym nowym projekcie zostaną zapewne opublikowane w przyszłym roku w jednym z czasopism Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego.

### SKŁADOWISKO ODPADÓW W WIŚLINCE

Składowisko fosfogipsów GZNF Fosfory Spółka z o.o. powstało na początku lat 70. XX w. na terenie dawnego wyrobiska ilów nieczynnej cegielni w Wiślince, w odległości ok. 100–250 m od brzegu Martwej Wiśły (ryc. 1). Zajmuje ono powierzchnię 34,09 ha i ma kształt wydłużonej hałdy o wysokości dochodzącej do 41 m. Całkowita pojemność składowiska (przy wysokości składowania 41 m oraz płaskiej wierzchołku) jest określana na 16,0 mln t fosfogipsu (Trokowicz, 2007; 2019). Wokół hałdy utworzono kanał opaskowy o długości 1215 m i szerokości dna 1,0 m, usytuowany bezpośrednio między hałdą a okalającymi ją wałami. Ponadto składowisko zostało zabezpieczone zewnętrznym rowem opaskowym, zbierającym wody systemu melioracyjnego Żuław Gdańskich. W sąsiedztwie hałdy znajdują się zbiorniki odciekowe – laguny ziemne – o łącznej powierzchni 24 tys. m<sup>2</sup>. Wokół składowiska ustanowiono w 1983 r. strefę ochronną w pasie o szerokości 300 m od rowów opaskowych (Kozerski, Melerska, 1983). Analiza wyników monitoringu (Trokowicz, 2007 – dane WIOŚ i GZNF z lat 2002–2006) wskazuje na oddziaływanie odcieków z hałdy fosfogipsów na wody podziemne poziomu holocenijskiego, należącego do serii deltowej Żuław, o czym świadczą anomalnie wysokie stężenia siarczanów, fosforanów, fluorków oraz azotanów w wodach powierzchniowych i gruntowych (ryc. 2). Azotany pochodziły z osadów z komunalnych oczyszczalni ścieków. Zanotowano je w próbkach wód podziemnych z monitorowanych piezometrów: P1, P3, P7 i P9 (ryc. 1–2).

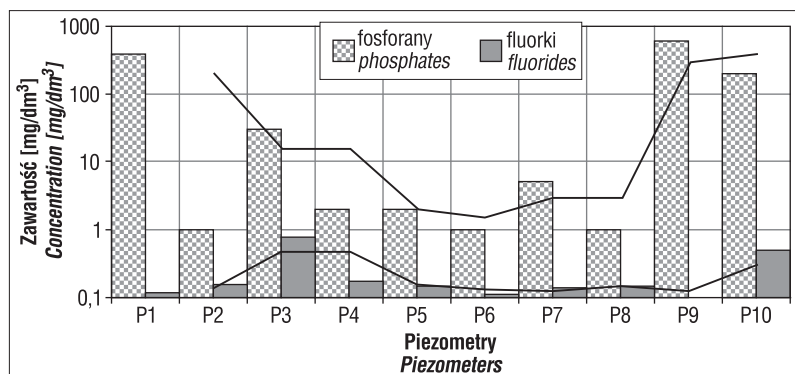
<sup>1</sup> emerytowany pracownik Państwowego Instytutu Geologicznego – Państwowego Instytutu Badawczego



**Ryc. 1.** Szkic lokalizacyjny składowiska fosfogipsów w Wiślinkie k. Gdańska  
**Fig. 1.** Location of the phosphogypsum dumping site at Wiślinka near Gdańsk

→

**Ryc. 2.** Stężenia fosforanów i fluorków w wodach podziemnych pobranych z piezometrów znajdujących się wokół składowiska (wg Dembicki i in., 2007)  
**Fig. 2.** Concentrations of phosphate and fluoride ions in groundwater samples taken from the observation wells adjoining the dumping site (after Dembicki et al., 2007)



Największe stężenia fluorków i fosforanów (stwierdzone w piezometrze P9) wskazują, że główny przepływ wód podziemnych, zanieczyszczonych odciekami z hałdy, odbywa się w stronę Martwej Wisły. Wyniki oznaczeń substancji uwalnianych z hałdy świadczą o istnieniu dopływów odcieków z hałdy fosfogipsów do wód powierzchniowych w rowach melioracyjnych w sąsiedztwie składowiska (tab. 1).

Uproszczone bilans wodny obszaru składowiska fosfogipsów w Wiślince opracował Dembicki i in. (2007). Wyniki analiz próbek wód pobranych z piezometrów monitoringu osłonowego składowiska opisał Kozerski (2006), wykazując wpływ odcieków na pierwszy poziom wód gruntowych w bezpośrednim otoczeniu hałdy. Funkcjonujące piezometry nie spełniają standardów monitoringu rozumianego jako system stacjonarnych obserwacji wód podziemnych. Pobór próbek wody z piezometrów usytuowanych wokół hałdy fosfogipsów jest prowadzony okazjonalnie, w przypadkach podejmowanych projektów zabezpieczenia terenów sąsiadujących lub zabezpieczenia skarp składowiska.

Do analizy porównawczej wykorzystano także spostrzeżenia i dostępne informacje z analogicznego składowiska fosfogipsów Zakładów Chemicznych *Police* (Ejmont, 2001). Gospodarka odpadami i zastosowane tam środki ograniczające oddziaływanie na środowisko są jednak odmienne od przyjętych w Wiślince. W latach 1972–2009, w czasie eksploatacji składowiska w Wiślince, wykonano ponad 100 opracowań, opinii, raportów i ekspertyz, wydając duże sumy z funduszy GZNF *Fosfory* na zadania z zakresu ochrony środowiska.

Dopływ odcieków pochodzących z ługowania fosfogipsów do środowiska wodnego Martwej Wisły został potwierdzony wynikami badań odcieków ze składowiska, które zawierają pierwiastki promieniotwórcze i inne zanieczyszczenia (tab. 1 i 2), takie jak; fosforany, fluorki, siarczany i azotany, a także metale ciężkie (Trokowicz, 2007). W czasie eksploatacji hałdy zanieczyszczenia te ulegały powolnemu wymywaniu i były unoszone przez wiatr na okoliczne pola uprawne. W ten sposób, wobec braku odpowiednich zabezpieczeń, trafiały do środowiska wodnego i gleb.

Dobra rozpuszczalność związków metali ciężkich, tak w wodzie, jak i w kwasach mineralnych, była sprawdzona eksperymentalnie (Rutherford i in., 1995). Wyniki tych badań wskazują, że ekstrakcja wodą destylowaną (2000 l) fosfogipsu (400 g) w ciągu doby umożliwia wyługowanie 64 mg/l fluoru i 0,22 mg/l kadmu. Erdem i in. (1996) oraz Santos i in. (2006) w trakcie badań ustalili, że fosfogips oprócz gipsu i bazanitu (~95%) zawiera fluor (0,5–1,5%), ortofosforany, fosforany, siarczany i pierwiastki śladowe, takie jak: Cd, Cr, Pb, Hg, As, B, Cu, Mg, Mo, Sc, Hf, Zn, Sr i Ba, a także pierwiastki z rodziny lantanowców (Ce, Eu, La, Lu, Nd, Sm, Tb, Yb) oraz związki pierwiastków promieniotwórczych, jak: U, Th, Ra i Po. Gazowy radon (Rn) tworzy się przez rozpad radu (Ra). Specyfika składu chemicznego domieszek w fosfogipsie różni się w zależności od miejsca wydobycia surowca, dostarczanego do Polski głównie z Maroka. Średnio fosforyty wykorzystywane jako surowce zawierały ok. 50 g uranu w przeliczeniu na 1 tonę, z czego 30–40% pozostaje w odpadach (Azouazi i in., 2001). Pierwiastki śladowe znajdują się w ilości od kilku do kilkudziesięciu mg/kg odpadu.

**Tab. 1.** Stężenie zanieczyszczeń w odciekach ze składowiska fosfogipsów i w wodach Martwej Wisły [mg/dm<sup>3</sup>]

**Table 1.** Concentration of pollutants in the phosphogypsum waste dump leachate and in the water of the Dead Vistula River [mg/dm<sup>3</sup>]

Rodzaj zanieczyszczeń <i>Type of contaminant</i>	Stężenie zanieczyszczeń / <i>Concentration of pollutants</i>			
	w odciekach ze składowiska fosfogipsów <i>in phosphogypsum heap leachate</i>			w wodach Martwej Wisły w sąsiedztwie składowiska <i>in Dead Vistula River in the heap's vicinity</i>
	OIKOS (1998)	WIOŚ (2006)	Trokowicz (2007)	Trokowicz (2007)
Fosforany (PO <sub>4</sub> ) <sup>-3</sup> <i>Phosphates</i>	7000–48 000	11 200	11 400	13,5
Fluorki (F <sup>-1</sup> ) <i>Fluorides</i>	40–800	40	62	5,6
Siarczany (SO <sub>4</sub> ) <sup>-2</sup> <i>Sulphates</i>	≤3000	2100	1540	410
Azotany (NO <sub>3</sub> ) <sup>-1</sup> <i>Nitrates</i>	b.d.	b.d.	0,3	<0,01
Kadm (Cd) <i>Cadmium</i>	4,3	0,6	0,6	0,001
Miedź (Cu) <i>Copper</i>	1,1	0,06	0,3	0,002
Nikiel (Ni) <i>Nickel</i>	3	1,1	0,8	0,005
Chrom (Cr) <i>Chromium</i>	0,6	0,1	b.d.	b.d.
Ołów (Pb) <i>Lead</i>	0,6	b.d.	0,01	<0,01
Cynk (Zn) <i>Zinc</i>	20,4	4,9	3,3	0,015

Odczyn pH odcieków pozostawał w przedziale 2,4÷4,7 / *The pH of leachates remained within 2.4÷4.7*

**Tab. 2.** Pierwiastki promieniotwórcze w fosfogipsach marokańskich (PIG, 2006)**Table 2.** Radioactive elements in phosphogypsum of Moroccan origin (PIG, 2006)

Składniki Components	1989 r.	2006 r.	
	Świeżyfosfogips <i>Fresh phosphogypsum</i> [g/t]	Świeżyfosfogips <i>Fresh phosphogypsum</i> [g/t]	Stary fosfogips <i>Old phosphogypsum</i> [g/t]
Uran (U) <i>Uranium</i>	25	17	<2
Tor (Th) <i>Thorium</i>	100	3	4

Wyniki badań fosfogipsów w Wiślinie wskazują, że w metodzie mokrej przerobu fosforytów marokańskich na nawozy fosforowe, stosowanej w GZNF *Fosfory*, ok. 86% aktywności radioizotopów uranu i ok. 70% toru, zawartych w surowcu wyjściowym, przechodzi do kwasu fosforowego, natomiast 85% aktywności polonu  $^{210}\text{Po}$  i radioołowiu  $^{210}\text{Pb}$  pozostaje w fosfogipsie, a emanacja radionuklidów do atmosfery jest nieznaczna, z wyjątkiem gazowego radonu  $^{222}\text{Rn}$  (Bem, 2005).

W składowanych fosfogipsach uran występuje w związkach jako sześciowartościowy  $\text{U}^{(\text{VI})}$ . W fosforytach przerabianych metodą moką jest on rozpuszczalny w wodzie. Zawartość uranu w środowisku, jak również toru, ulegała stopniowemu zmniejszaniu w czasie (tab. 2), gdyż pierwiastki te podlegały ługowaniu przez opady atmosferyczne infiltrujące powierzchnię składowiska (Trokiewicz, 2007). W trakcie wytwarzania kwasu fosforowego z fosfatów  $^{226}\text{Ra}$  i  $^{210}\text{Po}$  osadzają się razem z wapniem w fosfogipsie, natomiast większa część  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Th}$  i  $^{230}\text{Th}$  przechodzi do nawozów fosforowych (Skwarzec i in., 2008).

Wyniki badań aktywności radionuklidów  $^{234}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{210}\text{Po}$  i  $^{210}\text{Pb}$  w wodach powierzchniowych, glebie i roślinności wykazały również spadek ich zawartości w czasie eksploatacji składowiska (Boryło i in., 2009; Skwarzec i in., 2010). Natomiast według Olszewskiego (2015) po zakończeniu składowania fosfogipsów w 2009 r. i zabezpieczeniu hałdy z zastosowaniem tzw. rekultywacji technicznej i biologicznej zasięg kumulowania się wymienionych radioizotopów w glebach został ograniczony do odległości 300–400 m od składowiska. Stwierdzono również ograniczony wpływ fosfogipsów na podwyższone stężenie uranu w wodach Martwej Wisły (Olszewski, 2015). Nie dysponujemy informacjami na temat stężenia innych pierwiastków promieniotwórczych w wodach i gruntach w okolicy hałdy fosfogipsów w Wiślinie.

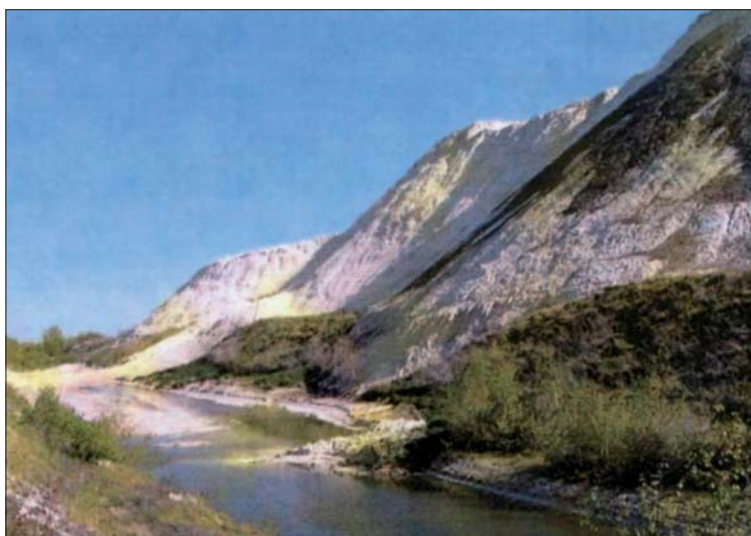
Brak eksperymentalnych danych odnośnie form pierwiastków promieniotwórczych, metali ciężkich czy pierwiastków ziem rzadkich sprawia, że nie można, niestety, wystarczająco klarownie ocenić ani prognozować przebiegu procesów hydrogeochemicznych zachodzących w samej hałdzie oraz jej oddziaływania na środowisko. Byłoby to możliwe na podstawie wyników sekwencyjnej analizy fosfogipsów oraz eksperymentalnego modelowania procesów ługowania w warunkach dynamicznych (testy ko-

lumnowe). W efekcie takich badań uzyskalibyśmy również informacje odnośnie możliwości przemysłowego odzyskania cennych pierwiastków.

Od 2000 r. prowadzono na składowisku tzw. rekultywację biologiczną, polegającą na składowaniu na jego powierzchni osadu czynnego z komunalnej oczyszczalni ścieków w Gdańsku, w celu utworzenia trwałej pokrywy roślinnej, mogącej powstrzymać eoliczny transport fosfogipsów z hałdy (Hupka i in., 2006; Granatowicz i in., 2008). W związku z tym po zakończeniu eksploatacji składowiska w 2009 r. powstał ekran słabo przepuszczalnych osadów na powierzchni hałdy (ryc. 3). Jednakże osad czynny z miejskiej oczyszczalni zawiera duże stężenia metali ciężkich, większe niż w deponowanych fosfogipsach. Zawiera także EDCs (*Endocrine Disrupting Compounds*), czyli estrogeny, związki azotu i fosforu, bakterie, grzyby i wirusy (Trokiewicz, 2007; Trokiewicz i in., 1993). Transport różnego rodzaju zanieczyszczeń ze składowiska fosfogipsów zależy od intensywności opadów i parowania, od odczynu pH i potencjału oksydacyjno-redukcyjnego Eh w warstwie wodonośnej i glebie oraz od natężenia procesów adwekcji (konwekcji), nukleacji, dyfuzji, hydrodyspersji, wymiany jonowej i biodegradacji (Trokiewicz, 1992) oraz wodoprzepuszczalności gleby i składowanych odpadów. Dyspersja hydrodynamiczna jest procesem o kilka rzędów szybszym od dyfuzji molekularnej i w rozwiązaniach inżynierskich jest ona zwykle pomijana. Przegląd metod oceny parametrów migracji opisali Małozzewski i Zuber (1992), Małecki i in. (2006) oraz Okońska (2006).

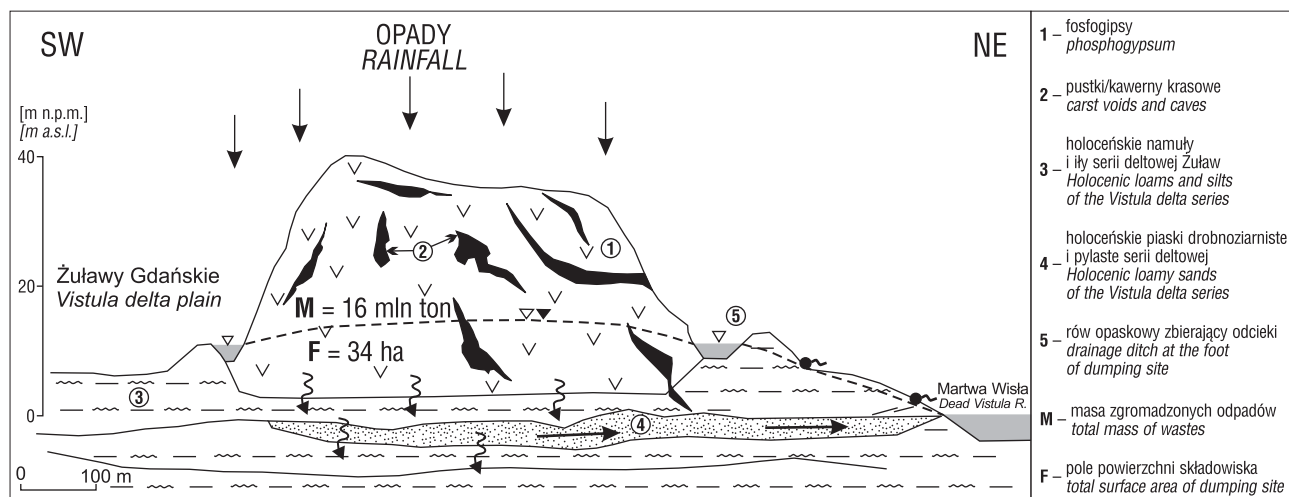
Zamknięcie składowiska odpadów w 2009 r. i podjęcie rekultywacji biologicznej wpłynęły na zmianę zasięgu jego oddziaływania na środowisko poprzez zmniejszenie pylenia oraz ograniczenie migracji substancji zanieczyszczających uwalnianych z hałdy, zwłaszcza że również ich ilość uległa zmniejszeniu w czasie jej eksploatacji, wskutek ługowania przez infiltrujące wody opadów atmosferycznych.

Ocena zmian chemizmu odcieków i ich wpływu na jakość wód gruntowych w podłożu hałdy oraz jej sąsiedztwie jest



**Ryc. 3.** Skarpa składowiska fosfogipsów w trakcie budowy ekranu w 2008 r. Białe pola są osuwiskami fosfogipsów i osadów ściekowych. Fot. D. Trokiewicz

**Fig. 3.** Slope of the phosphogypsum dump during the cover construction, taken in 2008. White areas indicate landslides of sewage precipitates deposited on phosphogypsum. Photo by D. Trokiewicz



Ryc. 4. Schemat obiegu wód na tle procesu krasowienia składowiska w Wiślince

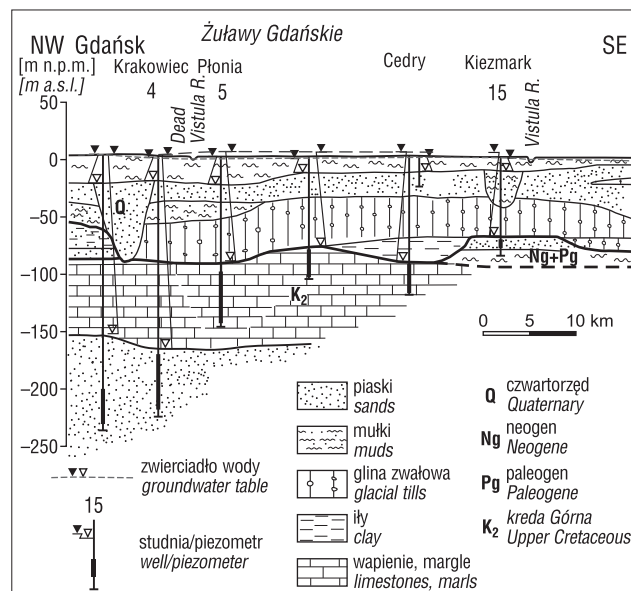
Fig. 4. Scheme of water percolation on the background of karst phenomena in the phosphogypsum dumping site at Wiślinka

nowym zadaniem, które powinno zostać uwzględnione w projekcie nowego programu walidacji monitoringu wód podziemnych. Odrębnym zagadnieniem jest oddziaływanie procesu ługowania fosfogipsów (tj. procesów krasowych) na stateczność skarp i bezpieczeństwo wokół hałdy (ryc. 3 i 4). Procesy krasowe na składowisku w Wiślince były widoczne już w 2008 r. (ryc. 3). Niestety, przebieg tych procesów na hałdach fosfogipsów był dotychczas niezwykle rzadko badany. Krasowienie rozpatrywanej hałdy może, zdaniem autorów niniejszego artykułu, przebiegać podobnie do krasowienia warstw gipsów naturalnych. Czynniki wewnętrznymi, decydującymi o formie i tempie rozwoju pustek krasowych w gipsach, są struktura i tekstura skały oraz jej szczelinowatość (Ford, Williams, 1989).

Wiadomo, że aktywacja zjawisk krasowych często następuje na skutek naruszenia słabo przepuszczalnych osadów pokrywy hałdy. Osiedlenie odpadów nagromadzonych na plastycznym podłożu gruntowym, zróżnicowanie ich ciężaru właściwego i strome skarpy mogą powodować tworzenie się szczelin zwiększających natężenie procesów infiltracji wód opadowych. Odpływ wód do podłoża (tu odcieków krasowych) oraz ich przepływ przez zabezpieczające obwałowania powodują migrację zanieczyszczeń w sąsiedztwie hałdy.

### PODŁOŻE GEOLOGICZNE SKŁADOWISKA

Składowisko w Wiślince zlokalizowano w dawnym wyrobisku łąk eksploatowanych uprzednio przez cegielnię. Znajduje się ono na terenie depresyjnym, odwadnianym przez rowy melioracyjne, w których poziom wód jest utrzymywany przez stacje pomp, podobnie jak na innych polderach żuławskich. Niestety, przed rozpoczęciem składowania fosfogipsów nie wykonano szczegółowego zdjęcia geologicznego osadów powierzchniowych. Nie zostało zatem dostatecznie rozpoznane geologiczne podłoże składowiska. Osady przypowierzchniowe, o miąższości 10–20 m, są wieku holocenijskiego i tworzą tzw. serię deltową Wisły. Są wśród nich soczewy piasków pylastych z domieszkami części organicznych, namuły, ropy i torfy (Banach, Kowalik, 1972). Gleby mają odczyn kwaśny ( $\text{pH} < 6$ ). Występujące w tej serii soczewy piasków pylastych i drobnoziarnistych zawierają lokalne warstwy



Ryc. 5. Przekrój hydrogeologiczny przez Żuławę Gdańską w rejonie składowiska odpadów w Wiślince (wg Krawiec, 2013)

Fig. 5. Hydrogeological cross-section across the Vistula Delta Plain near the dumping site at Wiślinka (after Krawiec, 2013)

wodonośne o wodach niskiej jakości, często słonawych, zawierających dużo związków żelaza i substancji organicznych. Nie tworzą one poziomów o znaczeniu użytkowym i tylko lokalnie są wykorzystywane w indywidualnych gospodarstwach rolnych. Gleby litogeniczne, semihydrogeniczne i hydrogeniczne Żuław Gdańskich mają, ciężar objętościowy w przedziale 0,55–1,2 g/cm<sup>3</sup> natomiast porowatość całkowitą 0,55–0,77 (Banach, Kowalik, 1972). Powstały one na osadach plejstocenijskich, reprezentowanych przez gliny zwałowe i piaski glacialne trzech ostatnich zlodowaceń, lokalnie także na rozdzielających je piaskach aluwialnych interglacjalów i najstarszego holocenu (Mojski, 2002). Te piaszczyste serie rozdzielają gliny glacialne oraz rynny erozyjne w stropie plejstocenu (ryc. 5) i tworzą użytkowe, plejstocenijskie poziomy wodonośne, wykorzystywane przez największe na Żuławach ujęcia komunalne.

Strop osadów kredy górnej znajduje się średnio na głębokości ok. 100 m i jest wykształcony w postaci margli, wapieni i geż, poniżej których stwierdzono piaski drobnoziarniste z glaukonitem, należące również do kredy górnej. Jest to kolejny użytkowy poziom wodonośny o zasięgu regionalnym, schodzący w pionie do głębokości 160–230 m (Burzyński, Sadurski, 1989).

### POLE HYDRODYNAMICZNE

Pole ciśnień piezometrycznych w rejonie składowiska jest kształtowane przez stany wód powierzchniowych w rowach melioracyjnych polderu, a od strony północno-wschodniej przez stany wód Martwej Wisły. Zwierciadło wody w Martwej Wiśle podlega wahaniom pod wpływem stanu Zatoki Gdańskiej. Według mareografów w Świbnie i Gdańsku pod wpływem wiatrów południowych amplituda wahań wód w zatoce przekracza 1,5 m. Najniższe stany wód powierzchniowych powodują wiatry z południa, najwyższe natomiast są wywoływane przez napływ mas powietrza z północy – od Zatoki Botnickiej (Łomniewski i in., 1975). Na stany wód pierwszego poziomu mają również wpływ stany powodziowe wzdłuż wybrzeża Zatoki Gdańskiej (Wróblewski, 1994; Dziadziuszko, Jednorą, 1996). Wahania poziomu wód powierzchniowych powodują powstawanie szerokiej strefy dyspersji w miejscu rozdziału wód słonych (morskich) i zwykłych (podziemnych) w pierwszej warstwie wodonośnej w rejonie składowiska od strony Martwej Wisły. Pierwszy aluwialny (holoceni) poziom wodonośny w szerokiej strefie wzdłuż wybrzeża na Żuławach zawiera wody słonawe (Kozerski, Kwaternikiewicz, 1988, 1990). Zwierciadło swobodne poziomu holoceni stabilizuje się na rzędnych  $-0,5$  do  $+1,0$  m n.p.m., natomiast napięte zwierciadło poziomu plejstoceńskiego stabilizuje się na rzędnych  $+1,5$  do  $+2,0$  m n.p.m. (Kordalski, 2006; Szelewicka, Lidzbarski, 2006). Najwyższą rzędną zwierciadła ustabilizowanego wód ( $+2,0 \div +5,0$  m n.p.m.) wyróżnia się poziom kredowy, dla którego Żuławy Gdańskie są strefą drenażu (Burzyński, Sadurski, 1989). W hałdzie fosfogipsów w okresie infiltracji opadów lub w czasie topnienia śniegów zwierciadło wód podziemnych może przekraczać rzędną 5 m n.p.m.

Wskutek przesiąkania wód infiltrujących z powierzchni składowiska najwyższe stany wód podziemnych utrzymują

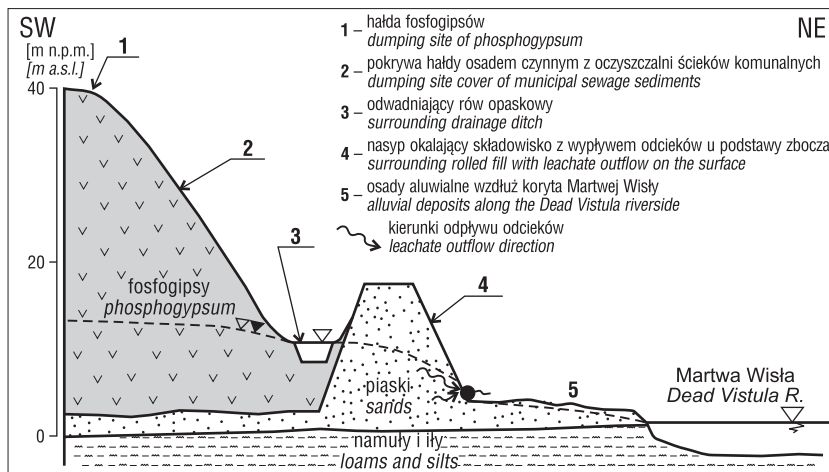
się w centrum hałdy, skąd wody odpływają do rowów opaskowych i do podłoża składowiska. Ich przepływ zachodzi nie tylko zgodnie z gradientem hydraulicznym, lecz także jest kształtowany przez gradient gęstościowy – ciężar właściwy odcieków jest znacząco większy od ciężaru wód opadowych. Ogólna mineralizacja odcieków z hałdy dochodzi do 50 g/l (pomiar własny – Sadurski, 2011). Oprócz gradientu hydraulicznego, który na odcinku do Martwej Wisły wynosi powyżej 1%, należy uwzględnić również gradient gęstościowy, który ma większą wartość, jeżeli uwzględni się ciężar właściwy odcieków  $\gamma = 1,03 \text{ T/m}^3$ . Gradient gęstościowy można szacować na ok. 3%. Powoduje on pionowy przepływ odcieków do warstw wodonośnych w podłożu. Strumień zanieczyszczeń podlega hydrodispersji i dyfuzji w otoczeniu składowiska, stąd zwiększający się w czasie zasięg aureoli zanieczyszczeń powinien być monitorowany przez nowe piezometry zafiltrowane na różnych głębokościach.

Rzędna zwierciadła wód (odcieków) w rowie opaskowym wokół hałdy wynosi średnio w roku 2,5 m n.p.m. (ryc. 6). W środku składowiska musi być wyższa i po opadach sięga zapewne ponad 5 m n.p.m. Odcieki przesiąkają poniżej podstawy obwałowań pod wpływem dużych różnic ciśnień piezometrycznych. Uszczelnienie stopy składowiska wzdłuż skarpy północnej na długości 400 m nie powstrzymało odpływu podziemnego z hałdy i migracji zanieczyszczeń do Martwej Wisły, tym bardziej przepływu odcieków do rowów melioracyjnych polderu od strony południowej.

### POLE HYDROGEOCHEMICZNE

O drenażu odcieków z hałdy w Wiślince mogą ewentualnie świadczyć wysięki i źródła zmineralizowanych wód na brzegu Martwej Wisły. Wydajność jednego z takich źródeł, odnotowana w ekspertyzie Hupki i in. (2006), wynosiła 20 l/min. Są to wody o mineralizacji do 50 g/l. W ciągu roku z wodami z tych źródeł jest wynoszonych ok. 500 t rozpuszczonych substancji (Dembicki i in., 2007).

Wstępną ocenę bilansu wodnego składowiska fosfogipsów można sporządzić na podstawie średnich z wielolecia opadów atmosferycznych oraz ewapotranspiracji. W latach 1951–1980 średnia suma opadów w roku hydrologicznym wynosiła ok. 550 mm wysokości słupa wody. Roczne sumy parowania z tego obszaru wahały się w tym czasie od 360 do 580 mm (Jurak, Krupa-Marchlewska, 2006). Czyli w latach 1951–1980 średni surowy bilans wodny, stanowiący różnicę między opadami i parowaniem, wynosił ok.  $+100 \div 130$  mm. Wnioskując z bilansu wodnego hałdy, można zakładać, że zasilenie wskutek infiltracji części opadów w roku hydrologicznym średnim wynosi ok.  $+100$  mm wysokości słupa wody. Hałda ma powierzchnię  $340\,900 \text{ m}^2$  i zasila ją ok.  $34\,000 \text{ m}^3$  wody/rok. Po zakończeniu składowania fosfogipsów i sporządzeniu ekranu ze słabo przepuszczalnych osadów z komunalnej oczyszczalni ścieków w Gdańsku oraz wskutek rozwoju roślinności na powierzchni hałdy można szacować



Ryc. 6. Szkic hydrogeologiczny przez skarpy składowiska od strony Martwej Wisły  
Fig. 6. Schematic hydrogeological cross-section across the dumping site slope from the Dead Vistula River side

wyraźny spadek infiltracji (do 50% objętości) wód opadowych w ciągu roku.

Szybkie wsiąkanie wody w głąb hałdy fosfogipsów obserwowano w trakcie jej rekultywacji (ryc. 4). Przed zbudowaniem ekranu w stropie hałdy infiltracja wód opadowych wynosiła ok. 100 mm/rok, a odcieki z hałdy charakteryzowały się ogólną mineralizacją ok. 50 g/l (Trokiewicz, 2007 – dane WIOŚ i GZNF z lat 2002–2006). Na podstawie tych danych można oszacować denudację chemiczną w ilości 1700 ton rocznie, a po uwzględnieniu gęstości odpadów  $\gamma_0 = 2 \text{ t/m}^3$ , objętość wyługowanych fosfogipsów wynosi obecnie ok. 800 m<sup>3</sup>/rok.

W masywie hałdy fosfogipsów jest możliwy rozwój zjawisk krasowych (ryc. 4). W celu wyjaśnienia przebiegu procesów fizykochemicznych ługowania fosfogipsów można przeprowadzić modelowanie hydrogeochemiczne z zastosowaniem specjalistycznego oprogramowania komputerowego, na przykład; GEOCHEM, MINERALQ lub PHREEQ C (Małozewski, Zuber, 1992). Wykorzystanie tych programów umożliwi wykonywanie obliczeń symulacyjnych do określania warunków równowagi roztworów wodnych oraz jest konieczne w przypadku modelowania procesów fizykochemicznych (sorpcja/desorpcja) i reakcji chemicznych (rozpuszczanie, specjacja, nukleacja i wymiana jonowa).

## PODSUMOWANIE

W rejonie składowiska fosfogipsów w Wiślinie nie określono początkowego tła hydrogeochemicznego, gdyż wcześniej rozpoczęto składowanie odpadów. Nie wykonano również szczegółowego kartowania geologicznego podłoża składowiska. Od początku lat 70. XX w. funkcjonuje monitoring wód podziemnych wokół hałdy, jednak usytuowanie filtrów w starych piezometrach uniemożliwia określenie zasięgu aureoli uwolnionych zanieczyszczeń oraz ocenę wskaźników zanieczyszczenia pierwszego poziomu wód podziemnych. Nie są również znane kierunki migracji ługowanych substancji zanieczyszczających. Podobne uwagi odnoszą się do wielu składowisk odpadów przemysłu chemicznego, które funkcjonują w Polsce od lat 70. i 80. XX w., a obecnie wymagają nowego podejścia do oceny skuteczności starych systemów monitoringu wód podziemnych i powierzchniowych.

Zgromadzone na hałdzie odpady zawierają wiele pierwiastków toksycznych, w tym metale ciężkie i izotopy promieniotwórcze, które pozostają w związkach chemicznych o niskiej energii wiązań oraz są mobilne w odciekach o niskim odczynie (pH = 2 – pomiar własny z 2017 r.). Zanieczyszczenia te nie są zatrzymywane w składowisku. Dlatego powstrzymanie uwolnień tych pierwiastków i substancji w odciekach do środowiska wodnego jest bardzo trudnym zadaniem i wymagającym rozległych badań terenowych i laboratoryjnych. Konieczna jest zatem walidacja starego systemu monitoringu wód w sąsiedztwie składowiska. W rozpatrywanym przypadku konieczny jest nowy system stacjonarnych obserwacji zarówno wód podziemnych, jak i powierzchniowych. Ze względu na bardzo duży ładunek substancji zanieczyszczających zgromadzonych na składowisku w Wiślinie nowy, certyfikowany monitoring należy prowadzić w jego rejonie przez następne dziesięciolecie. W związku z zachodzącymi zmianami klimatu koniecznością i jedynym rozwiązaniem jest bardzo skuteczna izolacja odpadów od czynników środowiskowych,

w tym zabezpieczenie przed powodzią oraz podnoszeniem się poziomu wód Bałtyku, gdyż składowisko znajduje się na terenie depresyjnym w bezpośrednim sąsiedztwie Martwej Wisły (Staudt i in., 2006; Kordalski i in., 2007).

Koncepcja i harmonogram działań zmierzających do zlikwidowania źródeł przecieków ze składowiska fosfogipsów w Wiślinie powinny zostać ponownie opracowane z wykorzystaniem badań i pomiarów wykonywanych bezpośrednio na terenie składowiska oraz w laboratorium chemicznym. Dotyczy to zwłaszcza bilansu wodnego oraz parametrów hydraulicznych gruntów podłoża składowiska i wału otaczającego hałdę, a także poprawnej oceny wodoprzepuszczalności podłoża i zgromadzonych odpadów. Dokładnego rozpoznania wymaga podłoże wokół składowiska. Do obliczeń natężenia migracji i jej prognozy powinny być wyznaczone: uziarnienie gruntów, zawartość substancji ilastej i organicznej, porowatość aktywna warstw wodonośnych, współczynnik dyspersji hydrodynamicznej, maksymalna pojemność sorpcyjna jonów w glebie i w podglebiu, stała dyspersji, prędkość sorpcji i desorpcji, współczynniki opóźnienia (retardacji) wybranych substancji wskaźnikowych, gęstość objętościowa szkieletu gruntowego i gęstość odcieków, natężenie przepływu wód podziemnych i inne parametry. Do tego konieczne jest wykorzystanie metod geofizycznych, umożliwiających poprowadzenie granic warstw gruntów w sposób ciągły. Teren rozpoznania powinien wykaczać poza strefę ochronną składowiska. Dobrym wskaźnikiem zasięgu aureoli zanieczyszczeń są pierwiastki promieniotwórcze o dłuższym czasie półtrwania, na przykład uran i tor. Kumulacja radionuklidów w gruncie następuje na granicy stref utleniania i redukcji na głębokości od kilku do kilkunastu metrów.

Stare systemy monitoringu wód podziemnych w sąsiedztwie składowiska fosfogipsów, a także innych starych składowisk przemysłu wydobywczego i chemicznego, wymagają przeprowadzenia walidacji w celu uzyskania certyfikatu ich sprawności i dostosowania do detekcji różnych migrujących substancji. Wyniki monitoringu wód podziemnych powinny umożliwić prognozę migracji zanieczyszczeń z uwzględnieniem zmian warunków granicznych – opady, parowanie, stany wód powierzchniowych, zwłaszcza z uwagi na postępujące zmiany klimatu i prognozowany wzrost poziomu mórz i oceanów.

## LITERATURA

- AZOUAZI M., OUAHIDI Y., FAKHI S., ANDRES Y., ABBE J.CH., BENMANSOUR M. 2001 – Natural radioactivity in phosphates, phosphogypsum and natural waters in Morocco. *J. Environment. Radioactiv.*, 54: 231–242.
- BANACH K., KOWALIK P. 1972 – Problem klasyfikacji gruntów namulowych i torfowych delty wiślanej. *Arch. Hydrotech.*, 19 (4): 627–630.
- BEM H. 2005 – Radioaktywność w środowisku naturalnym. Wyd. PAN, Łódź.
- BORYŁO A., NOWICKI W., SKWARZEC B. 2009 – Isotopes of Polonium <sup>210</sup>Po, uranium <sup>234</sup>U and <sup>238</sup>U in industrialized areas in Poland (Wiślinka). *Intern. J. Environment. Analyt. Chem.*, 89: 677–685.
- BURZYŃSKI K., SADURSKI A. 1989 – Wpływ przykrawędziowego drenażu na obieg wód kredowego piętka wodonośnego na Żuławach Wiślanych. *Kwart. Geol.*, 33 (2): 301–312.
- DEMBICKI E., SADURSKI A., CICHY W., SPRYNSKY M. 2007 – Ocena w sprawie skuteczności rozwiązań zaproponowanych przez Gdańskie Zakłady Nawozów Fosforowych, mających na celu zabezpieczenie hałdy fosfogipsów przed jej oddziaływaniem na środowisko w Wiślinie k. Gdańska. *Arch. Pol. Gdańskiej.*
- DZIADZIUSZKO Z., JEDNORAŁ T. 1996 – Zagrożenia powodziowe powodowane spiętrzeniami sztormowymi u brzegów Bałtyku i Zalewu Wiślanego. *Wiadomości IMiGW*, 19 (40), t. 3: 123–133.

- EJSMONT R. 2001 – Sukcesja pierwotna na obszarach antropogenicznych na przykładzie rekultywacji hałd fosfogipsu zakładów Chemicznych *Police*. Arch. Zakładu Chemicznego *Police*, Szczecin.
- ERDEM E., TINKILI N., YILMAZ V.T., UYANIK A., OLMEZ H. 1996 – Distribution of uranium in the production of triple superphosphate (TSP) fertilizer and phosphoric acid. *Fert. Res.*, 44: 129–131.
- FORD D.C., WILLIAMS P. 1989 – *Karst Geomorphology and Hydrology*. Univ. in Hyman, London.
- GZNF 2007 – Program działań podejmowanych w celu rozwiązania problemu oddziaływania odcieków z hałdy fosfogipsu w Wiślince na wody podziemne i powierzchniowe. Arch. Gdańskich Zakładów Nawozów Fosforowych *Fosfory-Ciech*, Gdańsk.
- GRANATOWICZ J., KOT A., SUKOWSKI T., PODLEŚNY A. 2008 – Techniczny sposób zamknięcia składowiska fosfogipsów w Wiślince. Rekultywacja biologiczna, t. 2. Arch. Pracowni Modelowania Hydrogeologicznego, Gdańsk.
- HUBKA J. (red.) 2006 – Ekspertyza określająca stopień spełnienia standardu jakości środowiska w rejonie składowiska fosfogipsów w Wiślince. Arch. Politechniki Gdańskiej.
- JURAK D., KRUPA-MARCHLEWSKA J. 2006 – Zmienność parowania w Polsce na podstawie danych pomiarowych IMGW; <http://www.imgw.eu>
- KORDALSKI Z. 2006 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, pierwszy poziom wodonośny – występowanie i hydrodynamika wraz z objaśnieniami, ark. Pruszczy Gdański. Państw. Inst. Geol. - PIB.
- KORDALSKI Z., JEGLIŃSKI W., KAULBARSZ D. 2007 – Skutki zmian klimatu w rejonie Gdańska, mapa w skali 1:30 000. Państw. Inst. Geol., Oddział Geologii Morza. Wyd. Astra, Gdańsk.
- KOZERSKI K. 2006 – Wyniki pomiarów zwierciadła wód podziemnych w rejonie składowiska fosfogipsów w Wiślince. Arch. Polit. Gdańskiej, Gdańsk.
- KOZERSKI B., KWATERKIEWICZ A. 1988 – Przyczyny i stan zasolenia wód podziemnych czwartorzędu w rejonie Gdańska. *Mat. Symp. Aktualne problemy hydrogeologii*, cz. I. Wyd. Inst. Morskiego, Gdańsk: 93–104.
- KOZERSKI B., KWATERKIEWICZ A. 1990 – The origin and state of groundwater salinization in Gdańsk Region. *Proceed. 11<sup>th</sup> SWIM*, Gdańsk. Publ. of Gdańsk Techn. Univ.: 15–24.
- KOZERSKI B., MELERSKA J. 1983 – Hydrogeologiczne aspekty składowania fosfogipsów w Wiślince. Sprawozdanie z prac badawczych w rejonie składowiska w Wiślince. Arch. Polit. Gdańskiej, Gdańsk.
- KRAWIEC A. 2013 – Pochodzenie anomalii chlorkowych w wodach podziemnych polskiego wybrzeża Bałtyku. *Wyd. Nauk. UMK, Toruń*.
- ŁOMNIEWSKI K., MAŃKOWSKI W., ZALESKI J. 1975 – *Morze Bałtyckie*. PWN, Warszawa.
- MAŁECKI J., NAWALANY M., WITCZAK S., GRUSZCZYŃSKI T. 2006 – Wyznaczenie parametrów migracji zanieczyszczeń w ośrodku porowatym dla potrzeb badań hydrogeologicznych i ochrony środowiska. *Uniw. Warsz.*
- MAŁOSZEWSKI P., ZUBER A. 1992 – On the calibration and validation of mathematical models for the interpretation of tracer experiments in groundwater. *Adv. Water Res.*, 15: 47–62.
- MOJSKI J.E. 2002 – Czwartorzęd regionu gdańskiego. *Prz. Geol.*, 50 (8): 705–708.
- OIKOŚ 1998 – Ocena oddziaływania na środowisko składowiska fosfogipsów. Przedsiębiorstwo Usługowe OIKOŚ, Gdańsk.
- OKOŃSKA M. 2006 – Identyfikacja parametrów migracji zanieczyszczeń w porowatym ośrodku hydrogeologicznym metodą modelowania eksperymentu kolumnowego. *Geologos 9, Monographiae 3*. UAM, Poznań.
- OLSZEWSKI G. 2015 – Skażenie radiochemiczne środowiska przyrodniczego wokół hałdy fosfogipsów w Wiślince w pobliżu Gdańska. *Praca doktorska. Arch. Wydziału Chemii Uniw. Gdańskiego*.
- PIG 2006 – Raport z badań środowiska w rejonie składowiska fosfogipsów w Wiślince opracowany na zlecenie Green Peace. *Nar. Arch. Państw. Inst. Geol.-PIB*.
- RUTHERFORD P.M., DUDAS M.J., AROCENA J.M. 1995 – Trace elements and fluoride in phosphogypsum leachates. *Environm. Technol.*, 16: 343–354.
- SANTOS A.J.G., MAZZILLI B.P., FAVARO D.I.T., SILVA P.S.C. 2006 – Partitioning of radionuclides and trace elements in phosphogypsum and its source materials based on sequential extraction methods. *J. Environment. Radioactiv.*, 87: 52–61.
- SKWARZEC B., BORYŁO A., NOWICKI W. 2008 – Radioaktywność hałdy fosfogipsów w Wiślince. *Mat. Uniw. Gdańskiego, Gdańsk*: 1–13.
- SKWARZEC B., BORYŁO A., KOSIŃSKA A., RADAJEWSKA S. 2010 – Polonium (<sup>210</sup>Po) and uranium (<sup>234</sup>U, <sup>238</sup>U) in water, phosphogypsum and their bioaccumulation in plants around phosphogypsum waste heap in Wiślinka (Northern Poland). *Nukleonika*, 55: 187–195.
- STAUDT M., KORDALSKI Z., ZMUDA J. 2006 – Assessment of modelled sea level rise impacts in the Gdańsk Region, Poland. [W:] *Sea Level Change Affecting the Spatial Development in the Baltic Sea Region*, Schmidt-Thome P. (red.). Geological Survey of Finland. Sp. Paper, 42.
- SZELEWICKA A., LIDZBARSKI M. 2006 – Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1:50 000, pierwszy poziom wodonośny – występowanie i hydrodynamika wraz z objaśnieniami. *Ark. Gdańsk. Państw. Inst. Geol.-PIB*.
- TROKOWICZ D. 1992 – Utilization of microbiological leaching of heavy and radioactive metals from phosphogypsum as necessary requirement of protection of environment. *Baltic Eco Working Conference, 22–25 April 1992. Proc. of Conf., Tallin*.
- TROKOWICZ D. 2007 – Wpływ składowiska fosfogipsów na środowisko i eutrofizację Zatoki Gdańskiej. Arch. Oddziału Geologii Morza Państw. Inst. Geol.-PIB, Gdańsk.
- TROKOWICZ D. 2019 – Zagrożenia związane z oddziaływaniem składowiska zwanego hałdą na środowisko. *Biul. Inf. Stowarzyszenia Naukowo-Technicznego NOT w Gdańsku*.
- TROKOWICZ D., JEDNORAŁ T., ZACHOWICZ J. 1993 – Sposób biochemiczny otrzymywania metali rzadkich z fosfogipsów. *Patent nr 157981 z kwietnia 1993 r. Urząd Patentowy RP, Warszawa*.
- WIOŚ 2006 – Monitoring wód powierzchniowych i podziemnych w rejonie składowiska w Wiślince i Martwej Wiśle, Gdańsk.
- WRÓBLEWSKI A. 1994 – Analysis and long term forecast of sea levels along the Polish Baltic Sea Coast. Part II. *Annual mean sea levels – forecast to the year 2100. Oceanologia*, 3: 107–120.

Praca wpłynęła do redakcji 28.09.2020 r.  
Akceptowano do druku 2.11.2020 r.