

Przebieg i przyczyny endogenicznego pożaru węgla kamiennego na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Katowicach

Justyna Ciesielczuk¹, Janusz Janeczek¹, Stefan Cebulak¹



J. Ciesielczuk

J. Janeczek

S. Cebulak

The cause and progress of the endogenous coal fire in the remediated landfill in the city of Katowice. *Prz. Geol.*, 61: 764–772.

A b s t r a c t. Slopes of the abandoned municipal waste landfill in the city of Katowice remediated in 1998 have been thermally active since 2007. The thermal activity was caused by spontaneous coal combustion within the sub-surface (0.5–1.5 m below ground level) layer of coal mine waste used for engineering the landfill. Exploitation of biogas from the landfill prior to thermal events may have enhanced exothermic oxidation of coal waste. The smoldering is the prevalent and persistent form of coal combustion in the landfill and is responsible for high emissions of CO (up to 3%), CO₂ (>18%), methane and a suite of gaseous hydrocarbons. Attempts to extinguish coal fire did not prevent the advance of smoldering front at a rate of tens of metres per year.

CO₂ (>18%), methane and a suite of gaseous hydrocarbons. Attempts to extinguish coal fire did not prevent the advance of smoldering front at a rate of tens of metres per year.

Keywords: coal waste, smoldering fire, municipal waste landfill, Katowice, Poland

Samoistne pożary węgla na składowiskach odpadów górniczych są zjawiskiem powszechnym, spowodowanym akumulacją ciepła powstającego w wyniku egzotermicznej reakcji utleniania węgla aż do osiągnięcia temperatury jego zapłonu (Quintero i in., 2009).

W województwie śląskim kilkanaście składowisk odpadów górniczych jest aktywnych termicznie ze względu na dużą zawartość palnej substancji węglistej (do 30% odpadów) oraz warunki sprzyjające samozagrzewaniu i samozapalaniu się tej substancji, a w konsekwencji pożarowi składowiska (Gumińska & Różański, 2005; Różański & Parchański, 2009; Misz-Kennan i in., 2013). Tego rodzaju zjawiska termiczne charakteryzują się długotrwałością, tendencją do odnawiania oraz uciążliwością i stanowią zagrożenie dla środowiska i ludzi z powodu emisji gazów pożarowych oraz powstawania odcieków zawierających niebezpieczne związki organiczne, chlorki i siarczany mogące zanieczyścić wody powierzchniowe i podziemne.

Odpady powęglowe znajdując zastosowanie m.in. w nawelacji i rekultywacji terenów zdegradowanych w wyniku działalności górniczej i przemysłowej (Sokół & Tabor, 1996). Wykorzystanie odpadów zawierających węgiel może jednak skutkować powstawaniem pożarów. W artykule opisano zjawiska termiczne trwające przynajmniej od 2007 r. na zlokalizowanym w Katowicach składowisku zrehabilitowanym z użyciem odpadów górniczych.

Składowisko odpadów komunalnych przy ul. Leopolda w Katowicach-Wełnowcu, na granicy z Siemianowicami Śląskimi (ryc. 1), funkcjonowało od 1991 r. i zostało zamknięte z końcem czerwca 1996 r. Zdeponowano w nim ok. 1,6 mln t odpadów, w tym odpady górnicze (22,5%), komunalne (21,5%), budowlane (gruz, 40%), a także odpady z kompostowni, roślinne i inne (Klejnowska, 1996). Odpady górnicze (piaskowce, łupki ilaste, mułowce) pochodziły głównie z okolicznych, najczęściej już nieczynnych kopalni węgla kamiennego w Katowicach. Zawartość substancji organicznej w odpadach komunalnych wynosiła

58,84% suchej masy, a wilgotność całkowita 46,9% (Klejnowska, 1996).

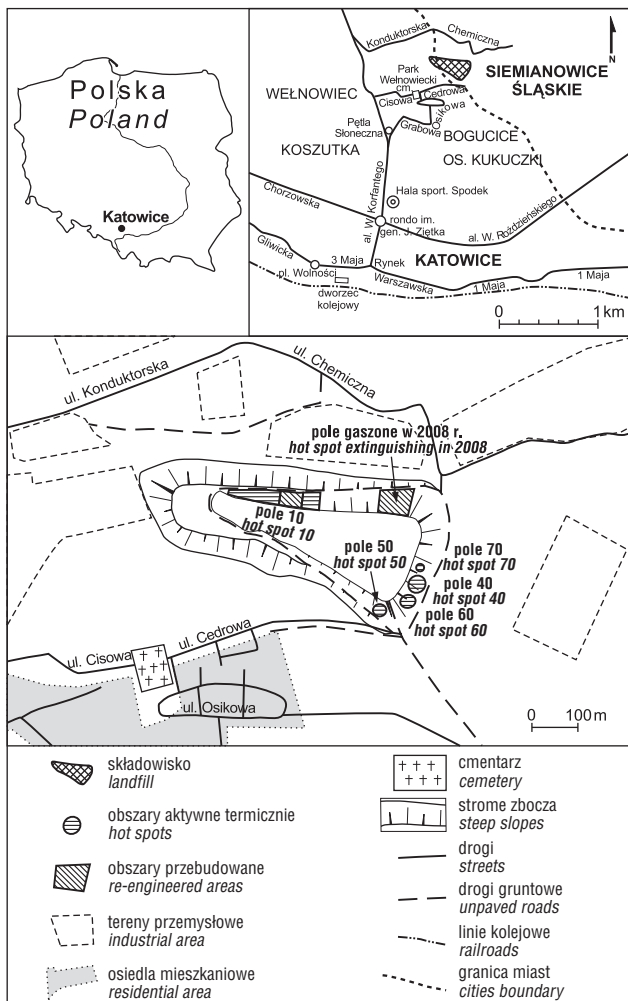
Zajmujące powierzchnię 16 ha składowisko zrehabilitowane w 1998 r. Od 2001 r. przez kilka lat prowadzono na jego terenie eksploatację biogazu (metanu). W tym celu odwiercono 39 studni odgazowujących składowisko oraz wykonano instalację zbiorczą biogazu przetwarzanego na energię elektryczną i ciepłą. W szczytowym okresie produkcja biogazu wynosiła ok. 480 m³/d („Program naprawczy...”, 2005). Eksploatację planowano na 20 lat, jednak już po kilku latach wydajność systemu spadła poniżej poziomu opłacalności inwestycji. Wkrótce po zakończeniu wydobycia biogazu na składowisku pojawiły się endogeniczne zjawiska termiczne, które stopniowo obejmowały coraz większą powierzchnię jego skarp. Zjawiskom tym towarzyszyła emisja gazów pożarowych stanowiących uciążliwość dla mieszkańców pobliskiego osiedla przy ul. Cedrowej i ul. Osikowej, którego budynki położone najbliżej składowiska znajdują się w odległości 200 m od jego południowo-wschodniego krańca.

Autorzy prowadzili obserwacje zjawisk termicznych od grudnia 2008 r. do stycznia 2013 r. Temperaturę na zwałowisku oraz pod powierzchnią terenu mierzono piro-metrem ST 643 z celownikiem laserowym oraz kanałem do pomiaru sondami typu K. Stężenie CO i CO₂ wyznaczono za pomocą rurek wskaźnikowych. W artykule zamieszczono wyniki obserwacji.

BUDOWA SKŁADOWISKA

W projekcie rekultywacji składowiska w Katowicach-Wełnowcu (Klejnowska, 1996) założono uformowanie jego bryły, a następnie izolowanie odpadów od środowiska wielowarstwową barierą (ryc. 2A). Według projektu na odpadach zalega 30-centymetrowa zagęszczona warstwa nośna skał płonnych z odpadów górniczych. Nad nią znajduje się 50-centymetrowa uszczelniająca warstwa ilasta

¹ Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski w Katowicach, ul. Będzińska 60, 41-200 Sosnowiec; justyna.ciesielczuk@us.edu.pl, janusz.janeczek@us.edu.pl, scebula@wnoz.us.edu.pl.

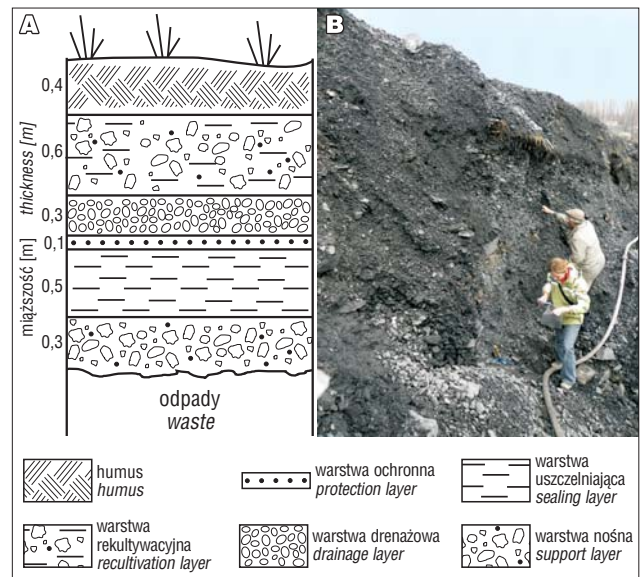


Ryc. 1. Miejsca aktywne termicznie na składowisku odpadów komunalnych zrehabilitowanym odpadami górnictwa w Katowicach-Wielonowcu

Fig. 1. Thermally active sites in the municipal waste landfill remediated with the use of coal mine waste in Katowice-Wielonowice

przykryta warstwą piasku (10 cm) i żwirową warstwą drenażową (30 cm). Warstwy żwiru i piasku podścielają warstwę rekultywacyjną o miąższości 60 cm, zbudowaną z niezagęszczonych skał płonnych zmieszanych z ziemią w proporcji 1 : 1. Na warstwie rekultywacyjnej zalega 40 cm humusu lub ziemi wzbogaconej kompostem (ryc. 2A). Powierzchnię składowiska obsiano trawą. Studnie, gazociągi i rury drenażowe są obsypane żwirem. Projektant zastrzegł, że zawartość węgla w skale płonnej nie może przekraczać 5% (Klejnowska, 1996). Z obserwacji autorów wynika, że przynajmniej północna skarpa nie była rekultywowana zgodnie z przyjętymi założeniami. Podczas prac gaśniczych prowadzonych w latach 2008 i 2009 w północnym zboczu składowiska wykopano rowy o głębokości do 5 m. Odsłoniły one odpady górnictwa o znacznie większej miąższości i o znacznie większej ilości węgla, niż było to planowane, oraz ujawniły brak stratyfikacji przewidzianej w projekcie (ryc. 2B).

Materiał skalny odsłaniający się na pozbawionych roślinności skarpach zawiera oprócz skał płonnych (średnioziarniste piaskowce, łupki ilaste, mułowce, syderyty) duże ilości łupka węglowego oraz bryłki węgla, nierzadko o rozmiarach do kilkunastu centymetrów (ryc. 3). Obecny



Ryc. 2. A – przekrój przez zaprojektowany system barier na składowisku odpadów komunalnych w Katowicach-Wielonowcu (na podstawie Klejnowskiej, 1996). Objasnienia: warstwa rekultywacyjna – niezagęszczona skała płonna (piaskowiec, łupek, mułowiec; zawartość węgla <5%) zmieszana z ziemią w stosunku 1 : 1; warstwa drenażowa – żwir o średnicy 16–32 mm; warstwa ochronna – piasek; warstwa uszczelniająca – łupek ilasty lub glina; warstwa nośna – skała płonna zagęszczona; **B** – rów o głębokości ok. 4 m wykopany w północnej skarpie ujawniający brak warstw przedstawionych na ryc. 2A oraz wielokrotnie większą miąższość odpadów górnictwa niż projektowana. Fot. J. Ciesielczuk

Fig. 2. A – cross-section through the designed multi-barrier system in the municipal waste landfill in Katowice-Wielonowice (based on Klejnowska, 1996). Explanations: recultivation layer – uncompacted coal mine waste (sandstone, shale, mudstone; coal content <5%) mixed with soil at 1 : 1 ratio, drainage layer – 16–32 mm diameter gravel; protection layer – sand; sealing layer – clay liners; support layer – compacted coal mine waste; **B** – ca. 4 m-deep trench in the north slope. Note the lack of layers shown in Fig. 2A and a much thicker cover of coal mine waste than designed. Photo by J. Ciesielczuk



Ryc. 3. Łupek węglisty i węgiel na północnej skarpie składowiska odpadów komunalnych w Katowicach-Wielonowcu. Fot. J. Janeczka

jest również klinkier, stanowiący produkt wysokotemperaturowych przeobrażeń skał osadowych spowodowanych pożarami węgla. Ponieważ występuje on poza strefami

objętymi zjawiskami termicznymi, należy przypuszczać, że pochodzi ze składowiska odpadów górniczych, z którego przywieziono materiał do rekultywacji opisywanego zwałowiska.

PRZEBIEG ZJAWISK TERMICZNYCH

Obszary objęte zjawiskami termicznymi (ryc. 1) są ograniczone do skarp, przy czym nigdzie nie osiągają ich zdrenowanej podstawy i tylko w jednym miejscu wkraczają na brzeg wierzchowiny składowiska. Występują jako wyspy ciepła (część wschodnia i południowo-wschodnia) lub pasy stopniowo obejmujące coraz większą powierzchnię (skarpa północna). Wiosną 2007 r. zjawiska termiczne odnotowano na skarpie południowo-wschodniej (pole 40 na ryc. 1). Był to rozległy obszar pozbawiony roślinności. Ze szczelin wydzielaly się gazy i dymy. W 2008 r. aktywność termiczna tego pola wzrosła po dokonaniu stabilizacji obsuwającej się skarpy kilkudziesięciocentymetrowymi drewnianymi palikami (ryc. 4A). Najprawdopodobniej palikowanie doprowadziło do dotlenienia głębiej zalegającego materiału węglowego. Temperatura gruntu w miejscach wydobywania się dymu osiągnęła 81°C.

W listopadzie 2009 r. obszar o podwyższonej temperaturze na skarpie południowo-wschodniej zmniejszył się i obejmował ok. 500 m². Nie było już palików stabilizujących zbocze składowiska. Część z nich uległa spaleni, a pozostałe zostały wyzbierane. W górnej części pola 40 tworzyły się szczeliny będące ujściami rozgrzanych gazów i pary wodnej (ryc. 4B), a na ich obrzeżach wytrącała się siarka. W tych miejscach w lutym 2010 r. na powierzchni gruntu temperatura wynosiła 59°C, a 20 cm pod powierzchnią – 80°C (gradient temperatury ok. 1,1°C/cm). Zjawiska termiczne na polu 40 ustały w 2010 r.

W styczniu 2010 r. ujawniły się nowe pola aktywności termicznej zlokalizowane na północ (pole 70) i na południe (pola 60 i 50) od pola 40 (ryc. 1, 4C). Jeszcze w grudniu 2009 r. miejsca te były przykryte śniegiem. Aktywność pola 70 zanikła w ciągu kilku miesięcy, natomiast rozmiar pola 60 w 2010 r. zwiększył się do pasa o szerokości kilku metrów i długości ok. 15 m (ryc. 4D). Maksymalna temperatura zmierzona na głębokości 30 cm wynosiła 320°C. W grudniu 2012 r. górną część pola 60 porastały rośliny inicjalne i mchy, podczas gdy jego otoczenie pokryte było kilkunastocentymetrową warstwą śniegu (ryc. 4E). W styczniu 2013 r. pole 60 miało wymiary 3,5 × 5 m i było zbudowane z przepalonego pylastego materiału mineralnego. Temperatura na powierzchni gruntu wynosiła ok. 5–7°C, na głębokości 10 cm – 40°C, a na głębokości 30 cm – 150°C (ryc. 4F).

Pole 50 w południowej części składowiska (ryc. 1) ujawniło się w styczniu 2010 r. i obejmowało wtedy obszar o średnicy ok. 15 m (ryc. 5A–B – patrz str. 779). Pod względem termicznym było niejednorodne, a proces zagrzewania węgla i zmiany stopnia zagrzewania zachodziły bardzo szybko. Materiał zdeponowany w górnej części pola uległ jedynie podgrzaniu, a nie przepaleniu, co świadczy o stosunkowo niskiej temperaturze. W dolnej części pola materiał skalny na głębokości 20–30 cm miał natomiast barwę pomarańczowo-różową, wskazującą na wysokie temperatury w podłożu prowadzące do wypalenia węgla oraz reakcji utleniania i odwodnienia materii mineralnej. Na głębokości 30 cm temperatura wynosiła 125°C, ale po

jedenastu dniach spadła do 25°C. Na aktywność termiczną pola 50 nie miała wpływu długo utrzymująca się niska temperatura powietrza (od –18°C do –6°C w dzień i od –22°C do –14°C w nocy). Temperatura gruntu w górnej części pola wynosiła 41°C, w zachodniej 13–17°C, a we wschodniej 6–7°C. Nad gruntem unosiła się para wodna, a na szczątkach roślin osiadła szadz. W lutym 2010 r. rozmiary pola 50 wzrosły, a zjawiska termiczne szczególnie nasiliły się w jego dolnej części. Temperatura na powierzchni wynosiła 28°C, na głębokości 20 cm – 240°C, a na głębokości 30 cm osiągnęła 460°C, aby po tygodniu spaść do 390°C. Odkopywaniu materiału skalnego towarzyszyło wydzielanie się dużej ilości gazów i dymu o nieprzyjemnym zapachu, a sam materiał miał barwę pomarańczowo-różową, wskazującą na przepalenie węgla i substancji mineralnej (ryc. 5C–D – patrz str. 779). Wokół ujść szczelin ekshalacyjnych z emanujących gorących gazów krystalizowały siarka i salmiak (NH₄Cl; ryc. 5E – patrz str. 779). Miejscami, w większych okruchach skalnych, w łupku węglowym zachowały się czarne laminy węgla, bardzo kruchego, poddanego wstępnemu spalaniu. Aktywność termiczna pola 50 ustała w 2010 r., jednak jeszcze w 2012 r. utrzymał się niewielki obszar pozbawiony roślinności, co wskazuje na ciągle podwyższoną temperaturę podłoża. Na obrzeżu pola 50 występowało zjawisko gigantyzmu bujnie krzewiących się roślin (ryc. 5F – patrz str. 779), które osiągały rozmiary trzykrotnie większe od maksymalnych dla swoich gatunków, co świadczy o temperaturze podłoża stwarzającej optymalne warunki dla ich wegetacji (Ciesielczuk i in., 2011).

Zjawiska termiczne najintensywniej przebiegają na północnej skarpie składowiska i obejmują ją praktycznie w całości (ryc. 1 i 6). Z końcem 2008 r. z inicjatywy Urzędu Miasta Katowice podjęto działania gaśnicze we wschodniej części skarpy północnej (pole przebudowane na ryc. 1). Polegały one na zdjęciu wierzchniej warstwy podglebia do głębokości ok. 1–2 m, schłodzeniu rozgrzanego materiału skalnego, jego mechanicznym przemieszaniu, a następnie pokryciu cementującą warstwą popiołów z elektrociepłowni (ryc. 7). Spowodowało to ustanie zjawisk termicznych na powierzchni. Po pewnym czasie przebudowany obszar porosła roślinność, jednakże już wkrótce po zakończeniu prac zaobserwowano pojawienie się nowych zjawisk termicznych ok. 300 m dalej w kierunku zachodnim. Obszar nowej wzmożonej aktywności termicznej rozciągał się na długości ok. 50 m. Jesienią 2009 r. podjęto w tym miejscu działania gaśnicze i kontynuowano je na początku 2010 r. Wykopano rów o szerokości ok. 10 m i głębokości 1,5 m, w którym materiał skalny chłodzono wodą i wodą zmieszaną z wapnem. Następnie rów ten pogłębiono do 5 m oraz wykopano równoległy rów o głębokości 4–5 m. Dostęp tlenu atmosferycznego do materiału, którego temperatura w chwili odsłonięcia sięgała 350°C, spowodował pojawienie się otwartego ognia (ryc. 6A). Pożar gaszono wodą i wodą zmieszaną z wapnem (ryc. 6B). Ta metoda okazała się jednak nieskuteczna, ponieważ brzegi gaszonego obszaru pozostały aktywne termicznie. Już w połowie stycznia 2010 r. pokrywa śnieżna zalegająca na przebudowanym polu 10 nie była jednolita (ryc. 6C). Najwyraźniej źródło ciepła nie zostało usunięte. W lutym 2010 r. aktywność termiczna gaszonego pola zintensyfikowała się wskutek wytapiania pokrywy śnieżnej i przenikania wody w głąb składowiska, co prawdopodobnie

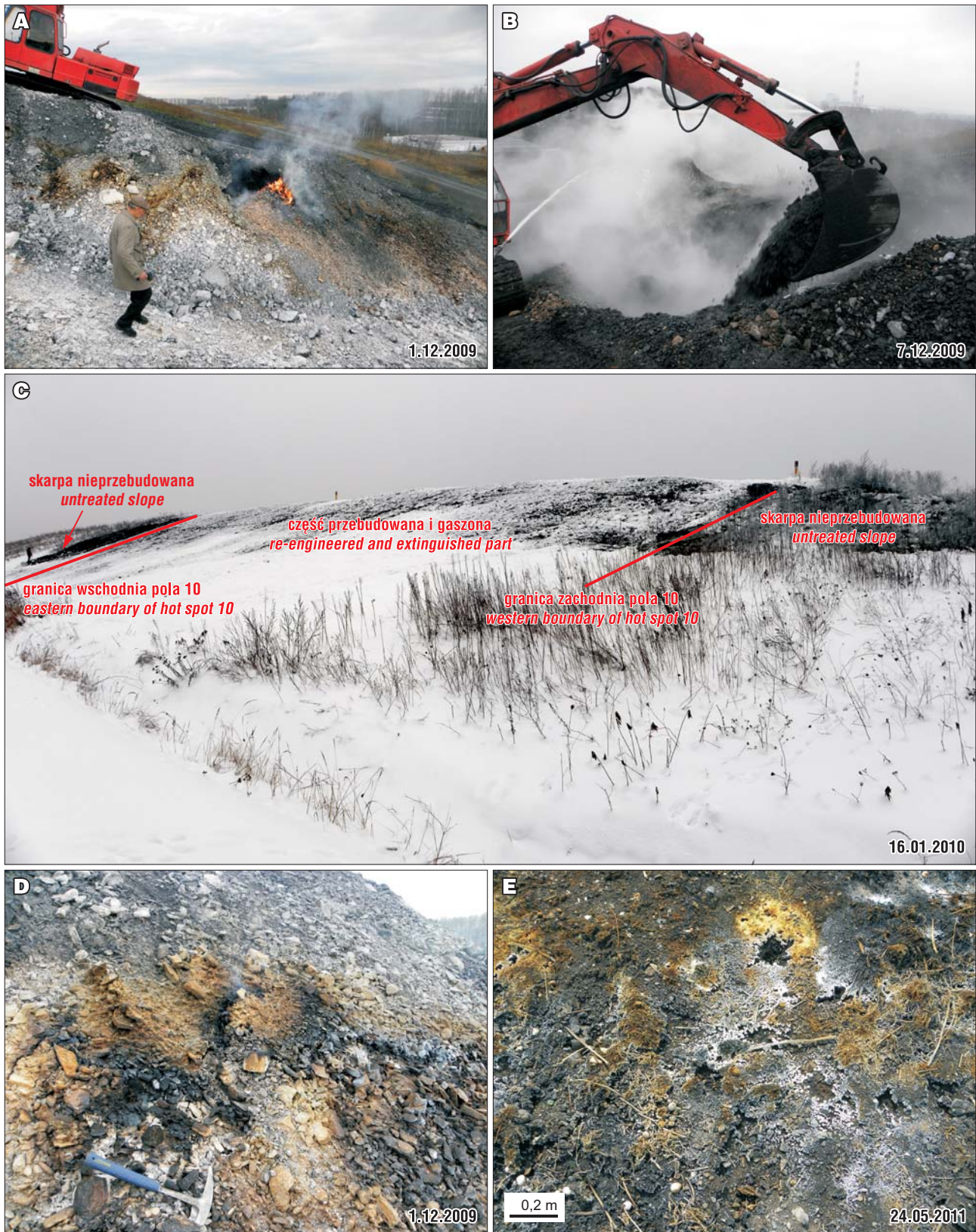


Ryc. 4. Skarpa południowo-wschodnia: **A** – stabilizacja palikami drewnianymi obsuwającego się zbocza składowiska wzmagająca aktywność termiczną pola 40; **B** – topienie śniegu w miejscach aktywnych termicznie o temperaturze 56–78°C na głębokości 30 cm; **C** – nowo powstałe pola pożarowe (60 i 70) w styczniu 2010 r.; **D** – zanik aktywności termicznej pola 40 i jej nasilenie w polu 60; **E** – rośliny inicjalne w podgrzanej północno-wschodniej części pola 60; **F** – wygasające procesy termiczne w polu 60, różnica temperatury na powierzchni w centralnej części skarpy (a) i na głębokości 30 cm (b), rozmiary pola: 3,5 × 5 m. Ryc. 4A–F fot. J. Ciesielczuk

Fig. 4. South-eastern slope: **A** – wooden poles stabilizing the sliding slope of the landfill enhanced its thermal activity; **B** – snow melting in the thermally active area with temperature of 56–78°C at a depth of 30 cm; **C** – newly formed hot spots (60 and 70) in January 2010; **D** – self-extinguishing hot spot 40 and increased thermal activity of hot spot 60; **E** – initial vegetation in the heated up north-east part of the hot spot 60; **F** – decreasing activity of hot spot 60, difference of temperature on surface in central part of slope (a) and at a depth of 30 cm b.g.l. (b), size of the hot spot: 3.5 × 5 m. Figs. 4A–F photo by J. Ciesielczuk

sprzyjało zagrzewaniu się węgla. Od tego czasu aktywność termiczna stopniowo rozszerzała się w kierunku zachodnim, a w ciągu roku front zjawisk termicznych przemieścił się kilkadziesiąt metrów na zachód. Jednocześnie obserwowano migrację zjawisk termicznych ku górze skarpy. Różnice temperatury i wilgotności gruntu między nieobjętą

pożarem krawędziową częścią skarpy a częścią objętą wzrostem temperatury spowodowały obsuwanie się gruntu i tworzenie szczelin stanowiących ujścia gazów i dymów (ryc. 6D). Wokół nich krystalizowały sublimaty siarki i salmiaku, a także okazjonalnie minerały organiczne (ryc. 6E; Fabiańska i in., 2013). W marcu 2011 r. na głębokości



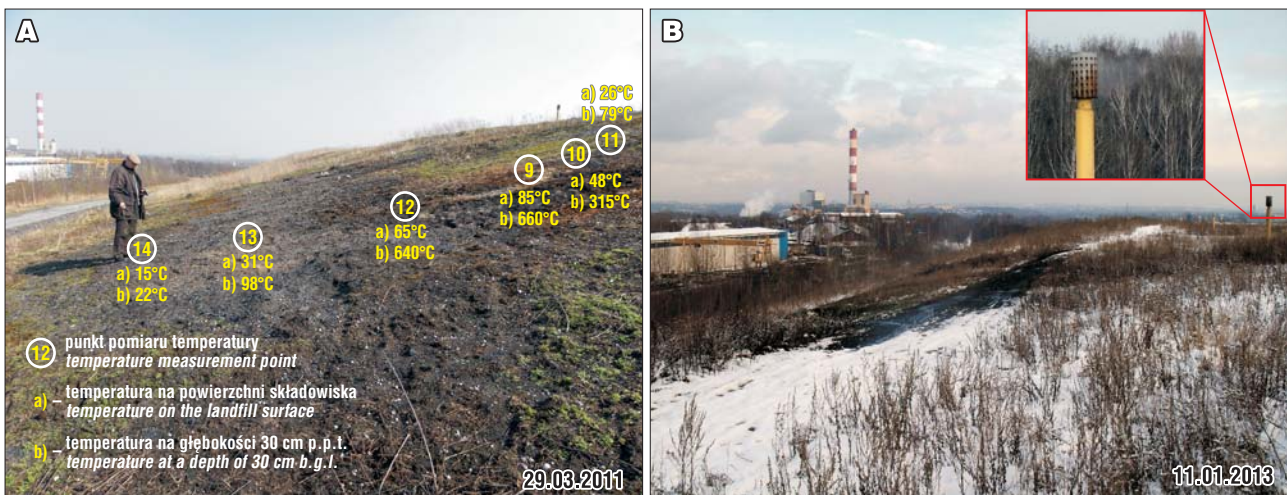
Ryc. 6. Skarpa północna, pole 10: **A** – ogień jako efekt dotlenienia tłącego się węgla w materiale rekultywacyjnym; **B** – gaszenie centralnej części skarpy wodą i wodą z wapnem; **C** – zróżnicowana aktywność termiczna skarpy w miesiąc po akcji gaśniczej, podkreślona zmienną grubością pokrywy śnieżnej lub jej brakiem; **D** – osmalony rumosz skalny wokół szczelin ekshalacyjnych w warstwie rekultywacyjnej w dolnej części skarpy; **E** – salmiak (biały), siarka (żółta) i minerały organiczne (miodowe) sublimujące wokół ujść szczelin ekshalacyjnych. Ryc. 6A–E fot. J. Ciesielczuk

Fig. 6. North slope, hot spot 10: **A** – flaming fire on the slope as a result of excavation of smoldering debris; **B** – extinguishing smoldering fire in central part of the slope with water and lime slurry; **C** – lack of snow cover and variable snow thickness reflect various degree of thermal activity on the slope a month after fire-fighting; **D** – osmalony rumosz skalny wokół szczelin ekshalacyjnych w warstwie rekultywacyjnej w dolnej części skarpy; **E** – sal ammoniac (white), sulphur (yellow) and organic minerals (honey-brown) along venting fissures. Figs. 6A–E photo by J. Ciesielczuk



Ryc. 7. Skarpa północna: **A** – rów o długości 10 m i głębokości 5 m we wschodniej części skarpy wykopany w celu schłodzenia i usunięcia rozgrzanego materiału, następnie wypełniony popiołem z elektrowni w czasie akcji gaśniczej w grudniu 2008 r.; **B** – objęta pożarem centralna część skarpy ok. 300 m na zachód od rowu z ryc. 7A. Ryc. 7A–B fot. J. Ciesielczuk

Fig. 7. North slope: **A** – 10-m wide and 5-m deep trench in eastern part of the slope dug to remove and cool the smoldering material and subsequently filled with fly-ash slurry during fire-fighting in December 2008; **B** – smoldering fire in the central part of the slope some 300 m west of the trench in Fig. 7A. Figs. 7A–B photo by J. Ciesielczuk



Ryc. 8. Skarpa północna: **A** – rozkład temperatur na powierzchni składowiska (a) i na głębokości 30 cm p.p.t. (b) w zachodniej części skarpy. Fot. J. Ciesielczuk; **B** – szary dym wydobywający się z komina studni odgazowującej na krawędzi skarpy będący efektem migracji aktywności termicznej w kierunku wierzchołwa; temperatura zewnętrznej powierzchni komina wynosi 40°C. Fot. J. Janeczek

Fig. 8. North slope: **A** – temperature on the landfill surface (a) and at a depth of 30 cm b.g.l. (b) in the western part of the slope. Photo by J. Ciesielczuk; **B** – grey smoke from chimney of the degassing well (inset) near the edge of the slope reflects the migration of thermal activity towards the top of the landfill; temperature of the outer surface of chimney is 40°C. Photo by J. Janeczek

30 cm w pobliżu szczeliny ekshalacyjnej zarejestrowano temperaturę 640°C (ryc. 8A).

W styczniu 2013 r. obszar aktywny termicznie na skarpie północnej miał długość ok. 100 m i zbliżał się do jej zachodniego krańca. W części wierzchołwa graniczącej ze skarpią objętą pożarem obserwowano miejsca o temperaturze na tyle wysokiej, że nie utrzymywała się pokrywa śnieżna, co świadczy o przemieszczaniu się zjawisk termicznych w stronę wierzchołwa. Z komina studni odgazowującej składowisko położonej na wierzchołwie, ok. 5 m od strefy zapożarowanej, wydzielały się para wodna i dym o charakterystycznym zapachu towarzyszącym termicznemu rozkładowi węgla (ryc. 8B).

Zjawiska termiczne obserwowane na składowisku mają wyraźne centra i duży gradient temperatury. Przykładowo, temperatura pomierzona na skarpi północnej w marcu 2011 r. na powierzchni gruntu w miejscu emanacji gazo-

wych zmieniała się na odcinku 10 m od 15°C do 85°C, a na głębokości 30 cm na odcinku 5 m od 22°C do 640°C, czyli przekraczała temperaturę zapłonu węgla (ryc. 8A). Również w profilach głębokościowych przyrosty temperatury były bardzo duże (tab. 1). Pełny profil zmian temperatury do głębokości 1 m uzyskano tylko w jednym punkcie pomiarowym (D w tab. 1). Zwraca uwagę, że temperatura na głębokości 0,5 m była w tym punkcie znacznie wyższa od temperatury na głębokości 1 m, co sugeruje płytkie zaleganie ogniska pożarowego.

Istnieje wyraźna zależność pomiędzy temperaturą na głębokości 1 m a stężeniem CO (stężenie CO₂ we większości punktów przekroczyło skalę rurki pomiarowej, tj. 18% obj.; tab. 1). W miejscach, gdzie na głębokości 1 m temperatura nie była wyższa niż 50°C, stężenie CO wynosiło kilka setnych procenta, natomiast w miejscach o temperaturze powyżej 100°C stężenie CO przekraczało 1%.

Tab. 1. Temperatura w profilach pionowych i zawartość CO i CO₂ w miejscach aktywności termicznej na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Katowicach-Wielowcu zmierzona 22 października 2010 r.**Table 1.** Temperature at a various depths and concentrations of CO and CO₂ in the hot spots of the municipal waste landfill in Katowice-Wielowiec, measured on October 22, 2010

Punkt pomiarowy Measurement point	pole 10 hot spot 10							pole 40 hot spot 40	pole 50 hot spot 50	
	A	B	C	D	E	F	G	41	51	57
Temperatura na powierzchni składowiska [°C] Temperature on the landfill surface [°C]	8	15	15	58	55	20	8	17	16	28
Temperatura pod powierzchnią składowiska [°C] Temperature below the landfill and surface [°C]	9	39	40	200	90	48	10	40	22	80
Temperatura na głębokości 0,5 m p.p.t. Temperature at a depth of 0.5 m b.g.l.	b.d.	b.d.	b.d.	286	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.	b.d.
Temperatura na głębokości 1 m p.p.t. Temperature at a depth of 1 m b.g.l.	28	76,9	220	221	220	110	47,4	84	280	420
Zawartość CO [%] CO content [%]	0,02	0,2	1,5	b.d.	>3	2,5	0,02	2,5	1	b.d.
Zawartość CO ₂ [%] CO ₂ content [%]	>18	>18	>18	b.d.	>18	>18	16	>18	>18	b.d.

b.d. – brak pomiarów / no data.

Szczególnym przypadkiem jest punkt 41 (tab. 1), w którym stosunkowo niskiej temperaturze na głębokości 1 m towarzyszyła duża emisja CO (2,5%). Duże stężenie CO sugeruje spalanie w warunkach niedoboru tlenowego, co jest charakterystyczne dla procesu tlenia węgla (inaczej: spalanie bezpłomieniowe, żarzenie – szczególnie przypadek reakcji spalania, której nie towarzyszy płomień; Rein, 2011), a także wskazuje, że mogło dojść do przeobrażenia węgla skutkującego zwiększeniem jego skłonności do chemisorpcji tlenu (np. wietrzeniowej dezintegracji) i w związku z tym do obniżenia temperatury termicznego rozkładu z emisją CO.

Duże stężenie CO₂ jest zapewne w znacznej części spowodowane utlenianiem CO. Oprócz CO i CO₂ obserwuje się duże stężenie metanu i innych gazowych węglowodorów (M. Fabiańska, 2013, inf. ustna).

PRZYCZYNY ZJAWISK TERMICZNYCH

Przebieg zapożarowania składowiska odpadów w Katowicach-Wielowcu, jego ograniczenie do skarp, geometria pól termicznie aktywnych i niewielka głębokość ognisk pożarowych (0,5–1 m) wskazują na endogeniczną przyczynę zjawisk termicznych, tj. samozagrzanie, a następnie samozapalenie się węgla nagromadzonego w rekultywacyjnej warstwie odpadów górniczych. Na podstawie rozmiarów, lokalizacji i geometrii obszarów aktywnych termicznie można sądzić, że w południowej i wschodniej części składowiska węgiel był nagromadzony nierównomiernie, natomiast część północna zawierała węgiel bardziej równomiernie rozmieszczony w skarpie, dlatego cała północna skarpa była i jest obszarem termicznie aktywnym.

Wiadomo, że czynnikami sprzyjającymi samozagrzewaniu i samozapaleniu się węgla są: jego zdolność do chemisorpcji tlenu (oksyreaktywność wynikająca ze składu chemicznego, stopnia uwęglenia i rozdrobnienia), słabe przewodnictwo cieplne otoczenia sprzyjające akumulacji ciepła aż do temperatury zapłonu węgla, obecność utlenianego pirytu oraz ułatwiony dostęp tlenu i wody do węgla (Wagner, 1980; Smith & Glasser, 2005; Hanak & Nowak, 2010; Kim, 2011). Na opisywanym składowisku występują wszystkie te czynniki.

Bez wątplenia przyczyną aktywności termicznej składowiska i związanych z tym pożarów należy upatrywać w zbyt dużej ilości odpadów górniczych użytych do rekultywacji i zbyt dużej zawartości w nich węgla (znacznie powyżej 5%). Na powierzchni skarp i u ich podnóża bez trudu można znaleźć spore bryły węgla oraz liczne przerosty węgla w łupku ilastym (ryc. 3). Oksyreaktywna analiza termiczna węgla z łupków węglistych ze składowiska wykazała, że niektóre z nich mają dużą skłonność do samozapalania. Najbardziej podatne są węgle o charakterze pierwotnym, bez oznak procesów wtórnych, wykazujące silne skłonności do chemisorpcji i rozkładu termicznego, zawierające w przewodzie spękany i porowaty wityrynit oraz minerały siarczkowe (Henc, 2011).

Zważywszy, że zjawiska termiczne ujawniły się po ustaniu eksploatacji biogazu, nie można wykluczyć istotnej roli studni odgazowujących składowisko w jego napowietrzeniu, a tym samym w utlenieniu węgla. Dwanaście studni odgazowujących pozostało aktywnych już po zakończeniu eksploatacji biogazu i po ujawnieniu się zjawisk termicznych. Mogły umożliwić dalszy dostęp powietrza atmosferycznego do stref występowania odpadów powęglowych i przyspieszyć, a nawet inicjować utlenianie węgla. Aktywne studnie odgazowujące zlokalizowane są wyłącznie wzdłuż skarp objętych zjawiskami termicznymi. Potwierdzenie, że studnie te są drożne dla gazów, stanowią obserwacje z grudnia 2012 r. i stycznia 2013 r. dotyczące emancji gazów pożarowych z komina studni zlokalizowanej 5 m od strefy objętej pożarem (ryc. 8B).

Istotną rolę w samozagrzewaniu węgla odgrywa woda (Wasilewski & Charchalis-Patzek, 1983; Pluta & Cebulak, 2010). Świadczą o tym zaobserwowane przez autorów wzmoczenia aktywności termicznej oraz emisji gazów i dymów po obfitych opadach deszczu i roztopach śniegu. Adsorpcja wody na powierzchni węgla może w krótkim czasie zintensyfikować jego utlenianie, a tym samym zwiększyć ilość uwalnianego do otoczenia ciepła (Smith & Glasser, 2005). Dokumentują to wykonane przez autorów analizy termiczne węgla zwilżonego wodą. Rozkład termiczny węgla mokrego wraz z emisją CO rozpoczął się już w temperaturze 180–210°C, a temperatura maksymalnego utleniania węgla, odpowiadająca reakcji jego samozapalania,



Ryc. 9. Wysoka aktywność termiczna północnej skarpy składowiska w styczniu 2013 r. uwidoczniła brakiem pokrywy śnieżnej i wydobywającym się dymem. Fot. J. Janeczek

Fig. 9. High thermal activity of north slope of landfill in January 2013 reflected by lack of snow cover and by smoke. Photo by J. Janeczek

wynosiła 270–280°C. W przypadku węgla suchego te temperatury są dużo wyższe i wynoszą odpowiednio ok. 250–280°C oraz 350–360°C.

Różnorodność rozmiarów okruchów skał w odpadach górniczych oraz ich niezagęszczenie w warstwie rekultywacyjnej (ryc. 2B) stworzyły korzystne warunki dla dyfuzji powietrza w przestrzeń porową i ułatwiły utlenianie węgla, a jednocześnie sprzyjały kumulacji ciepła. Świadczy o tym m.in. duży gradient temperatury, dochodzący do 4°C/cm w miejscach najintensywniej zapożarowanych.

Niezbyt wysokie temperatury rejestrowane na głębokości bliskiej ogniskom pożarowym oraz duża ilość wydobywającego się CO i innych gazów pirolitycznych wskazują, że tlenie się węgla było głównym procesem spalania. Tlenie się węgla może zachodzić przy względnie małej ilości tlenu i prowadzi do niepełnego utlenienia węgla, w wyniku czego następuje znaczna emisja CO i węglowodorów. W odróżnieniu od spalania płomieniowego tlenie charakteryzuje się niższymi maksymalnymi temperaturami (500–1000°C; Rein, 2011). Spalanie płomieniowe obserwowano tylko w czasie odsłonięcia objętych pożarem części składowiska i bezpośredniego kontaktu tłącego się węgla z tlenem atmosferycznym (ryc. 6A). Również wyraźna liniowość przemieszczania się frontu zjawisk termicznych na skarpie północnej wskazuje na tlenie się węgla jako główny proces spalania.

Ograniczenie zjawisk termicznych do skarpy składowiska skłania do przypuszczenia, że wierzchovina została zrehabilitowana zgodnie z projektem, a skarpy nie. Wspomniane wcześniej spostrzeżenia dotyczące struktury północnej skarpy składowiska odsłoniętej w trakcie działań gaśniczych potwierdzają tę tezę. Odpady górnicze na tym zboczu mają znacznie większą miąższość niż projektowane 60 cm, a ponadto zawierają dużo węgla (ryc. 2B).

DZIAŁANIA LIKWIDUJĄCE AKTYWNOŚĆ TERMICZNĄ

Aktywność termiczna składowiska na skarpie południowo-wschodniej i południowej ustała lub zanikła samistnie na skutek wypalenia się węgla. Natomiast działania gaśnicze podjęte w latach 2008 i 2009 na skarpie północnej, choć spowodowały zanik zjawisk termicznych na

części jej powierzchni, nie zapobiegły rozprzestrzenianiu się samozagrzewania węgla (ryc. 9). Obserwacje autorów wskazują, że już w trakcie prac gaśniczych przy użyciu wody z wapnem, a następnie po położeniu izolującej warstwy pyłów z elektrofiltrów, w strefie brzeżnej gaszonego pola temperatura ciągle wzrastała. Można to wyjaśnić lateralną migracją ciepła wzdłuż warstwy odpadów górniczych. Chwilowy wzrost temperatury w czasie odsłaniania materiału tworzącego zbocze składowiska aż do stadium otwartego ognia (ryc. 6A) zapewne zainicjował efekt tlenia się węgla w warstwie odpadów górniczych nieobjętych pracami gaśniczymi. Należało zatem przeprowadzić działania prewencyjne polegające na wykopaniu rowu odsłaniającego warstwę palną w odpowiedniej odległości od brzegu gaszonego pola w kierunku rozprzestrzeniania się zjawisk termicznych. Wybór miejsca do wykopania rowu prewencyjnego powinien być poprzedzony sondowaniem temperatury w celu stwierdzenia, czy badany rejon nie wykazuje oznak samozagrzewania węgla. Następnie z rowu prewencyjnego należało wybrać palne odpady górnicze bogate w węgiel i zastąpić je innym materiałem skalnym, np. przepalonym odpadem górniczym zmieszonym z drobnopiękistym materiałem uszczelniającym, najlepiej z pyłami z elektrofiltrów. Działania takich nie podjęto i w efekcie, w ciągu niespełna roku, na długości ok. 100 m nastąpiło rozprzestrzenienie podpowierzchniowego pożaru węgla objawiającego się na powierzchni wypaleniem roślinności i emanacjami toksycznych gazów.

WNIOSKI

Przyczyną zjawisk termicznych na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Katowicach-Wetnowcu jest niewłaściwie dobrany materiał skalny zastosowany jako warstwa rekultywacyjna, zawierający za dużą ilość węgla, oraz zbyt duża miąższość tego materiału, wielokrotnie przekraczająca zalecaną w projekcie. Ze względu na zawartość węgla odpady górnicze niesortowane stanowią materiał łatwopalny, który w sprzyjających warunkach ulega samozagrzewaniu i samozapłonowi, zwłaszcza jeśli węgiel należy do odmian skłonnych do samozagrzewania i ma niską temperaturę zapłonu. Na opisywanym składowisku czynnikami wyzwalającymi endogeniczne procesy

samożgrzewania węgla i jego zapłon były: duża ilość węgla podatnego na chemisorpcję tlenu, eksploatacja biogazu oraz późniejsze dodatkowe odgazowanie zwałowiska w części brzeżnej wierzchołki, sprzyjające napowietrzeniu (dotlenieniu) składowiska, kumulacja ciepła w warstwie niezagęszczonych odpadów górniczych w częściach stokowych, jak również łatwość infiltracji wód opadowych i roztopowych.

Podjęte działania gaśnicze i prewencyjne nie zapobiegły lateralnemu rozprzestrzenianiu się zjawisk termicznych, ponieważ nie odcięto drogi przepływu ciepła wzdłuż bogatej w węgiel warstwy odpadów górniczych.

Przypadek objętego pożarem składowiska w Katowicach-Wełnowcu jest o tyle wyjątkowy, że nie dotyczy typowego zwałowiska odpadów górniczych, lecz utworzonego z odpadów komunalnych składowiska, które rekultywowano niesortowanymi świeżymi odpadami powęglowymi. Objętość zdeponowanych odpadów powęglowych jest wielokrotnie mniejsza w porównaniu ze zwałowiskami odpadów górniczych. Mimo to na skutek niewłaściwie wykonanej rekultywacji doszło do zjawisk pożarowych trwających od co najmniej 5 lat.

Dziękujemy Annie Sobczak oraz firmie HALLER S.A. za udostępnienie dokumentacji dotyczącej rekultywacji zwałowiska oraz Adamowi Taborowi i Mariuszowi Gardockiemu za pomoc w pracach terenowych. Składamy także gorące podziękowania Marianowi Wagnerowi oraz anonimowemu Recenzentowi, których uwagi pomogły w dopracowaniu ostatecznej wersji artykułu. Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki przyznanych na podstawie decyzji numer DEC-2011/01/B/ST10/07588.

LITERATURA

CIESIELCZUK J., CZYŁOK A. & CEBULAK S. 2011 – Sukcesja roślinna oraz gigantyzm obserwowane na palącej się hałdzie w Katowicach-Wełnowcu, Polska. *Docum. Geonica*, 1: 51–54.
FABIAŃSKA M.J., CIESIELCZUK J., KRUSZEWSKI Ł., MISZ-KENNAN M., BLAKE D.R., STRACHER G. & MOSZUMAŃSKA I. 2013 – Gaseous compounds and efflorescences generated in self-

-heating coal-waste dumps – a case study from the Upper and Lower Silesian Coal Basins (Poland). *Int. J. Coal Geol.*, 116–117: 247–261.
GUMIŃSKA J. & RÓŻAŃSKI Z. 2005 – Analiza aktywności termicznej śląskich składowisk odpadów powęglowych. *Karbo*, 1: 53–58.
HANAK B. & NOWAK J. 2010 – Charakterystyka węgla ze zmieniowych termicznie odpadów powęglowych KWK „Nowy Wirek”. *Prz. Gór.*, 66: 106–110.
HENC I. 2011 – Wpływ zawartości i jakości węgla oraz skały płonnej na samożgrzewanie materiału składowanego na hałdzie powęglowej w Katowicach-Wełnowcu. *Uniw. Śl. [praca magisterska]*.
KIM A.G. 2011 – Coal formation and the origin of coal fires. [W]: Stracher G.B. i in. (red.) *Coal and peat fires. A global perspective*. Vol. 1. Coal – geology and combustion. Elsevier, Amsterdam: 1–28.
KLEJNOWSKA H. 1996 – Projekt budowlany: zagospodarowanie zielenią parkową terenu byłego składowiska odpadów komunalnych w Katowicach przy ul. Ludwika-Leopolda. I i II etap (uszczelnienie i odgazowanie sektora „C”). *Biuro Usług Techn. EKOTEST s.c., Gliwice*.
MISZ-KENNAN M., CIESIELCZUK J. & TABOR A. 2013 – Coal-waste dump fires of Poland. [W]: Stracher G.B. i in. (red.) *Coal and peat fires. A global perspective*. Vol. 2. Photographs and multimedia tours. Elsevier, Amsterdam: 233–312.
PLUTA I. & CEBULAK S. 2010 – Oksyreaktywność węgla i środowisko wodne w wybranych rejonach w kopalni „Marcel”. *Prz. Gór.*, 66: 101–105.
Program naprawczy byłego składowiska odpadów w Katowicach, 2005 [<http://odpady.org.pl/plugins/content/content.php?content.3946.2>; data dostępu: 20.12.2012].
QUINTERO J.A., CANDELA S.A., RIOS C.A., MONTES C. & URIBE C. 2009 – Spontaneous combustion of the Upper Paleocene Cerrejón Formation coal and generation of clinker in La Guajira Peninsula (Caribbean Region of Colombia). *Inter. J. Coal Geol.*, 80: 196–210.
REIN G. 2011 – Smoldering combustion phenomena and coal fires. [W]: Stracher G.B. i in. (red.) *Coal and peat fires. A global perspective*. Vol. 1. Coal – geology and combustion. Elsevier, Amsterdam: 308–315.
RÓŻAŃSKI Z. & PARCHAŃSKI J. 2009 – Rekultywacja zwałowisk odpadów powęglowych w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym w aspekcie zagrożenia pożarowego. *Problemy ekologii*, 1–2: 35–42.
SMITH M.A. & GLASSER D. 2005 – Spontaneous combustion of carbonaceous stockpiles. Part II. Factors affecting the rate of the low-temperature oxidation reaction. *Fuel*, 84: 1161–1170.
SOKÓŁ W. & TABOR A. 1996 – Problemy zagospodarowania odpadów powęglowych z górnictwa węgla kamiennego w Polsce. *Prz. Geol.*, 44: 710–715.
WAGNER M. 1980 – Przemiany termiczne węgla kamiennego w strefach pożarów hałd kopalnianych. *Kwart. AGH Geologia*, 6: 5–14.
WASILEWSKI P. & CHARCHALIS-PATZEK H. 1983 – Wpływ wietrzenia węgla na jego własności. *Koks-Smoła-Gaz*, 28: 106–109.

Praca wpłynęła do redakcji 30.01.2013 r.
Akceptowano do druku 8.04.2013 r.

**Przebieg i przyczyny endogenicznego pożaru węgla kamiennego
na zrehabilitowanym składowisku odpadów komunalnych w Katowicach
(patrz str. 764)**

**The cause and progress of the endogenous coal fire in the remediated landfill
in the city of Katowice (see p. 764)**



Ryc. 5. Skarpa południowo-zachodnia: **A** – nowo powstałe pole 50 o średnicy ok. 15 m (wskazane strzałką); **B** – szadź oraz para wodna w lewej części pola 50; **C** – przepalony pomarańczowo-różowy okruchy skał; **D** – zapożarowanie dolnej części pola 50. Na głębokości 30 cm temperatura wynosiła 460°C; **E** – wykwitki siarki (żółte) oraz salmiaku (białe) u ujścia szczelin ekshalacyjnych; **F** – bujna roślinność rosnąca wokół pola 50. Ryc. 5A–F fot. J. Ciesielczuk

Fig. 5. South-western slope: **A** – newly formed hot spot 50, 15 m in diameter (marked by arrow); **B** – frost and water vapour in left side of hot spot 50; **C** – pinkish colour of overburned rock debris; **D** – smoldering fire in lower part of the hot spot 50. Temperature at a depth of 30 cm b.g.l. was 460°C; **E** – efflorescences of sulphur (yellow) and sal ammoniac (white) at venting fissures; **F** – lush vegetation around hot spot 50. Figs. 5A–F photo by J. Ciesielczuk