

CHARAKTERYSTYKA PETROGRAFICZNA SKAŁ POCHODZĄCYCH ZE STRUKTURY IMPAKTOWEJ GARDNOS, NORWEGIA

PETROGRAPHIC CHARACTERISTICS OF THE ROCKS FROM THE IMPACT STRUCTURE GARDNOS, NORWAY

KATARZYNA JARMOŁOWICZ-SZULC¹, DANUTA ILCEWICZ-STEFANIUK², MICHAŁ STEFANIUK³

Abstrakt. Krater meteorytu Gardnos znajduje się w Norwegii, ok. 125 km na północny zachód od Oslo. Cała struktura jest dobrze widoczna w terenie dzięki licznym odkrywkom brekcji impaktowych i utworów poimpaktowych występujących w okręgu o promieniu ok. 5 km. Główne typy skał impaktowych w rejonie krateru Gardnos to autochtoniczna brekcja z Gardnos oraz przykrywająca ją allochtoniczna brekcja impaktowa (suevit). W artykule omówiono petrografię tych skał. Brekcja z Gardnos jest brekcją lityczną, złożoną ze spękanych fragmentów skał, ale nie zawiera fragmentów stopu. Suevit jest brekcją polimiktyczną, zawierającą małe fragmenty zrekrystalizowanego stopu z klastami skał i minerałów.

Słowa kluczowe: meteoryt, krater, brekcja impaktowa, suevit, Gardnos.

Abstract. The crater of the Gardnos meteorite is located in Norway, about 125 km north-west of Oslo. The structure is well seen due to the outcrops of impact breccias and post-impact deposits that form a circle with a radius of about 5 km. Main types of the impact rocks in the Gardnos area are the autochthonous Gardnos breccia and its cover – allochthonous suevite breccia. The petrological characteristics of these rocks are presented. The Gardnos breccia is a lithic breccia, composed of fissured rock fragments, without melt components. The suevite is a polymictic breccia, built of small fragments composed of recrystallized melt and clasts of rocks and minerals.

Key words: meteorite, crater, impact breccia, suevite, Gardnos.

WSTĘP

Zerodowany krater meteorytu Gardnos (czyli tzw. struktura Gardnos, 60°39'N, 9°00'E) znajduje się w Norwegii, ok. 125 km na północny zachód od Oslo, w dolinie Hallingdal, między miejscowościami Nesbyen i Gol (fig. 1, 2). Struktura jest widoczna dzięki odkrywkom brekcji impaktowych i utworów poimpaktowych występującym w okręgu o promieniu ok. 5 km. Profil stratygraficzny skał z rejonu Gardnos rozpoznano na podstawie badań otworu wiertniczego Branden (fig. 1C). Autochtoniczna brekcja z Gardnos i przy-

krywająca ją allochtoniczna brekcja impaktowa (suevit) stanowią główne typy utworów impaktowych na tym obszarze.

Badania skał w rejonie krateru Gardnos prowadzono już od połowy XX w. (Broch, 1945; Kalleson i in., 2009a, b), przy czym początkowo skały zbrekcjonowane łączono z wulkanizmem eksplozywnym. W latach 90. stwierdzono, że występujący w nich kwarc wykazuje cechy płaskiej deformacji, i zasugerowano impaktowe pochodzenie tej struktury (Dons, Naterstad, 1992). Nieco później French i in. (1997)

¹ Państwowy Instytut Geologiczny – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa; e-mail: katarzyna.jarmolowicz-szulc@pgi.gov.pl.

² Ul. Gramatyka 7A, 30-071 Kraków, e-mail: d.ilcewicz@gmail.com.

³ AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, e-mail: stefaniu@agh.edu.pl.

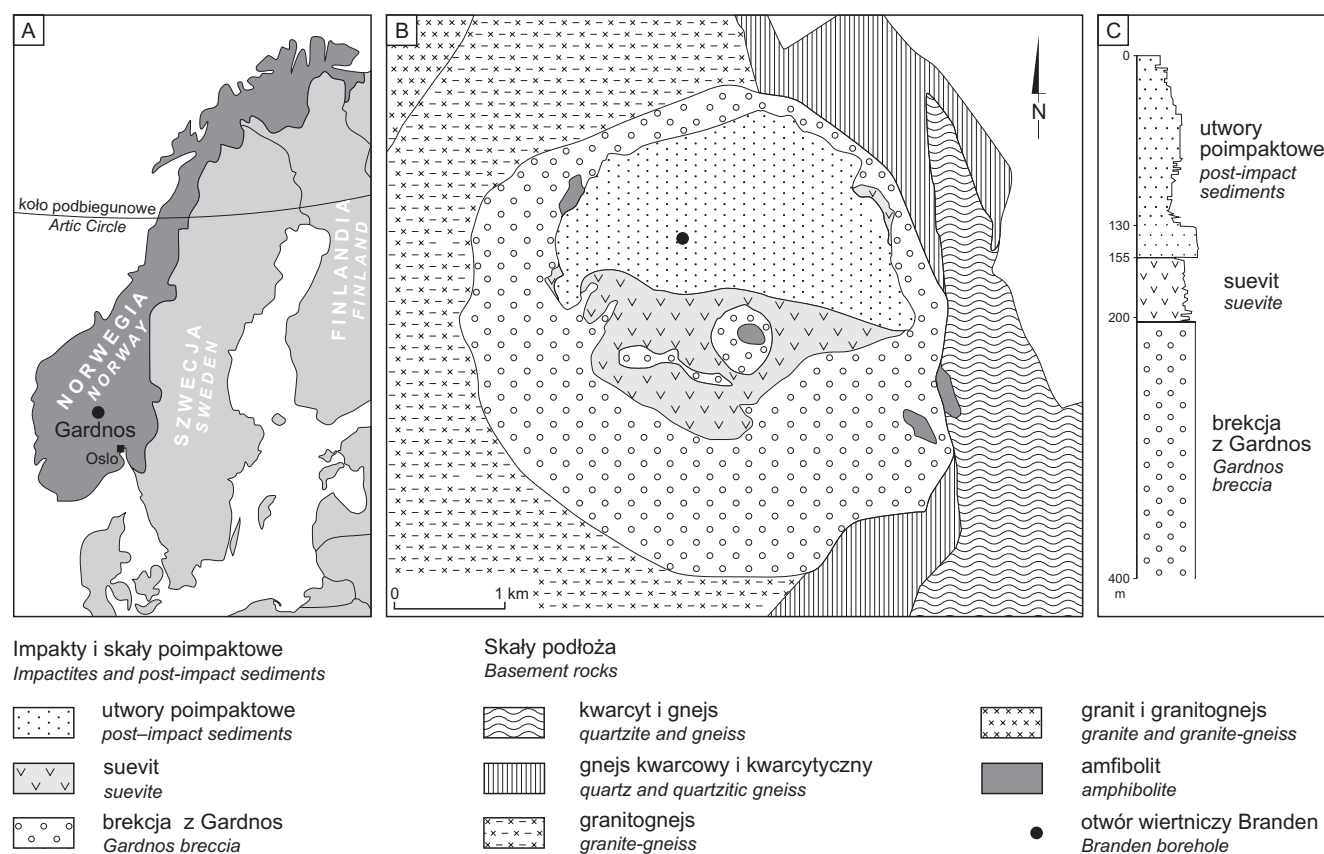


Fig. 1. Struktura Gardnos (wg Kalleson i in., 2009b; zmienione)

A – położenie; B – budowa geologiczna regionu; C – stratygrafia (uproszczony profil otworu wiertniczego Branden)

Gardnos structure (after Kalleson *et al.*, 2009b; modified)

A – localization; B – geological structure of the region; C – stratigraphy (Branden borehole simplified profile)



Fig. 2. Obszar krateru Gardnos

The Gardnos crater region

wykonali szczegółowe badania petrologiczne i geochemiczne skał z krateru, w tym analizy izotopowe osmu, i na podstawie wyników jednoznacznie wykazali obecność materiału

pozaziemskiego w brekcjach oraz rzucili nowe światło na genezę obszaru. Datowania argonowe tych skał przeprowadzili Grier i in. (1999). Na początku bieżącego stulecia ukazały się kolejne prace na temat tzw. *target rocks* (Gilmour i in., 2003; Kalleson i in., 2008). Dotyczą one głównie zawartości, charakteru i pochodzenia węgla w brekcjach impaktowych (częściowo Elsila i in., 2005) oraz utworów poimpaktowych. Oszacowano, że impakt nastąpił 400–900 mln lat temu. Kalleson i in. (2009a) wydali przewodnik terenowy po strukturze Gardnos. Szczegółowe badania impaktytów zawierających fragmenty zrekrytalizowanego stopu przeprowadzili Kalleson i in. (2010).

Pod względem badań kraterów meteorytowych zaletami struktury Gardnos są jej łatwa dostępność, występowanie pod pokrywą utworów klastycznych całkowitego profilu brekcji wypełniających krater oraz duże wzbogacenie impaktytów w węgiel (pierwiastek). Te cechy spowodowały, że autorzy zainteresowali się problematyką skał impaktowych. Przykładowe próbki tych utworów pobrano w czasie 33. Międzynarodowego Kongresu Geologicznego w Norwegii w 2009 r. W artykule opisano unikatową strukturę impaktową Gardnos i przybliżono problematykę mineralogiczno-petrologiczną rejonu.

TŁO GEOLOGICZNE

Prekambryjskie podłoże południowo-środkowej Norwegii jest zbudowane głównie z granitognejsów, kwarcytów i gnejsów suprakrustalnej formacji Telemark wieku 1,15–1,50 mld lat, intruzji amfibolitowych oraz – lokalnie – pegmatytów (French i in., 1997; Kalleson i in., 2008). Podczas orogenezy swekonorweskiej skały te zostały spiętrzone prawie pionowo i obecnie ich rozciągłość to niemal dokładnie północ–południe.

Jak już wspomniano, w rejonie między miejscowościami Nesbyen i Gol – w okrągłym kraterze meteorytowym – występują brekcje impaktowe (brekcja z Gardnos i suevit) oraz utwory poimpaktowe (fig. 1).

Brekcja z Gardnos (fig. 3) jest autochtoniczna i powstała w czasie uderzenia meteorytu, wskutek spękania skał podłoża w trakcie propagacji fali uderzeniowej. Jest ona znacz-

nie zróżnicowana w poszczególnych odsłonięciach terenowych – tworzące ją klasty białego granitu i kwarcytu oraz ciemny matriks występują w różnych proporcjach. Ilość czarnego matriksu prawdopodobnie odzwierciedla stopień wewnętrznego zmielenia i częściowego uplastycznienia termicznego skały (Kalleson i in., 2009a, b). Brekcja zajmuje duże fragmenty dna krateru. W miejscach, gdzie w czasie upadku meteorytu podłoże było zbudowane z amfibolitu, brekcja ta nie występuje, co świadczy o odmiennej reakcji skał amfibolitowych na działanie fali uderzeniowej. W porównaniu z innymi skałami stanowiącymi ówczesne podłoże omawianego rejonu amfibolity są odporniejsze nie tylko na uderzenie, lecz także na wietrzenie, dlatego skały te tworzą szereg niewielkich wzniesień widocznych w topografii rejonu (fig. 2).

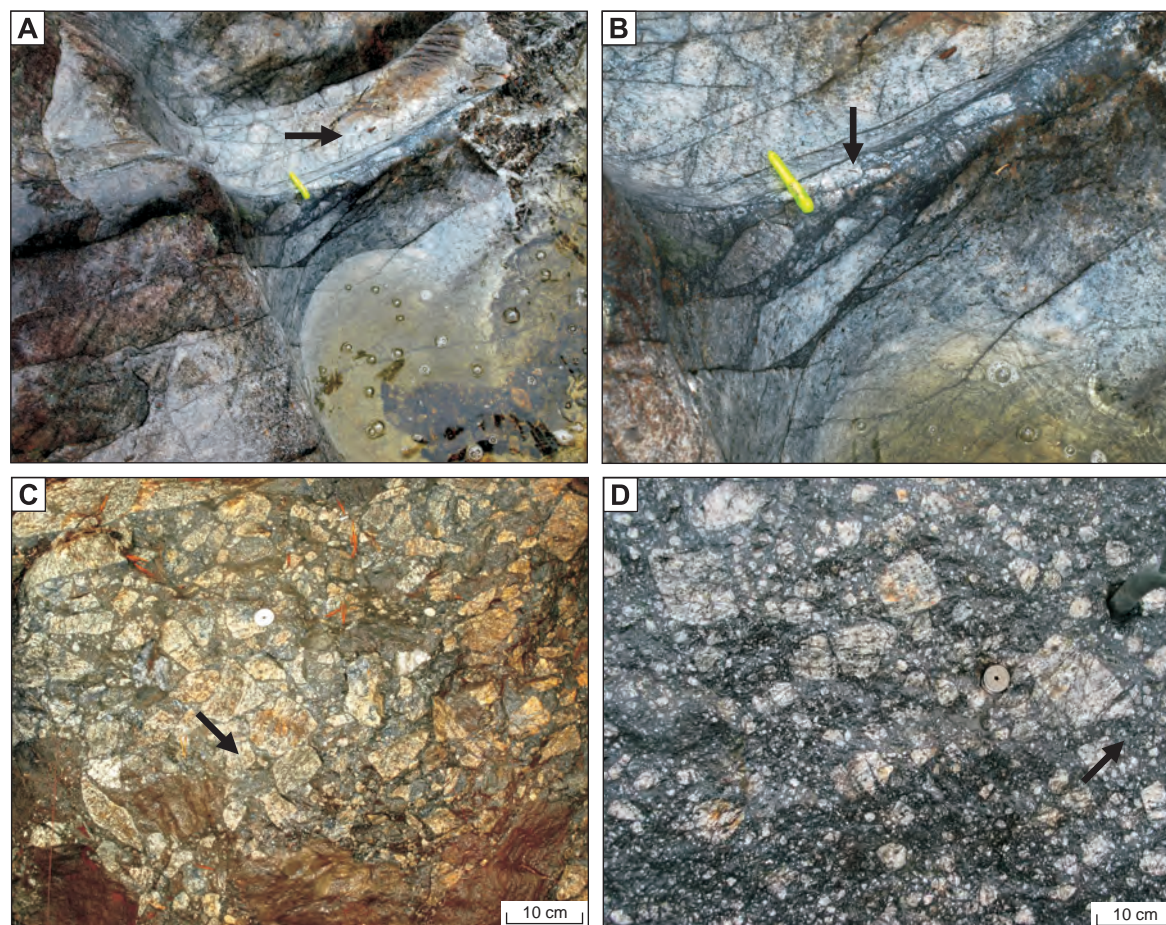


Fig. 3. Brekcja z Gardnos

A – brekcja (strzałka) w obrębie spękanych skał podłoża; **B** – olbrzymie klasty kwarcytu ze strukturami deformacyjnymi (strzałka); **C** – fragment lekko zwietrzałej skały, widoczne jasne, ostrokrawędziste, czasem lekko zaokrąglone klasty w ciemnym matriksie; **D** – fragment dużego bloku brekcji, lekko zaokrąglone klasty o zróżnicowanej wielkości (od poniżej 1 cm do kilkunastu centymetrów) tkwiące w ciemnym matriksie

Gardnos breccia

A – breccia (arrow) in the fractured rocks; **B** – huge quartzite clasts with deformation structures (arrow); **C** – fragments of slightly weathered rock, light in colour, sharp-edged, sometimes slightly rounded clasts in dark matrix; **D** – a fragment of a large breccia block, slightly rounded clasts displaying a varied size (from below 1 cm to some dozens centimeters) in dark matrix

Suevit (fig. 4) zajmuje środkową część krateru i przykrywa brekcję z Gardnos (fig. 1B–C). Jest to brekcja allochtoniczna (French i in., 1997). W drobnoklastycznym matriksie tkwią ostrokrawędziste fragmenty skał o różnej wielkości i litologii, a także – wyróżniające tę skałę – duże, ciemne fragmenty stopionych skał, dobrze widoczne na zwietrzałej powierzchni. Wyniki analiz geochemicznych suevitu wskazują, że meteoryt, który uderzył w podłoże, był meteoritem żelazistym (Goderis i in., 2009).

Utwory poimpaktowe (Kallesson i in., 2008) odsłaniające się w północnej części struktury Gardnos to różnego rodzaju skały silikoklastyczne – od brekcji i zlepieńców gruboziarnistych przez piaskowce zlepieńcowate aż po dobrze wysortowane piaskowce. W najwyższej części profilu występują przeławicenia piaskowców drobnziarnistych, iłowców oraz łupków. Sukcesja skał osadowych wskazuje na zmiany za-

chodzące w środowisku depozycji. Według zacytowanych wcześniej autorów brekcje poimpaktowe przykrywające dno krateru stanowią pozostałość lawin skalnych. Osady tego typu mogły powstać w następujący sposób: bezpośrednio po uderzeniu meteorytu luźny druzgot skalny przemieścił się po ścianie krateru i wyniesieniu centralnym i osadził się na nowo utworzonych impaktytach (fig. 4D). Później w wypełnionym wodą kraterze dochodziło do silnie piaszczystych spływów gęstościowych. W ich wyniku materiał odsłonięty przez uderzenie był przemieszczany do wnętrza krateru. Iłowce i łupki zalegające na drobnziarnistych piaskowcach powstały w warunkach spokojnej sedymentacji, porównywalnych do warunków sprzed uderzenia (sedymentacja mogła zachodzić w płytkich, stagnujących wodach – Kallesson i in., 2009b).

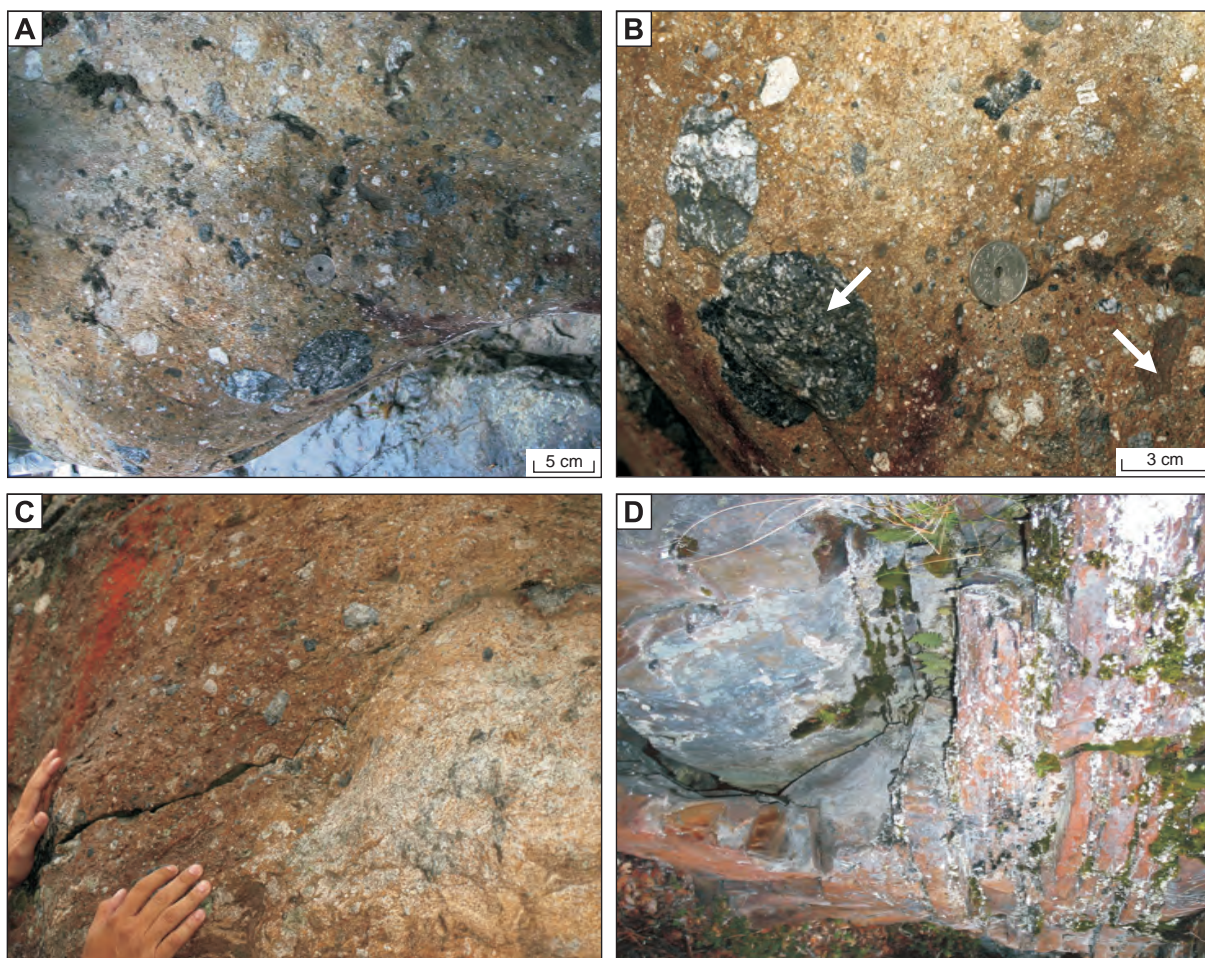


Fig. 4. Suevit i skały poimpaktowe

A – klasty lityczne i fragmenty stopu o zróżnicowanej wielkości tkwiące w drobnziarnistym matriksie; **B** – ten sam obraz co na fig. 3A, widoczne duże klasty lityczne różnego rodzaju, fragmenty stopu (strzałki) i drobnziarnisty matriks; **C** – zwietrzały fragment spękanego bloku suevitu, matriks (od drobnziarnistego do konglomeratu) otacza olbrzymi fragment skalny; **D** – utwory poimpaktowe

Suevite and post-impact rocks

A – lithic and melt clasts of very diversified size in the fine-grained matrix; **B** – same photo as in fig. 3A, large lithic clasts of different type, melt fragments (arrows) and fine-grained matrix; **C** – a weathered part of the fractured suevite block, matrix (fine to conglomerate size) surrounds a huge fragment of rock; **D** – post-impact sediments

CHARAKTERYSTYKA SKAŁ IMPAKTOWYCH

Terminem impaktyt określa się wszystkie typy skał utworzonych wskutek działania fal generowanych podczas zderzenia małych ciał Układu Słonecznego z innym ciałem kosmicznym (Stöffler, Grieve, 2007).

Impaktyty z krateru Gardnos można podzielić na następujące grupy (French i in., 1997):

- skały podłoża zdeformowane w wyniku uderzenia, ale nadal spoiste;
- brekcje lityczne, składające się ze spękanych skał i ich fragmentów, ale bez fragmentów stopu (np. brekcja z Gardnos);
- brekcje stopowe, zawierające zarówno składniki lityczne, jak i fragmenty stopu (np. suevit).

Pod względem makroskopowym brekcja z Gardnos jest masywną, koherentną skałą klastyczną; pęka ona w poprzek klastów (fig. 3A–D). Brekcja ta składa się ze źle wysortowanych, od ostrokrawędzistych do lekko obtoczonych klastów drobnokrystalicznego, białawego granitu i granitognejsu o wielkości od poniżej 1 mm do 20 cm. Większe klasty otacza matriks składający się z mniejszych fragmentów skalnych i drobniejszej, czarnej, wyraźnie węglistej materii. Brekcja nie jest jednolita pod względem teksturalnym.

Z obserwacji płytek cienkich brekcji z Gardnos wynika, że jest ona źle wysortowana i monomiktyczna. Fragmenty granitu oraz jego głównych składników (skaień potasowy, kwarc, plagioklaz), o wielkości od poniżej 20 μm do kilku centymetrów, tworzą do ok. 95% obj. skały. Pozostała część to bezpostaciowy czarny matriks. Klasty są na ogół ostrokrawędziste, czasami częściowo zaokrąglone. Często można

zaobserwować ich spękanie i czarne wypełnienie spękań. Minerale główne i akcesoryczne tworzące klasty mają na ogół wielkość 0,1–1,0 mm. Mniejsze klasty są monomineralne, a klasty kilkumilimetrowe – polikrystaliczne. Rzadkie składniki akcesoryczne to: biotyt, stilpnomelan, minerały nieprzezroczyste, tytanit i cyrkon.

Suevit (fig. 4A–C) to skała zbita, masywna, barwy od zielonoszarej do ciemnozielonej. Tkwią w nim nieregularne i wydłużone czarne fragmenty zrekrytalizowanego szkliwa o wielkości 1–2 cm, widoczne na świeżych i zwietrzałych powierzchniach. Te fragmenty na ogół występują w drobnoziarnistym zielonkawym matriksie.

Z obserwacji płytek cienkich suevitu wynika, że jest on polimiktyczną brekcją zawierającą fragmenty zrekrytalizowanego stopu z klastami skał i minerałów. Matriks jest jeszcze drobniejszą mieszaniną fragmentów skał i minerałów. Elementy większe od 1 mm stanowią zaledwie ok. 15% obj. skały. Fragmenty lityczne przeważają i są zróżnicowane. Wśród klastów litycznych przeważają skały granitowe, chociaż występują także amfibolity, kwarcyty i skały ultramaficzne. Zrekrytalizowane fragmenty szkliwa, o wielkości 1–10 mm, stanowią od poniżej 5 do ok. 10% obj. skały. Mają wyraźnie nieregularne kształty: wydłużone, ameboidalne albo spiralne i zazwyczaj tkwią w nich liczne mniejsze klasty mineralne (np. kwarc). W skali mikroskopowej w kryształach kwarcu można zaobserwować płaszczyzny deformacyjne (ang. *planar deformation features* – PDF; patrz: Kalleson i in., 2010).

UWAGI KOŃCOWE

Struktura Gardnos w Norwegii to zerodowany krater impaktowy, wypełniony zarówno impaktytami, jak i utworami poimpaktowymi. Następstwo stratygraficzne poszczególnych ogniw skalnych występujących na rozpatrywanym obszarze rozpoznano na podstawie badań otworu wiertniczego Branden wykonanego w środkowej części struktury. Wyróżniono dwa główne typy brekcji impaktowej. Brekcja z Gardnos jest autochtoniczną, masywną, koherentną skałą o złym wysortowaniu składników, zbudowaną z klastów litycznych – głównie granitów i granitognejsów, otoczonych przez matriks, który tworzą mniejsze fragmenty tych skał i bliżej niezidentyfikowana materia organiczna. Brekcja z Gardnos podściela suevit. Pod względem makroskopowym suevit jest zbitą, masywną skałą o ciemnej barwie. Zawiera materiał za-

równo związany z szokiem uderzeniowym, jak i niezmienny, tzn. fragmenty stopu i okruchy lityczne o zróżnicowanej wielkości. Zgodnie z wynikami analizy Kalleson i in. (2010), opartej na obserwacjach płaszczyzn deformacji w ziarnach kwarcu, maksymalne ciśnienie wywołane upadkiem meteorytu przekroczyło 20 GPa. Zróżnicowanie fragmentów stopu w suevicie pod względem kształtu, struktury i składu chemicznego jest związane z pierwotnym składem skał, które uległy zmianom w wyniku uderzenia, oraz ze stopniem stopienia. Lokalne stopienie poprzedzało zmieszanie pierwotnego materiału z klastycznym druzgotem impaktowym.

Podziękowania. Autorzy dziękują recenzentom manuskryptu, L. Natkaniec-Nowak i L. Marynowskiemu, za cenne uwagi i sugestie poprawek.

LITERATURA

- BROCH O.A., 1945 — Gardnosbreksjen i Hallingdal. *Norsk Geol. Tidsskr.*, **25**: 16–25.
- DONS J.A., NATERSTAD J., 1992 — The Gardnos impact structure, Norway. *Meteoritics*, **27**: 215.
- ELSILA J.E., LEON N.P. DE, PLOWS F.L., BUSECK P.R., ZARE R.N., 2005 — Extracts of impact breccia samples from Sudbury, Gardnos, and Ries impact craters and the effects of aggregation on C_{60} detection. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **60**, 11: 2891–2899.
- FRENCH B.M., KOEBERL C., GILMOUR I., SHIRLEY S.B., DONS J.A., NATERSTAD J., 1997 — The Gardnos impact structure, Norway. Petrology and geochemistry of target rocks and impactites. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **61**, 4: 873–904.
- GILMOUR I., FRENCH B.M., FRANCHI I.A., ABBOTT J.I., HOUGH R.M., NEWTON J., KOEBERL C., 2003 — Geochemistry of carbonaceous impactites from the Gardnos impact structure, Norway. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **67**, 20: 3889–3903.
- GODERIS S., KALLESON E., TAGLE R., DYPVIK H., SCHMITT R.-T., ERZINGER J., CLAEYS, P., 2009 — A non-magmatic iron projectile for the Gardnos impact event. *Chem. Geol.*, **258**, 3/4: 145–156.
- GRIER J.A., SWINDLE T.D., KRING D.A., MELOSH H.J., 1999 — Argon-40/argon-39 analyses of samples from the Gardnos impact structure, Norway. *Meteorit. Planet. Sci.*, **34**, 5: 803–808.
- KALLESON E., DYPVIK H., NATERSTAD J., 2008 — Post-impact sediments in the Gardnos impact structure, Norway. *W: The sedimentary record of meteorite impacts* (red. K. Evans i in.). *GSA Spec. Pap.*, **437**: 19–41.
- KALLESON E., CORFU F., DYPVIK H., 2009a — U-Pb systematics of zircon and titanite from the Gardnos impact structure, Norway: evidence for impact at 546 Ma? *Geochim. Cosmochim. Acta*, **73**, 10: 3077–3092.
- KALLESON E., JAHREN T., DYPVIK H., 2009b — Excursion guide to Gardnos meteorite crater. *33 ICG Excurs.*, **102** [[http://iugs.org/33igc/fileshare/filArkivRoot/coco/FieldGuides/No+102+Gardnos+field+guide\[1\].pdf](http://iugs.org/33igc/fileshare/filArkivRoot/coco/FieldGuides/No+102+Gardnos+field+guide[1].pdf)].
- KALLESON E., DYPVIK H., NILSEN O., 2010 — Melt-bearing impactites (suevite and impact melt rock) within the Gardnos structure, Norway. *Meteorit. Planet. Sci.*, **45**, 5: 798–827.
- STÖFFLER D., GRIEVE R.A.F., 2007 — Impactites. *W: Metamorphic rocks. A classification and glossary of terms* (red. D. Fettes, J. Desmons). Cambr. Univ. Press, Cambridge.

SUMMARY

The Gardnos structure is located in Norway, about 125 km from Oslo (Dons, Naterstad, 1992). This is an eroded impact crater, presently consisting of impactites and crater-infill sediments (Fig. 1A–B, 2). The structure is well seen in the outcrops of impact breccias and post-impact sediments, and it was explored by the Branden drilling core (Fig. 1C). The impact breccia is represented by two main types (French *et al.*, 1997). The origin of the structure was identified in the early 1990s, many issues regarding the crater formation and post-impact history being under investigation later on. The timing of the impact was constrained to between 400 and 900 Ma. Detailed studies on each type of the Gardnos lithologies have already been conducted over the last twenty years, leading to the final petrological and mineralogical characteristics (French *et al.*, 1997; Kalleson *et al.*, 2009a, b, 2010). The present paper deals with two main types of the rock structure, providing their presentation and characteristics. The autochthonous Gardnos breccia is a massive, coherent clastic rock which breaks through the clasts (Fig. 3). It consists of poorly sorted, slightly rounded clasts, mostly of finely crystalline granite or granite-gneiss. The breccia exhibits a monomictic character. The large clasts are sur-

rounded by the matrix composed of fine rock fragments and black organic matter. Main and accessory minerals are present in the clasts. Biotite, stilpnomelan, opaque minerals, titanite and zircon are accessory minerals. The Gardnos breccia is autochthonous and underlies the suevite (Fig. 1C).

Macroscopically, the suevite breccia is a compact, massive rock, green-grey to dark green in colour (Fig. 4A–C). It contains a mix of shocked and unshocked material, i.e. melt and lithic fragments of various sizes. On fresh and weathered surfaces, irregular or elongated black fragments of recrystallized glass, about 1 to 2 cm in size, are noticed, being surrounded by the fine-grained greenish matrix. According to Kalleson *et al.* (2010), based on planar deformation features in quartz grains, it may be deduced that the maximum shock pressures were above 20GPa. Melt occurs as individual fragments, varying in amounts up to 40% of the bulk rock. The melt fragments within the suevite exhibit various shapes, textures and chemical compositions, depending on the original target rock composition and degree of melting. That implies a fact of local melting prior to mixing with clastic impact debris.