



Przykłady współczesnego diapiryzmu związanego z eokambryjską formacją solonośną Ara w Omanie – miejsce rekomendowane dla przyszłych badań Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego

Examples of recent diapirism related to the Eocambrian Ara Salt Formation in Oman – site recommended for future study by the Polish Salt Mining Association

Krzysztof BUKOWSKI¹, Hubert KIERSNOWSKI²

¹ Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Polska; e-mail: buk@agh.edu.pl

² Państwowy Instytut Geologiczny - Państwowy Instytut Badawczy, ul. Rakowiecka 4, 00-975 Warszawa, Polska, e-mail: hubert.kiersnowski@pgi.gov.pl; hubert.kiersnowski@gmail.com

¹ AGH University of Science and Technology, Faculty of Geology, Geophysics and Environmental Protection, Av. Mickiewicza 30, 30-059 Cracow, Polska; e-mail: buk@agh.edu.pl

² The Polish Geological Institute - National Research Institute, Rakowiecka 4, 00-975 Warsaw, e-mail: hubert.kiersnowski@pgi.gov.pl; hubert.kiersnowski@gmail.com

Jeden z najgrubszych na świecie kompleksów soli kamiennych powstawał w okresie od późnego neoproterozoiku (ediacaru) do wczesnego kambru, czyli około 550 mln lat temu. W tym czasie, w okresie dawniej definiowanym jako eokambry będącym strefą przejściową między erą proterozoiczną a paleozoiczną, ewaporaty tworzyły się wzdłuż krawędzi superkontynentu Gondwany, w pobliżu ówczesnego równika (Warren, 2016). Obecnie sole tego wieku zostały rozpoznane na obszarze Iranu i Zatoki Perskiej (formacja Hormuz), Omanu i Kataru (formacja Ara), a także w Pakistanie (formacja Salt Range), północno-zachodnich Indiach (formacja Hanseran), ale także na Syberii (formacja Usolka) i w basenie Amadeus w Australii (Warren, 2016). Do najbardziej znanych wystąpień tych soli należą odsłaniające się na powierzchni wysady i lodowce solne w górach Zagros, zaliczone do formacji Hormuz, które były obiektem badań i obserwacji geologicznych przeprowadzonych podczas wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego do Iranu w 2018 roku (Bukowski, 2020).

Celem tego krótkiego artykułu jest przedstawienie stosunkowo mało znanego i do tej pory szerzej nie opisywanego

One of the world's thickest rock salt complexes was formed between the late Neoproterozoic (Ediacaran) and early Cambrian, i.e., about 550 million years ago. During the period formerly defined as the Eocambrian (a transition zone between the Proterozoic and Paleozoic eras), evaporites formed along the edge of the Gondwana supercontinent near the then equator (Warren, 2016). Currently, salts of this age have been recognized in Iran and the Persian Gulf (Hormuz Formation), Oman and Qatar (Ara Formation), as well as in Pakistan (Salt Range Formation), northwest India (Hanseran Formation), but also in Siberia (Usolka Formation) and the Amadeus Basin in Australia (Warren, 2016). The most famous occurrences of these salts are exposed as diapirs, and salt glaciers in the Zagros Mountains, included in the Hormuz Formation, which were the subject of geological research and observations carried out during the Polish Salt Mining Association's expedition to Iran in 2018 (Bukowski, 2020).

The purpose of this short paper is to present the relatively little known and, so far, not described in the Polish geological literature, the Al-Hajar Mountains region and

go w polskiej literaturze geologicznej rejonu gór Al-Hadžar oraz wschodniej części pustyni Ar-Rab al-Chali w Omanie. Współcześnie na powierzchni można tam obserwować wierzchołki diapirów solnych należące do eokambryjskiej formacji solonośnej Ara. Wysady te często mają skomplikowaną budowę wewnętrzną i zawierają wyniesione na powierzchnię fragmenty głębokiego podłoża oraz skał przewarstwiających kompleksy solne. Prowadzone wiosną 2022 roku obserwacje terenowe w tym rejonie, mogą być zdaniem autorów pomocne w przygotowaniu w przyszłości kolejnej wyprawy Polskiego Stowarzyszenia Górnictwa Solnego w celu kontynuowania badań złóż soli w Omanie.

Formacja Ara jest węglanowo - ewaporatową sekwencją zawierającą bardzo grube osady soli kamiennej dochodzących do 1000 metrów miąższości (Polasstro, 1999) oraz bardzo miąższe do nawet 150 m przewarstwienia skał węglanowych (Reuning 2009). Osady ewaporatowe powstawały w paleogeograficznie ograniczonych basenach sedymentacyjnych, podczas okresów relatywnie niskiego poziomu wód. W tych warunkach dochodziło do rozwarstwienia gęstościowego (stratyfikacji) solanki z okresowymi warunkami beztlenowymi w głębszych częściach, sprzyjającymi tworzeniu sedymentacji osadów bogatych w materię organiczną w obrębie utworów solnych. Osady te w formie przewarstwień w obrębie soli (ang. *stringers*) są często skałą macierzystą dla bogatych złóż ropy naftowej w tym rejonie (Polasstro, 1999). Współcześnie można je obserwować na powierzchni w strefie wychodni diapirów, gdzie w czapach wysadów tworzą pokrywy brekcji lub występują w postaci dużych wyciągniętych na powierzchnię wznoszących się ku górze „ławic” (ang. *rafts*) skał węglanowych. W niektórych wysadach skala tego zjawiska jest tak znaczna, że zostały nazwane górami (Jebel Mayjayiz).

W Omanie osady formacji Ara występują głównie w trzech basenach, z których dwa są zlokalizowane w centralnej części interioru (Ghaba Salt Basin, Fahud Salt Basin) oraz w trzeci największy zlokalizowany w południowej części kraju (South Oman Salt Basin).

Sześć wyłaniających się na powierzchni kopuł wysadów solnych jest rozrzuconych na pustynnych równinach środkowego Omanu w basenie solnym Ghaba (Ryc. 1). Wysady te po raz pierwszy zostały rozpoznane na zdjęciach lotniczych na początku lat 50-tych XX wieku. Później podczas poszukiwań ropy naftowej w tym rejonie, zostały one również badaniami terenowymi (Peters i in., 2003). Badania grawimetryczne wykazały, że w tym rejonie znajduje się jeszcze kilka innych struktur solnych nieprzebijających powierzchni, niektóre w formie poduszek solnych, kropli solnych oderwanych od podstawy diapiru, lub pionowych słupów solnych o wysokości do 9 km od jej pierwotnego położenia (Searle, 2019).

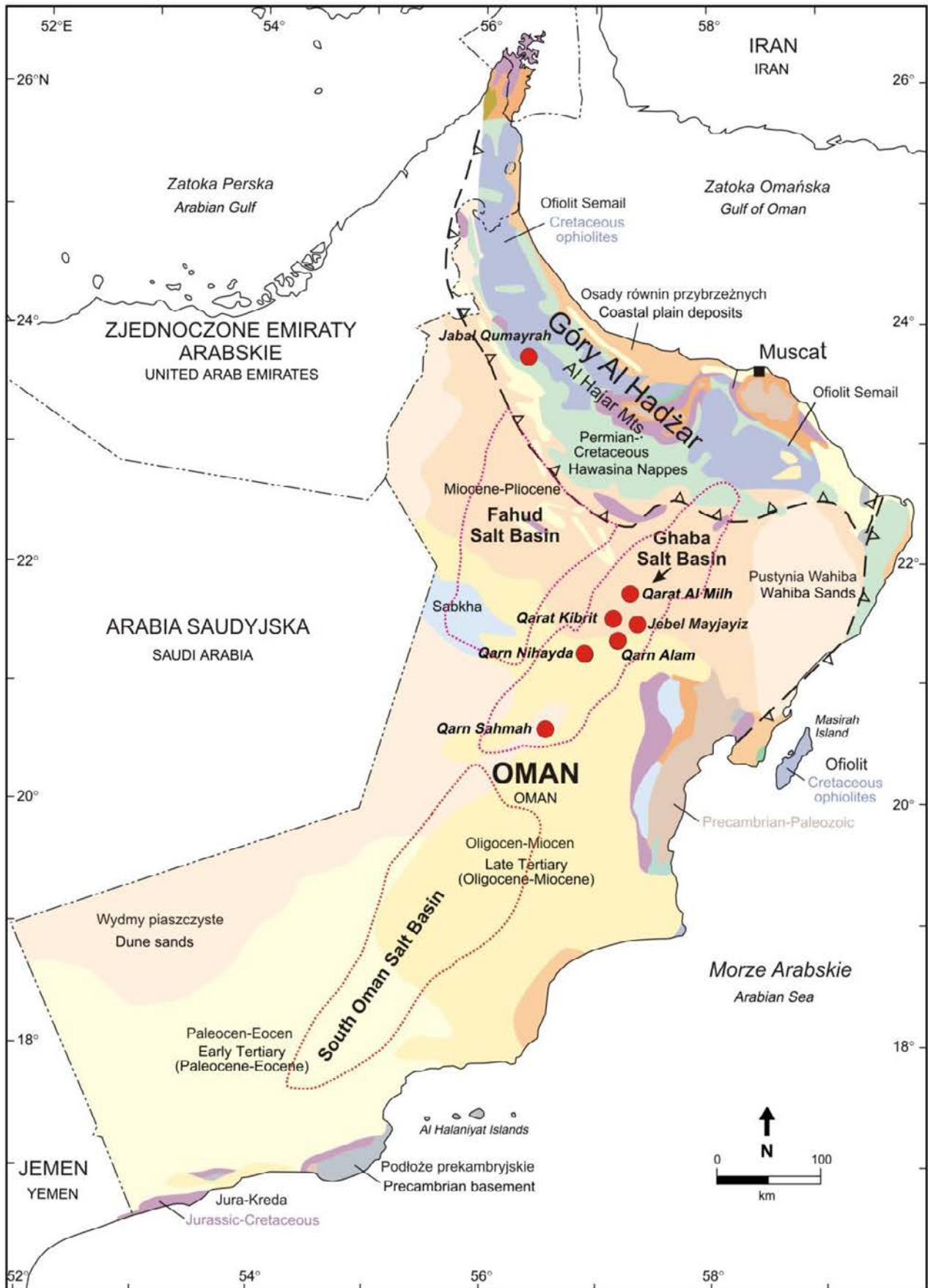
Podczas geologicznych badań powierzchniowych udało się dotrzeć do czterech z wysadów odsłaniających się na po-

the eastern part of the Ar-Rab al-Khali desert in Oman. Today, on the surface, one can observe the tops of salt diapirs belonging to the Eocambrian Ara Formation. These diapirs often have a complicated internal structure and contain elevated fragments of deep bedrock and rocks layering the salt complexes at the surface. The author's field observations in this area, conducted in the spring of 2022, may be helpful in the preparation of the next expedition of the Polish Salt Mining Association to continue research on salt deposits in Oman.

The Ara Formation is a carbonate-evaporite sequence containing very thick rock salt deposits reaching up to 1,000 meters in thickness (Polasstro, 1999) and very thicker, up to 150 m interlayer of carbonate rocks (Reuning 2009). These evaporative sediments were formed in restricted sedimentary basins during relatively low water levels. Under these conditions, density stratification of the brine occurred with periodic anaerobic conditions in the deeper parts, promoting the formation of sedimentation of organic matter-rich sediments within the salt formations. These sediments, in the form of stratified deposits within the salt (*stringers*), are often the source rock for the rich oil deposits in this area (Polasstro, 1999). Nowadays, they can be observed on the surface in salt dome outcrops, where they form breccia covers in the cap rock or the form of large carbonate rocks rising upwards to the surface. In some highlands, the scale of this phenomenon is so great that they have been called mountains (Jebel Mayjayiz). In Oman, Ara Formation sediments occur mainly in three basins, two of which are located in the central interior (Ghaba Salt Basin, Fahud Salt Basin) and the third largest is located in the southern part of the country (South Oman Salt Basin).

Six emerging salt domes are scattered across the desert plains of central Oman in the Ghaba salt basin (Fig. 1). These salt diapirs were first recognized in aerial photographs in the early 1950s. Later, during oil exploration in the area, they were also surveyed in the field (Peters et al., 2003). Gravitometric studies have shown that there are several other non-surface-piercing salt structures in the area, some in the form of salt pillows, salt droplets detached from the base of the diapir, or vertical salt columns up to 9 km from their original position (Searle, 2019).

During geological surface surveys, four exposed salt domes have been reached: Qarat Kibrit, Qarn Alam, Jebel Mayjayiz and Qarat al-Milh. They are relatively small diapirs. One of the smallest is Qarat al-Kibrit (Arabic sulfur), a 700m x 500m diapir forming an elevation of up to 30m above the flat area of the Ghaba Basin and containing small exposures of rock salt (Fig. 2 A-C). The largest is Jebel Mayjayiz (3km x 1.5km), which forms hills over 60 meters high, formed by an accumulation of blocks and stringers, some of which contain visible stromatolite structures (Reun-



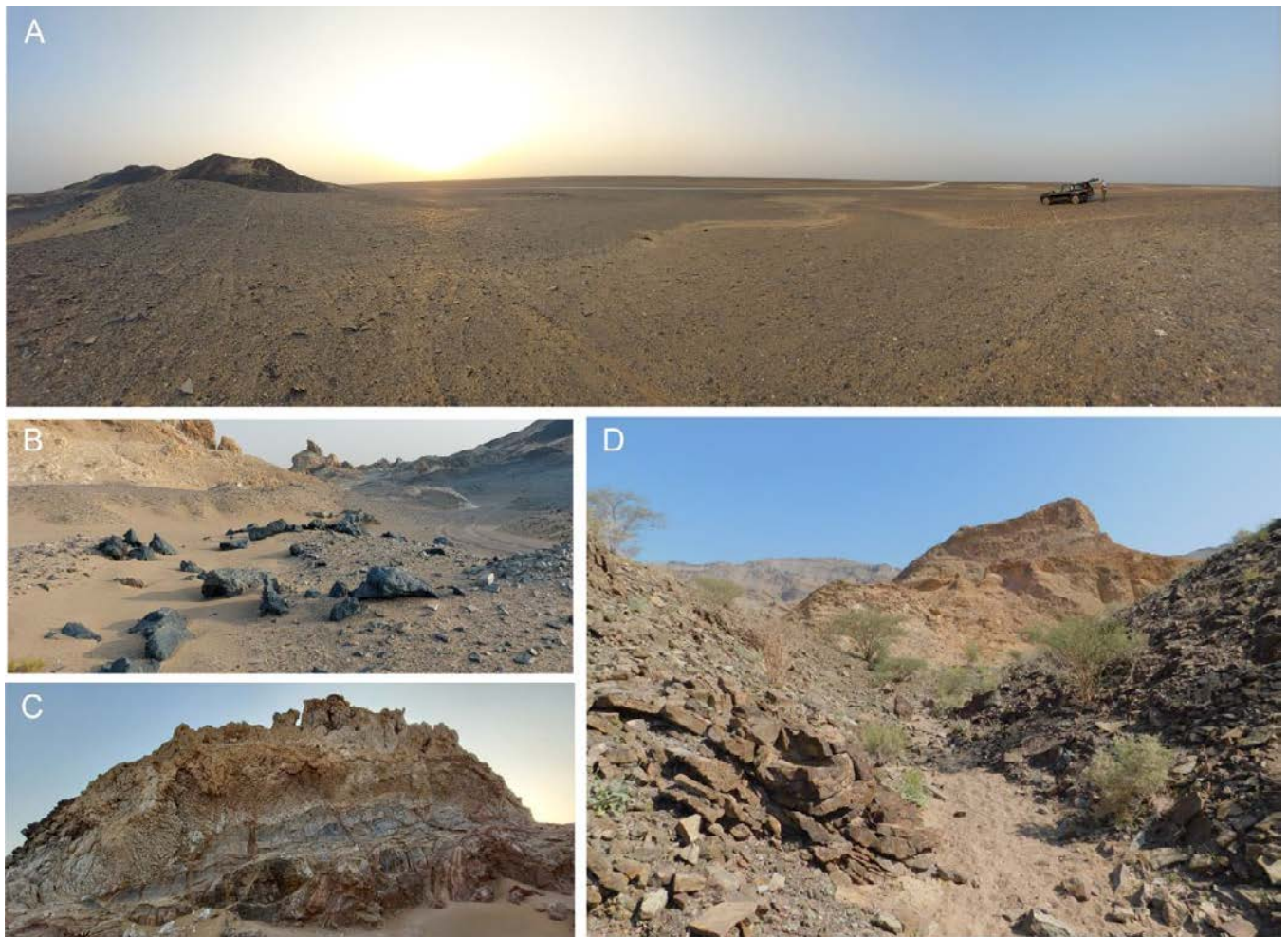
Ryc. 1. Uproszczona mapa geologiczna Omanu z zaznaczoną lokalizacją wysadów soli na powierzchni oraz zasięgami basenów solonośnych formacji Ara (wg Peters i in., 2003; Reuning i in., 2009, zmieniona).

Fig. 1. A simplified geological map of Oman with the marked location of the salt domes on the surface and the ranges of the Ara salt basins (according to Peters et al., 2003; Reuning et al., 2009, revised).

wierzchni: Qarat Kibrit, Qarn Alam, Jebel Mayjayiz i Qarat al-Milh. Są to stosunkowo niewielkie diapiry. Jednym z mniejszych jest z Qarat Kibrit (*kibrit* arab. siarka) diapir o wymiarach 700m x 500m tworzący wzniesienie do 30 m wznoszące się ponad płaskim obszaru basenu Ghaba i zawierający niewielkie odsłonięcia soli formacji Ara (Ryc. 2 A-C). Największy jest Jebel Mayjayiz (3km x 1,5km), który tworzy wzgórze o wysokości ponad 60 metrów powstałe z nagromadzenia bloków i ławic wapieni (*stringers*), z których niektóre zawierają widoczne struktury stromatolitowe (Reuning i in., 2009). Większość występujących na powierzchni wysadów solnych wykazuje wyraźne ślady intensywnego rozpuszczania soli. Sugeruje to,

ing et al., 2009). Most of the salt domes on the surface show clear traces of intense salt dissolution. It suggests that at the time of their greater activity, their size and abundance were much more significant than today. As a result of the constant dissolution of salt on the surface, the proportion of insoluble rocks increased.

In the northern part of Oman, in the Al-Hajar Mountains, another surface diapir named Jabal Qumayrah (Lisail) was discovered relatively recently (Copper et al., 2013). Located in the inaccessible mountains north of Qumayrah, it is an example of allochthonous salts squeezed out by tectonic processes during the sliding and folding of Mesozoic rocks in



Ryc. 2. Wysady solne formacji Ara w Omanie. A- wysad soli Qarat Kibrit tworzy wzgórze o łagodnych zboczach. Czwartorzędowe stożki aluwialne na zboczach wysadu są lekko nachylone co wskazuje na ostatnią fazę wznoszenia się wysadu; B – proces rozpuszczania soli stopniowo pogłębia depresję w centrum wysadu Qarat Kibrit i jest wzmacniany drenażem wody kierowanej od brzegów do centrum wysadu podczas sporadycznych opadów. Na pierwszym planie widoczne bloki czarnych, laminowanych wapieni, egzotyków, pochodzących z formacji Ara (tzw. stringers); C – wychodnia białych, szarych i różowych, pasiastych, soli formacji Ara przykrytych skrasowiałą powierzchnią skał gipsowo-anhydrytowo-klastycznych (czapa wysadu), Qarat Kibrit.; D – wysad solny Jabal Qumayrah (Lisail) w centrum. Jasno-kremowy masyw wysadu zbudowany głównie ze skał gipsowo-anhydrytowych wyraźnie odcinający się na tle ciemnoszarych wapieni kredowych.

Fig. 2. Ara salt domes in Oman. A- the Qarat Kibrit salt dome forms a hill with gentle slopes. Quaternary alluvial fans on the slopes of the dome are slightly sloping, which indicates the last ascent phase of the diapir's history; B – the process of salt dissolution gradually deepens the depression in the centre of the outcrop of Qarat Kibrit, reinforced by the inflow of meteoric water diverted from the banks to the centre during sporadic rainfall. In the foreground are blocks of black laminated limestone exotics from the Ara Formation (*stringers*); C – an outcrop of banded white, grey and pink Ara salts covered by a fractured layer of gypsum-anhydrite-clastic rocks (*cap rock*), Qarat Kibrit; D – Jabal Qumayrah (Lisail) salt dome in the centre. Light cream-coloured massif mainly of gypsum-anhydrite rocks stands out against the dark grey Cretaceous limestones.

że w czasie ich największej aktywności zarówno ich wielkość jak i rozpowszechnienie było znacznie większe niż obecnie, a także w wyniku stałego rozpuszczania soli na powierzchni, wzrastał wyraźnie udział skał nierozpuszczalnych.

W północnej części Omanu w górach Al-Hadžar stosunkowo niedawno (Copper i in., 2013) został odkryty jeszcze jeden wysad na powierzchni nazwany Jabal Qumayrah (Lisail). Zlokalizowany jest on w stosunkowo trudno dostępnych górach na północ od miejscowości Qumayrah stanowi przykład allochtonicznych soli wyciśniętych w procesie tektonicznym w trakcie nasuwania i fałdowania skał mezozoicznych w brzeżnej strefie nasunięcia ofiolitu Semail. Obecnie na powierzchni zachowała się głównie czapa wysadu składająca się ze skał gipsowo-anhydrytowych i wapieni z przewarstwieniami piaskowców i mułowców pochodzących z porwaków skał w obrębie soli (Ryc. 2D). W obrębie wysadu nie stwierdzono powierzchniowych odsłoneń samej soli kamiennej. W pobliżu wysadu występują jeszcze szereg mniejszych odsłoneń skał ewaporatowych oraz słone źródła, od których pochodzi nazwa doliny Wadi Milh (arab. sól). Obecnie jedno z nich jest ciągle czynne, a wykonana analiza chemiczna wypływającej solanki wykazała zasolenie 25 g/l (zbliżone do zasolenia wody morskiej). W tym rejonie występują również niewielkie wystąpienia siarki rodzimej.

Słowa kluczowe: formacja solonośna Ara, Oman, góry Al.-Hadżar, wysady solne

the marginal zone of the Semail ophiolite nappe. The surface mainly preserves a cap rock consisting of gypsum-anhydrite rocks and limestone with interbeds of sandstone and siltstone as xenoliths within the salt (Fig. 2D). No surface exposures of rock salt were found within the salt dome. Several smaller outcrops of evaporite rocks are still in the vicinity, and the salt springs gave the valley its name, Wadi Milh (Arabic - salt). One of them is still active, and chemical analysis of the outflowing brine showed a salinity of 25 g/l (close to that of seawater). There are also minor occurrences of native sulfur in the area.

Key words: Ara salt formation, Oman, Al.-Hadżar Mountains, salt domes.

LITERATURA/REFERENCES

- BUKOWSKI K. 2020. Procesy geomorfologiczne na wybranych wysadach soli w pasie fałdowo-nasuwczym gór Zagros w Iranie. *Przegląd Geologiczny*, 68, 3: 167–177.
- COOPER D.J.W., SEARLE M.P., ALI M.Y. 2013. Salt intrusions in Jabal Qumayrah, northern Oman Mountains: implications from structural and gravity investigations. *GeoArabia* 18:141 – 176.
- PETERS J.M., FILBRANDT J.B., GROTZINGER J.P., NEWALL M.J., SHUSTER M.W., AL-SIYABI H.A. 2003. Surface-piercing salt domes of interior North Oman and their significance for the Ara carbonate “stringer” hydrocarbon play. *GeoArabia*, 8:231 – 270.
- Pollastro R.M. 1999. Ghaba Salt Basin Province and Fahud Salt Basin Province, Oman -- Geological Overview and Total Petroleum Systems. U.S. Geological Survey Open-File Report 99-50-D.
- REUNING L., SCHOENHERR J., HEIMANN A., URAI J.L., LITTKER R., KUKLA P.Z. RAWAHI Z. 2009. Constraints on the diagenesis, stratigraphy, and internal dynamics of the surface-piercing salt domes in the Ghaba Salt Basin (Oman): A comparison to the Ara Group in the South Oman Salt Basin. *GeoArabia*, 14, 3: 83-120.
- Searle M. 2019. Geology of the Oman Mountains, Eastern Arabia. Springer International Publishing.
- Warren J.K. 2016. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.