

GENEZA WYSADÓW SOLNYCH – EWOLUCJA POGLĄDÓW

UKD 551.247.001.5

Osiemdziesiąt lat temu po raz pierwszy przedstawiono dwie hipotezy powstawania wysadów solnych: autonomiczną (grawitacyjną) i tektoniczną. Po odrzuceniu starszych poglądów obie koncepcje udoskonalały się, aż do wytworzenia klasycznych pojęć halokinezy i halotektoniki. W nowoczesnym ujęciu terminy te oznaczają jedynie fragmenty realnych zjawisk. Autor przedstawia dzieje tej dyskusji w nadziei, że pozwoli to na lepsze zrozumienie obecnych poglądów, tak niezbędne w Polsce, w której tektonika solna dotknęła, w różnym stopniu, 60% obszaru kraju. Artykuł ten powstał na marginesie pracy nad rozprawą doktorską przygotowaną pod opieką profesora Jerzego Znoski.

PRZEGLĄD HIPOTEZ

Diapirowy charakter struktur solnych poznano po raz pierwszy w Algierii. Francuski inżynier górniczy L. Ville w 1856 roku opisał strukturę solną Rang el Melach (Góra Solna); zauważył on „erupcyjny i podobny do gejzeru” charakter tej struktury (42). Pierwsze wysady solne w Europie stwierdził w Siedmiogrodzie F. Posepny (31), a w roku 1915 L. Mrzecz (25) wprowadził termin diapir dla rumuńskich struktur solnych.

W roku 1910 R. Lachmann wypowiedział się o „autoplastyczności soli” (18). W roku 1911 H. Stille za przyczynę powstania wysadów uznał tangencjalne naciski tektoniczne (36), choć już w roku 1892 sugerowano, że wysady są fałdami (*vide* 9). W roku 1911 E. Harbort (13) stwierdził, że sól pod ciężarem nadkładu wciska się

w niego w miejscach osłabienia. W roku 1912 szwedzki fizyk S. Arrhenius uznał za przyczynę powstania wysadów mniejszą gęstość soli niż warstw nadległych (2, 3).

Był to początek „najbardziej gorącej kontrowersji w historii całej geologii”* (28). W dyskusji udział brali: K. Andree (1), D.C. Barton (4), E. De Golyer (8), E. Harbort (13), R. Lachmann (18–21), L.L. Nettleton (26), G.S. Rogers (33), H. Stille (36–39) i P. Woldstedt (45).

Koniec drugiej dekady XX w. przyniósł schyłek licznych starych teorii powstawania wysadów, mających obecnie tylko historyczne znaczenie, jak wzrost wysadów w wyniku działania ciśnienia gazu, sił krystalizacji czy wulkanizmu (*vide* 9). Dyskusja zwolenników hipotez grawitacyjnej i tektonicznej, zapoczątkowana w latach 1910–1912, jest żywa do dziś.

H. Stille (38) stwierdził że: te same siły tektoniczne, które powodowały ruch soli, działały na skały otaczające struktury solne wykazując związek przestrzenny i czasowy z tektoniką saksońską; a zatem struktury solne powstały w wyniku działania nacisków tektonicznych.

Zwolennicy hipotez grawitacyjnych zwracali uwagę na różnice w gęstości soli i skał otaczających, dużą mobilność soli. Odpowiednio więc pisano o pływalności (*buoyancy*), izostazji, modelu fluidalnym (sól zachowująca się jak ciecz). D.C. Barton (4) w modelu izostatycznym (*isostatic downbuilding*) zakładał, że sól podnosi się względem obniżających się dokoła osadów, tak że wysokość

* Oczywiście dyskusja wokół tektoniki kier miała znacznie wyższą temperaturę, o czym jeszcze nie wiedział H. Ode.

bezwzględna siłowa struktury solnej jest stała. Równoległość sfałdowanych warstw soli wewnątrz wysadu do jego granic, po raz pierwszy opisana przez F.E. Vaughana (43), była także ważkim argumentem na rzecz autonomicznego ruchu soli.

Klasyczne, przynajmniej w Europie, pojęcia tektoniki solnej powstały w Niemczech. Od czasów prac H. Stillega (36–39), Dolną Saksonię uznano za typowy obszar występowania wysadów o genezie tektonicznej. Pogląd ten dominował przez niemal pół wieku aż do roku 1957, w którym ukazało się klasyczne studium F. Trusheima (40), bardziej znane w wersji angielskiej (41). F. Trusheim podzielił tektonikę solną na halokinezę, tj. autonomiczny ruch soli pod wpływem grawitacji i halotektonikę – ruch soli wywołany siłami tektonicznymi. Halokineza rozpoczyna się po osadzeniu warstw soli i nadkładu o dostatecznej miąższości. Krytyczna głębokość uruchomienia soli zależy od sumarycznej grubości soli w serii solnej, miąższości poszczególnych warstw soli, litologii soli i nadkładu oraz temperatury.

Migracja soli tworzy coraz to bardziej rozbudowane ciała solne od poduszki do diapiru i wywołuje redukcje warstw soli między strukturami. Halokineza powoduje powstanie wielu struktur w nadkładzie: pierwotnych i wtórnych niecek brzeżnych oraz struktur żółwiowych między wysadami. Rozwój struktur solnych odbywa się w trzech stadiach: poduszkowym, diapirowym i późno-diapirowym. Historia wzrostu kopuły solnej zaznacza się lokalnymi nieciągłościami i zmianami facji nad wyniesieniem na szczycie wysadu. W Polsce te klasyczne poglądy spopularyzowali R. Dadlez i S. Marek (6), S. Marek i J. Znosko (22), J. Poborski (30 i in.), J. Sokołowski (34) oraz J. Sokołowski i A. Tokarski (35).

Wielkie znaczenie miały badania modelowe i rozważania teoretyczne. Pierwsze próby modelowania były niezgodne z warunkami powstawania prawdziwych wysadów (*vide* 27). I tak B.G. Escher i P.H. Kuenen (10) przykryli materiały symulujące sól płytą z otworem. Nacisk na płytę powodował wciskanie się materiału w otwór, co miało prowadzić do diapiryzmu. L.L. Nettleton (26) używał cieczy do wytworzenia „sztucznych wysadów”. Z czasem eksperymenty były coraz bardziej wiarygodne (np. 29). Tym niemniej, niezależnie od stopnia ich wiarygodności, wyniki badań wykorzystano dla poparcia hipotez grawitacyjnych. Badania mechaniczne i fizyczne (16, 28) pokazały odmienne od innych skał własności soli, co również wskazywało na autonomiczny ruch soli.

Zamknięciem i podsumowaniem drugiego etapu badań tektoniki solnej, który rozpoczął się sformułowaniem podstawowych tez w latach 1910–1912, i wiązał się z poszukiwaniami węglowodorów towarzyszących złożom soli, były konferencje: Saline Deposits (23) i Diapirism and Diapirs (5).

Nowy etap w rozwoju badań złóż soli jest związany z ekspansją technologii jądrowej. Istnieje wielka społeczna potrzeba budowy bezpiecznych składowisk odpadów promieniotwórczych. Wysady od czasów raportu W.B. Heroya (14) są rozważane jako dogodne miejsca składowisk odpadów radioaktywnych. F. Gera (12) podsumował dotychczas wiadomości na temat tektoniki złóż soli pod kątem stabilności złóż. Za główną przyczynę ruchów soli uznał on siłę ciężkości działającą na mobilną sól. Omówił konieczną – dla zapoczątkowania ruchu – miąższość soli i nadkładu, wpływu temperatury oraz współczesne ruchy diapirów.

Współcześnie większość badaczy skłania się ku po-

glądowi, że w przyrodzie ma miejsce zarówno mechanizm tektonicznego, jak i grawitacyjnego powstawania wysadów. Dokładne rozróżnienie tych procesów w poszczególnych regionach jest jednak nadal w większości przedmiotem kontrowersji, nawet w klasycznych obszarach badań nad wysadami. I tak np. w roku 1955 T.J. Parker i A.N. McDowell (29) pisali, że powszechnie uważa się niemieckie i rumuńskie wysady za spowodowane siłami fałdowymi, a wysady w Zatoce Meksykańskiej i Iranie wywołane kontrastem gęstości.

Hipoteza halokinezy *sensu stricto* miała wielu przeciwników. Już w roku 1957 J. Znosko wykazał – na przykładzie wysadu kłodawskiego – współudział sił tektonicznych w formowaniu struktur solnych (46). W Niemczech poglądy F. Trusheima napotkały na krytykę R. Meinholda (24), który również uważał, że ruchy soli są zapoczątkowane przez impuls epejrogeniczny i mają charakter tektoniczno-grawitacyjny. W Polsce właśnie poglądy R. Meinholda zyskały największe uznanie. Uważa się tu powszechnie, że wzrost struktur solnych był zainicjowany przez pionowe ruchy bloków podłoża (7).

Za najbardziej typowe współczesne poglądy można uznać prace B.C. Koniszczewa (17) i M.P.A. Jacksona i C.J. Talbota (15). B.C. Koniszczev (17) uważa, że na obszarach platformowych wzrost struktur solnych był wywołany głównie ruchami bloków podłoża. Struktury solne pierwszego rzędu są więc halotektoniczne. Dopiero ich powstanie mogło wywołać wtórny halokinetyczny *sensu stricto* wzrost następnych kopuł. Szczególnie w tych rejonach, gdzie w podłożu występują ryfty kontynentalne, wyraźna jest linijność wielkich struktur solnych, jak wały, grzbiety czy mury solne oraz ich związek z zarysami rowów i głębokimi rozłami w podłożu.

M.P.A. Jackson i C.J. Talbot (15) wyróżnili sześć typowych mechanizmów tektoniki solnej: cztery przypadki w których halokineza jest wywołana przez: wyporność soli, nierównomierne obciążenie soli nadkładem, grawitacyjne rozpyływanie się soli (jak w lodowcach solnych w Iranie), konwekcję termiczną, i dwa przypadki halotektoniki wywołanej kontrakcją i ekstensją.

Wszystkie procesy charakteryzują oni zmianami energii potencjalnej (wzrost lub spadek) i reżimem tektonicznym (kompresja lub tensja). Tak więc klasyczne procesy trusheimowskie – „halokineza” i „halotektonika” – są szczególnymi przypadkami w tym schemacie. „Czysta” halokineza jest określona stabilnością tektoniczną i spadkiem energii potencjalnej, która zamienia się w kinetyczną, tj. we wzrost diapiru, natomiast trusheimowska halotektonika jest określona kompresją i wzrostem energii potencjalnej (15).

W dziedzinie badań teoretyczno-eksperymentalnych nastąpił również znaczny postęp. Modelowanie struktur solnych za pomocą wirówki rozwijane przez H. Ramberga** (32) i jego szkołę dało wiarygodną metodę badawczą zwolennikom hipotezy grawitacyjnej. Wirówka dająca przyspieszenie do 4000 g pozwalała dobrze symulować warunki zbliżone do naturalnych: W eksperymentach używa się specjalnych substancji o odpowiednio dobranych właściwościach (gęstość, lepkość). Model przygotowuje się z kolorowych warstw, następnie poddaje się wirowaniu. Potem tnie się go, otrzymując naturalne mapy

** Warto pamiętać, że jako jeden z pierwszych zastosował eksperyment w geologii M. Smoluchowski, z którego wyników korzystał m.in. H. Ramberg. Ramberg zaproponował też, aby jedną z zależności nazwać liczbą Smoluchowskiego.

lub przekroje. Inne nowe narzędzie badawcze, używane dla analizy problemu genezy struktur, to modelowanie matematyczne metodą elementów skończonych (11). Coraz większą uwagę zwraca się też na rolę wody w deformacji soli (42).

PODSUMOWANIE

W pierwszym etapie badań struktur solnych stwierdzono ich wysadowy charakter. Wtedy powstały pierwsze teorie wyjaśniające ten fenomen.

Drugi etap to dokładny opis właściwości struktur solnych i na tej podstawie sformułowanie klasycznych teorii halokinezy i halotektoniki.

Etap trzeci to współczesne teorie wyjaśniające genezę wzrostu struktur solnych. Terminy trusheimowskie skrytykowano gdyż: 1) halokineza to etymologicznie każdy ruch soli, 2) halotektonika według pierwotnej definicji jest wywołana tylko kontrakcją basenu i 3) terminy te nie pozwalają na precyzyjną i całkowitą klasyfikację ruchów soli.

Niemniej terminy te weszły chyba na zawsze do użytku i są powszechnie stosowane w szerokim, choć nie zawsze precyzyjnym ujęciu. Warto jednak pamiętać, co oznaczały początkowo, a jak rozumie się je obecnie.

LITERATURA

1. Andree K. — Zent. Min. Geol. Palaont., 1911 s. 698–701.
2. Arrhenius S. — Meddelanden Vetenskapsakademien Nobelinstitut, 1912 s. 1–25.
3. Arrhenius S., Lachmann R. — Geol. Rundschau, 1912 s. 139–157.
4. Barton D.C. — Bull. AAPG, 1933 vol. 17 s. 1025–1083.
5. Braunstein J., O'Brien G.D. — AAPG Mem., 1968 vol. 8 s. 1–444.
6. Dadlez R., Marek S. — Kwart. Geol., 1969 t. 13 nr 3 s. 543–565.
7. Dadlez R., Marek S. — [W:] W. Pożaryski (red.) Budowa Geologiczna Polski. 1974 T. 4 cz. 1 s. 239–250.
8. De Golyer E. — Am. Inst. Mining Engineers Bull., 1918 vol. 137 s. 987–1000.
9. De Golyer E. — AAPG Bull., 1925 vol. 9 s. 831–874.
10. Escher B.G., Kuenen P.H. — Leidsche Geol. Mededeelingen, 1929 s. 151–182.
11. Fletcher R.C. — Am. J. Sci., 1972 vol. 272 s. 197–216.
12. Gera F. — Bull. GSA, 1972 vol. 83 s. 3551–3574.
13. Harbort E. — Mn. Deut. Geol. Ges., 1911 vol. 63 s. 267–276.
14. Heroy W.B. — Nat. Acc. Sci., 1957 nr 519 s. 108–142.
15. Jackson M.P.A., Talbot C.J. — Bull. GSA, 1986 vol. 97 s. 305–323.
16. Joffe A., Lewitsky M.A. — Zeit. Physik, 1925 vol. 31 s. 576–583.
17. Koniszczew B.C. — Srawnitelna tektonika oblastej galokineza drevnich platform. Nauka, 1984.
18. Lachmann R. — Mn. Zeit. Deut. Geol. Ges., 1910 vol. 62 s. 113–116.
19. Lachmann R. — Ibidem, s. 597–601.
20. Lachmann R. — Zentralbl. Min. Geol. Palaont., 1912 s. 745–757.

21. Lachmann R. — Ibidem, 1917 s. 414–426.
22. Marek S., Znosko J. — Kwart. Geol., 1972 t. 16 nr 2 s. 1–18, 232–248.
23. Mattox R.B. (ed.) — GSA Spec. Pap., 1968 vol. 88 s. 1–701.
24. Meinhold R. — Ber. Geol. Ges. DDR, 1959 Reihe A s. 157–168.
25. Marzec L. — Inst. Geol. Romaniei, Comptes Rendues, 1915 vol. 6 s. 226–270.
26. Nettleton L.L. — Bull. AAPG, 1934 vol. 18 s. 1175–1204.
27. Nettleton L.L. — Ibidem, 1955 vol. 39 s. 2373–2383.
28. Ode H. — GSA Spec. Pap., 1968 vol. 88 s. 543–595.
29. Parker T.J., McDowell A.N. — Bull. AAPG, 1955 vol. 39 s. 2384–2471.
30. Poborski J. — Pr. Inst. Geol., 1960 vol. 30 s. 355–376.
31. Posepny F. — Jb. Kaiser-Konig, Geol. Reichst., 1867 vol. 17 s. 123–186.
32. Ramberg H. — Gravity, deformation and the earth's crust. Academic Press, 1981.
33. Rogers G.S. — Econ. Geol., 1918 vol. 13 s. 447–485.
34. Sokołowski J. — Pr. Inst. Geol., vol. 50 s. 1–112.
35. Sokołowski J., Tokarski A. — Prz. Geol., 1983 nr 5 s. 318–322.
36. Stille H. — Zeit. Prakt. Geol., 1911 vol. 19 s. 91–99.
37. Stille H. — Kali, 1911 vol. 5 s. 341–348.
38. Stille H. — Bull. AAPG, 1925 vol. 9 s. 417–441.
39. Stille H. — Ibidem, 1932 vol. 16 s. 169–177.
40. Trusheim F. — Zeit. Deut. Geol. Ges., 1957 vol. 109 s. 111–151.
41. Trusheim F. — Bull. AAPG, 1960 vol. 44 s. 1519–1540.
42. Urai J.L. i in. — Nature, 1986 vol. 324 s. 554–557.
43. Vaughan F.E. — AAPG Bull., 1925 vol. 9 s. 756–797.
44. Ville L. — Ann. Mines, 1856 vol. 15 s. 351–410.
45. Woldstedt P. — N. Jb. Miner., 1927 vol. 58B s. 579–614.
46. Znosko J. — Kwart. Geol., 1957 vol. 1 s. 90–105.

SUMMARY

Since the discovery of the structure of diapiric salt bodies there has been much speculation about the phenomenon origin. The domes were of volcanic origin, or were uplifted by forces of crystallization or due to gas pressure, etc.

In 1910–1912 S. Arrhenius and R. Lachmann suggested gravity theory and H. Stille suggested tectonic theory. Thus began one of the most heated controversies in the entire history of geology, as H. Ode wrote. The hypothesis of autoplaticity, ekzeme, buoyancy or isostatic downbuilding was based on the lower density of salt than that of the overlying strata and the prominent mobility of salt. In the hypothesis of H. Stille salt structures were produced by the tangential compressive pressure or the Saxonian tectonics.

In 1957 F. Trusheim coined halokinesis and halotek-

tonics terms and gave the classical definition of the process. Trusheim's concepts and terminology strongly simplified the nature and many geologists made attempts to give the modern and adequate solution.

Now, the salt tectonics is classified by M.P.K. Jackson and C.J. Talbot on the basis of charge of gravity potential energy and the tectonic regime, so halokinesis and halotectonics sensu F. Trusheim are restricted only to the limited conditions: halokinesis — absence of strain, and halotectonics — only contraction. But the both terms are still in use in the less precisely and broad sense.

Translated by the author

Р Е З Ю М Е

С момента открытия диапирового характера солевых структур возникло много гипотез по их генезису. Солевые куполы имели вулканический генезис, образовались силой кристаллизации или давления газа итп.

В период 1910—1912 С. Аррениус и Р. Ляхманн разработали гравитационную теорию, а Х. Стилле — тектоническую. Таким образом, как это написал Х. Оде, началось самое горячее разногласие в истории геологии. Гипотезы автопластичности, экземов, плавальности или изостазии, были основаны на меньшей плотности солей чем окружающих пород и их большей мобильности. По мнению Х. Стилле складчатость солевых тел, вызвана тангенциальными давлениями саксонской тектоники.

В 1957 г. Ф. Трусхайм ввел понятия галокинеза и галотектоники и дал их самые классические определения. В настоящее время классификацией солевой тектоники занимаются М.П.А. Джексон и Ц.Й. Тальбот, на основании изменений потенциальной энергии и тектонического режима. Галокинез и галотектоника (по мнению Трусхайма) ограничены только до определенных условий: галокинез — отсутствие тектонических напряжений, галотектоника — только контракция бассейна. Но всё таки оба эти понятия употребляются в менее точном и более широком смысле.