

doi: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2019.06.043>

УДК 551.247.031(477.13)

В.С. Куриленко

Институт геологических наук НАН Украины, Киев

E-mail: vskgeo@ukr.net

Соляной диапиризм Днепровско-Донецкой впадины с позиций флюидодинамических представлений

Представлено академиком НАН Украины В.И. Лялько

Соляной диапиризм как твёрдое течение солей рассмотрен с позиций флюидодинамических представлений. Высокая пластичность и низкая плотность солей являются причиной конвективной неустойчивости осадочной толщи, что приводит к образованию специфичных соляных структур. Специфика выражается в пространственной упорядоченности в размещении соляных структур в виде линейных форм или одиночных куполов (гексагонов), что зависит от критических значений числа Рэлея. На течение солей влияют вибрационные силы, задающие дискретный характер размерам соляных структур и расстояниям между ними. Оценено влияние факторов, управляющих соляным диапиризмом.

Ключевые слова: Днепровско-Донецкая впадина, соляной диапиризм, конвективная неустойчивость, релаксация, число Рэлея, вибрация, резонанс, геодинамическая сеть.

Пластическая деформация солей, их “текучесть” под воздействием неравномерных нагрузок обуславливает особый тип складчатости нагнетания — соляной диапиризм. Диапировые соляные складки известны во многих осадочных бассейнах мира, в том числе в Днепровско-Донецкой впадине (ДДВ). В ядре большинства складок находится соль, и с такими складками обычно связаны ловушки нефти и газа с широким диапазоном запасов углеводородов в них. Соляные залежи содержат ценные минеральные ресурсы, используемые в народном хозяйстве. В соляных массивах строят хранилища горючих материалов, радиоактивных и токсичных отходов. Этим вызван научно-практический интерес к соляному диапиризму.

Проблемами генезиса галогенных отложений и соляного тектогенеза занимались многие видные геологи Западной Европы и США, а также в пределах бывшего СССР и нынешнего СНГ. Опубликовано огромное количество работ, значительная часть которых посвящена изучению механизма зарождения и развития солянокупольных структур. При изучении процессов соляного тектогенеза возникают вопросы, касающиеся геодинамических условий формирования соляных структур.

© В.С. Куриленко, 2019

ISSN 1025-6415. Допов. Нац. акад. наук Укр. 2019. № 6

В настоящей работе рассмотрен соляной диапиризм ДДВ как “твёрдое” течение солей с позиций флюидодинамики.

Результаты исследования. В ДДВ известны три толщи верхнедевонских (воронежская, евлано-ливенская и данково-лебедянская) и толща нижнепермских солей [1–3]. Доминирующую роль в диапиризме сыграла евлано-ливенская толща, местами и временами вовлекавшая в галокинез расположенные выше по разрезу данково-лебедянскую и нижнепермскую толщи.

Механизм галокинеза. По современным представлениям [4] процесс галокинеза развивается в три этапа: 1) по мере погружения соляной толщи в зоны диагенеза и протокатагенеза происходят дегазация и дегидратация отложений. Флюиды деформируют слоистость пород и в соляном пласте возникают линзовидные поднятия и “вздутия” — этап соляных “подушек”; 2) при дальнейшем погружении солей в зоны мезо- и апокатагенеза пласты соли теряют слоистую текстуру и превращаются в полужидкую вязкую массу, которая под высоким давлением взламывает и прорывает перекрывающие отложения, возникают несогласные соотношения соляных и вмещающих пород — этап роста диапиров; 3) происходит “обезвоживание” соляного диапира (обособление жидкой фазы, отток рассолов), формируются кепроки — конседиментационный этап (по [5]) или этап деградации штоков.

Два основных фактора, управляющих соляным тектогенезом:

1. *Гравитационный фактор* обусловлен инверсией плотностей: у солей она в среднем $2,2 \text{ г/см}^3$, у перекрывающих их даже малоуплотнённых терригенных пород — порядка $2,5–2,6 \text{ г/см}^3$ [1, 3, 6]. Из-за конвективной неустойчивости происходит “всплывание” (выдавливание) относительно легких солей и погружение более плотных пород. Течение солей начинается при толщинах перекрывающих отложений 600–1000 м [3], когда возникают необходимые градиенты и давления.

2. *Геотектонический фактор* срабатывает при периодической активизации тектогенеза, выражающейся в подвижках блоков фундамента. При этом возникают контрастные силовые поля, инициирующие течение солей в направлении восстановления равновесного состояния [1, 3, 4, 7]. Движение солей и формирование структурного плана, как правило, носят циклический характер, что связано с фазами тектогенеза. В ДДВ различают четыре уровня подъёма солей: предкаменноугольный, связанный с бретонской фазой тектогенеза, предтриасовый — с заальской, предпалеогеновый — с ларамийской и предчетвертичный — с аттической. Развитие подавляющего большинства соляных структур ДДВ ограничилось этапом “соляных подушек”, часть структур испытала этап диапиризма (некоторые штоки “растут” и поныне), а часть — третий этап, этап деградации. Из упомянутых в [1] 73 штоков 34 штока имеют предтриасовый уровень подъёма солей, 25 штоков — предпалеогеновый и 14 — предчетвертичный.

Кроме двух основных факторов существует ряд других, также влияющих на соляной тектогенез. Это физико-механические свойства самих солей (их высокая пластичность, растворимость и аномальное объёмное тепловое расширение) [1, 4, 5, 8], высокотемпературные глубинные флюиды (газы, гидротермальные воды и рассолы) [4, 5, 8], фактор эрозии надсолевых отложений при росте штоков [7], космогенные силы, вызванные вращением Земли и притяжением Солнца и Луны, а также техногенный фактор при разработке залежей солей [9].

Конвективная флюидодинамика. Реологический подход к геологической среде позволяет считать её “вязкой жидкостью”, так как период релаксации большинства горных пород (особенно солей) несоизмеримо меньше продолжительности тектонических деформаций (10^8-10^{11} с против $10^{12}-10^{14}$ с) [6]. Динамическая вязкость некоторых веществ такова: воды — 10^{-2} П, льда — 10^{13} П, каменной соли — около 10^{18} П, вещества верхней мантии — около 10^{22} П, кристаллических горных пород — от 10^{23} до 10^{27} П [3, 4, 6].

Согласно “Теории нелинейной конвективной устойчивости” [2], структурную форму конвекции можно определить по формуле Рэлея

$$R = (\Delta\rho/\rho)(gh^3/\nu X).$$

Здесь первый множитель $(\Delta\rho/\rho)$ характеризует отношение плотностей в кровле и подошве толщи солей, подогреваемой снизу внутренним теплом Земли, и выражает степень вероятности инверсии. Во втором множителе: $g = 9,81$ м/с²; h^3 — толщина горизонтального слоя солей в кубе, что отражает объём конвектирующей массы; $\nu = \eta/\rho$ — кинематическая вязкость, связанная с динамической вязкостью (η) и плотностью (ρ) солей; $X = \chi/\rho c$ — температуропроводность, зависящая от теплопроводности (χ), плотности (ρ) и удельной теплоёмкости (c) солей.

Известны два критических значения числа Рэлея: $R_1 \sim 10^3$ и $R_2 \sim 10^4$ [2]. Если расчётное R меньше 10^3 , то конвекция не возникает; при значениях R между 10^3 и 10^4 конвекция проявляется в форме линейно вытянутых валов и впадин, при R больше 10^4 — в форме гексагонов (“ячеек Бенара”) [2]. Этот феномен отражается в структурном плане ДДВ — одиночные купола и валы образуют упорядоченные пространственные “геодинамические сети” [10].

Резонанс. Земля в целом и её составные части, как автономные физические тела, обладают собственными частотами колебаний. Если частота внешних воздействий совпадает с собственной, возникает резонанс, приводящий не только к разрушению целостности физического тела (в нашем случае — к переводу солей из стабильного пластового состояния в “текучее”), но и к “организации” вещества в новом порядке (образованию соляных структур). Природа внешних сил пока неясна. Вероятным источником их может быть переменное гравитационное притяжение Луны и Солнца, вызванное вращением Земли — лунно-солнечные приливы [11]. Частота пульсации приливов 10^5-10^7 с на фоне тектонических процессов $10^{12}-10^{14}$ с несоизмеримо высока, а размах (амплитуда) значительно меньше характерных размеров системы.

Резонанс определяет дискретный характер размеров линейных форм и гексагонов, а также расстояний между ними (“шаг геодинамической сети”) [10]. Замечено, что “шаг сети” определённого иерархического уровня отличается от соседних ниже- и вышестоящих уровней на величину, кратную $\sqrt{2}$. В формализованном виде эта закономерность выглядит так:

$$L_n = \sqrt{2^n} L_0 = 2^{0,5n} L_0,$$

где L_n — искомый шаг сети на n -уровне; L_0 — “базовый” шаг сети, т. е. наиболее распространённый в регионе (по наблюдениям автора равен 7–8 км). По-видимому, показатель n может принимать целые значения в широких пределах в зависимости от толщины соленосных слоёв и площади их распространения, но при работе с картографическим материалом мас-

штабов $1 : 10^{5-6}$ достаточно $n = \pm 2$). Соответственно, в строении осадочного чехла ДДВ можно выделить “зоны мелкой складчатости”, зоны развития структур средних и крупных размеров. Несомненно, эти закономерности имеют эвристическое значение.

Таким образом, совокупным действием перечисленных факторов и эффектов можно объяснить течение солей и упорядоченное расположение соляных структур в ДДВ в виде регулярных геодинамических систем. Это имеет эвристическое значение при планировании и проведении геолого-разведочных работ.

Требуется дальнейшее углублённое изучение соляного диапиризма во всех его проявлениях. Исследования следует проводить с позиций конвективной флюидодинамики и геодинамики с целью выявления пространственно-временных закономерностей в размещении соляных тел и структур осадочного чехла.

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Атлас геологического строения и нефтегазоносности Днепровско-Донецкой впадины: Арсирий Ю.А., Витенко В.А., Палий А.М., Цыпко А.К. и др. (ред.) Киев, 1984. 190 с.
2. Гончаров М.А., Талицкий В.Г., Фролова Н.С. Введение в тектонофизику. Москва: КДУ, 2005. 496 с.
3. Китык В.И. Соляная тектоника Днепровско-Донецкой впадины. Киев: Наук. думка, 1970. 204 с.
4. Холодов В.Н. Элизонные процессы и соляная тектоника. Сообщение 2. К проблеме формирования соляных диапиров. *Литология и полезные ископаемые*. 2013. № 4. С. 319–340.
5. Высочанский И.В. Новые представления о развитии и перспективах нефтегазоносности солянокупольных поднятий в Днепровско-Донецкой впадине. *Геол. журн.* 1991. № 2. С. 109–117.
6. Спенсер Э.У. Введение в структурную геологию. Ленинград: Недра, 1981. 368 с.
7. Стовба С.Н. Про механізми соляного тектогенезу в Дніпровсько-Донецькій западині. *Геолог України*. 2005. № 1. С. 23–29.
8. Новосилецкий Р.М. Роль аномально высоких пластовых давлений в формировании соляных штоков. *Геология и геохимия горючих ископаемых*. 1990. Вып. 74. С. 38–45.
9. Кудельский А.В. Эксталяционно-осадочный галогенез в Припятском палеорифте. *Геология и минерально-сырьевые ресурсы запада Восточно-Европейской платформы*. Минск, 2017. С. 167–171.
10. Куриленко В.С., Яньшина Н.А. Влияние геодинамических напряжений на формирование соляных структур Днепровско-Припятской газонефтеносной провинции. *Геология нефти и газа*. 1988. № 12. С. 25–29.
11. Довбнич М.М., Солдатенко В.П. О вибрационном воздействии лунно-солнечных приливов на геодинамические процессы. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2008. № 12. С. 96–100.

Поступило в редакцию 28.03.2019

REFERENCES

1. Arsiry, Yu. A., Vitenko, V. A., Paly, A. M., Tsypko, A. K. et al. (Eds.). (1984). Atlas geological structure and petroleum potential of the Dnieper-Donetsk depression. Kiev (in Russian).
2. Goncharov, M. A., Talitsky, V. G. & Frolova, N. S. (2005). Introduction to tectonophysics. Moscow (in Russian).
3. Kityk, V. I. (1970). Salt tectonics of the Dnieper-Donetsk depression. Kiev: Naukova dumka (in Russian).
4. Kholodov, V. N. (2013). Eliis processes and salt tectonics. Message 2. On the problem of the formation of salt diapirs. *Lithology and Mineral Resources*, No. 4, pp. 319-340 (in Russian).
5. Vysochansky, I. V. (1991). New ideas about the development and perspectives of oil and gas content of salt-dome elevations in the Dnieper-Donetsk depression. *Geol. Zhurn.*, No. 2, pp. 109-117 (in Russian).
6. Spenser, E. W. (1981). Introduction to the Structure of the Earth. Leningrad: Nedra (in Russian).
7. Stovba, S. N. (2005). On mechanisms of salt tectogenesis in the Dnieper-Donetsk Basin. *Ukrainian Geologist*, No. 1, pp. 23-29 (in Ukrainian).

8. Novosiletsky, R. M. (1990). The role of abnormally high reservoir pressures in the formation of salt barrels. *Geologiya i geohimiya Goryuchih Iskopayemyh*, Iss. 74, pp. 38-45 (in Russian).
9. Kudelsky, A. V. (2017). Exhalation-sedimentary halogenase in the Pripyat paleorift. In *Geology and Mineral Resources of the West of the Eastern European Platform* (pp. 167-171). Minsk (in Russian).
10. Kurilenko, V. S. & Yanshina, N. A. (1988). The influence of geodynamic stresses on the formation of salt structures of the Dnieper-Pripyat gas-oil province. *Geologiya Nefti I Gaza*, No. 12, pp. 25-29 (in Russian).
11. Dovbnich, M. M. & Soldatenko, V. P. (2008). On the vibrational influence of lunar-solar tides on geodynamic processes. *Dopov. Nac. acad. nauk Ukr.*, pp. 96-100 (in Russian).

Received 28.03.2019

V.S. Kurilenko

Інститут геологічних наук НАН України, Київ
E-mail: vskgeo@ukr.net

СОЛЯНИЙ ДІАПІРИЗМ ДНІПРОВСЬКО-ДОНЕЦЬКОЇ ЗАПАДИНИ З ПОЗИЦІЙ ФЛЮІДОДИНАМІЧНИХ УЯВЛЕНЬ

Соляний діапиризм як тверда течія солей розглянуто з позицій флюїдодинамічних уявлень. Висока пластичність і низька щільність солей є причиною конвективної нестійкості осадової товщі, що зумовлює утворення специфічних соляних структур. Специфіка виявляється в просторовій упорядкованості у розміщенні соляних структур у вигляді лінійних форм або одиночних куполів (гексагонів), що залежить від критичних значень числа Релея. На течію солей впливають вібраційні сили, які задають дискретний характер розмірам соляних структур і відстаням між ними. Оцінено вплив факторів, що керують соляним діапиризмом.

Ключові слова: *Дніпровсько-Донецька западина, соляний діапиризм, конвективна нестійкість, релаксація, число Релея, вібрація, резонанс, геодинамічна сітка.*

V.S. Kurilenko

Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine, Kiev
E-mail: vskgeo@ukr.net

SALT DIAPIRISM OF THE DNIEPER-DONETS DEPRESSION FROM THE STANDPOINT OF FLUID DYNAMIC REPRESENTATIONS

Salt diapirism is described as a solid flow of salts with regard to fluid-dynamic concepts. High plasticity and low density of salts are a cause for the convective instability of sedimentary strata, which leads to the formation of specific salt structures. Specificity is expressed in the spatial periodicity of the placement of salt structures either in the linear forms or in the form of hexagons (single domes) depending on the critical values of the Rayleigh number. The flow of salts is influenced by the vibration forces that determine the discrete nature of the sizes of salt structures and the distances between them. The influence of factors controlling the salt diapirism is estimated.

Keywords: *Dnieper-Donets depression, salt diapirism, convective instability, relaxation, Rayleigh number, vibration, resonance, geodynamical net.*