

**INFLUENCE OF THE EVAPORITE FORMATION STRUCTURE ON SALT TECTONICS AND HYDROCARBON TRAPS (BY THE RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF HALOKINESIS IN THE PRE-CASPIAN)****B.V. Lunev** ¹, **V.V. Lapkovsky** ^{1✉}, **M.P. Antipov** ², **Y.A. Volozh** ², **I.S. Postnikova** ²

¹ Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

² Geological Institute, Russian Academy of Sciences, 7-1 Pyzhevsky Ln, Moscow 119017, Russia

ABSTRACT. Within the Pre-Caspian sedimentary basin, there is certain regularity in the distribution of types of structures of salt tectonics. It is characterized by concentric zoning corresponding to the change in the sedimentation thickness of the evaporite sequence. As it increases from 0 to 6 km towards the center of the basin, stamp (embryonic) salt uplifts are replaced by salt pillows first and then by salt domes and diapirs, finally changing to salt massifs and amoeboid-shaped salt ridges. In addition, diapirs in the sections of the Pre-Caspian basin, drawn from the drilling and seismic data, are shaped like high-amplitude "fingers" with a flat base, which is not a typical picture of the Rayleigh – Taylor instability development. Since halokinesis is the main factor controlling the migration and accumulation of hydrocarbons in the Pre-Caspian region, background and aim of prospecting and exploration require identifying the specifics of the formation of various types of salt structures and the relationship between their location patterns and halokinesis process.

Numerical simulation shows that, depending on the instable layer thickness and its relationship with the total thickness of the overlying layers, the instability development occurs at different rates, forming different types of structures. When the thickness of the instable layer is greater than or comparable to the thickness of the denser overburden, there occur the salt masses. A greater thickness of the overlying layer gives rise to the formation of classical mushroom-shaped diapirs. A small-thickness low-density layer first undergoes a full bending as it rises, so that its top and bottom turn out to be morphologically similar to each other, thus giving a misleading impression of ordinary stamp folds. Somewhat greater thickness of the low-density layer leads to the development of "pillows" therein. Detailed modeling made it possible to relate the specific shape of the Pre-Caspian diapirs to the fact that the basal and top horizons of the evaporite formation, being composed mainly of terrigenous, carbonate and sulfate rocks, have a normal, non-inverse density and mask complex diapiric structures of halite-saturated domal cores.

KEYWORDS: salt tectonics, halokinesis; numerical modeling; Pre-Caspian region; oil and gas potential

FUNDING: The research is a part of the state assignment of the IPGG SB RAS (project FWZZ-2022-0009) and the GIN RAS.

**RESEARCH ARTICLE**

Correspondence: Vladimir V. Lapkovsky, lapkovskiivv@ipgg.sbras.ru

Received: June 9, 2022

Revised: October 20, 2022

Accepted: November 11, 2022

FOR CITATION: Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Antipov M.P., Volozh Y.A., Postnikova I.S., 2023. Influence of the Evaporite Formation Structure on Salt Tectonics and Hydrocarbon Traps (by the Results of Numerical Simulation of Halokinesis in the Pre-Caspian). *Geodynamics & Tectonophysics* 14 (2), 0690. doi:10.5800/GT-2023-14-2-0690

English version: see article page online

ВЛИЯНИЕ СТРОЕНИЯ ЭВАПОРИТОВОЙ ФОРМАЦИИ НА ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУР СОЛЯНОЙ ТЕКТОНИКИ И ЛОВУШЕК УГЛЕВОДОРОДОВ (ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ГАЛОКИНЕЗА В ПРИКАСПИИ)

Б.В. Лунёв¹, В.В. Лапковский¹, М.П. Антипов², Ю.А. Волож², И.С. Постникова²

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

² Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, стр. 1, Россия

АННОТАЦИЯ. В пределах Прикаспийского осадочного бассейна наблюдается определенная закономерность в размещении структур соляной тектоники разного типа. Она характеризуется концентрической зональностью, соответствующей изменению седиментационной мощности эвапоритовой толщи. По мере ее нарастания от периферии к центру бассейна от 0 до 6 км штамповые (эмбриональные) соляные поднятия сменяются соляными подушками, затем – соляными куполами и диапирами и, наконец, соляными массивами и амeboобразными соляными хребтами. Кроме того, диапиры на разрезах Прикаспия, построенных по данным бурения и сейсморазведки, имеют довольно специфический облик высокоамплитудных «пальцев» с плоской подошвой, не характерный для типичной картины развития неустойчивости Рэлея – Тейлора. Поскольку галокинез является основным фактором, контролирующим миграцию и накопление углеводородов в Прикаспии, для обоснованного нацеливания поисково-разведочных работ нужно выяснить специфику формирования различных типов соляных структур и связи закономерностей их размещения с ходом процесса галокинеза.

Численным моделированием показано, что в зависимости от толщины неустойчивого слоя и ее соотношения с общей толщиной перекрывающих слоев развитие неустойчивости идет с разной скоростью, формируя различные типы структур. Когда мощность неустойчивого слоя больше или сопоставима с мощностью более плотных перекрывающих пород, формируются соляные массивы. При большей мощности перекрывающего слоя формируются классические грибообразные диапиры. При малой толщине низкоплотного слоя он, всплывая, вначале изгибается целиком, так что морфология его кровли и подошвы оказывается подобной и возникает обманчивое впечатление обычных штамповых складок. Там, где толщина низкоплотного слоя несколько больше, развиваются «подушки». Детальное моделирование позволило установить, что специфическая форма диапиров Прикаспия может быть обусловлена тем, что базальные и венчающие горизонты эвапоритовой формации, будучи сложными преимущественно терригенными, карбонатными и сульфатными породами, имеют нормальную, неинверсионную, плотность и маскируют сложные диапировые структуры насыщенных галитом ядер куполов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: соляная тектоника; галокинез; численное моделирование; Прикаспий; нефтегазоносность

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Тема исследования соответствует госзаданию ИНГГ СО РАН (проект FWZZ-2022-0009) и ГИН РАН.

1. ВВЕДЕНИЕ

Галокинез является главным фактором образования локальных структур в Прикаспии и основным фактором, контролирующим миграцию и накопление углеводородов [Volozh et al., 2003]. В связи с этим для обоснованного нацеливания поисково-разведочных работ следует «установить региональные особенности строения соленосного и надсолевого комплексов с одной стороны, и выяснить связи между закономерностями размещения различных типов соляных структур и ходом процесса галокинеза – с другой» [Antipov, Volozh, 2012, с. 48]. В цитированной работе эта задача решалась на основе обобщения результатов исследований, выполненных в последние два десятилетия [Bakirov et al., 1992; Volozh et al., 1989, 1997a, 1997b, 2000; Eskozha et al., 2007; Kuandykov et al., 2011; Matusevich, 2005, 2007; Pisarenko et al., 2011]. Была составлена структурная карта кровли соли Прикаспийской

впадины с использованием исследований А.В. Матусевича, Л.Ф. Волчегурского, М.С. Трохименко и др., карта седиментационной мощности галогенной формации и батиметрическая карта пермского солеродного бассейна Каспийского региона [Volozh et al., 1997a, 1997b, 2003; Eskozha et al., 2007; Matusevich, 2005, 2007]. Определен стратиграфический диапазон пермской галогенной формации (позднеартинско-казанский); создана стратиграфическая схема расчленения верхнеартинско-кунгурского интервала разреза соленосной толщи; разработана схема сеймостратиграфического расчленения надсолевого комплекса Прикаспийской впадины [Volozh et al., 2000; Pisarenko et al., 2011; Tikhvinsky, 1974; Yatskevich et al., 1990]. В итоге разработана принципиальная модель формирования соленосной формации пермского бассейна Каспийского региона [Antipov, Volozh, 2012]. Выполнена типизация соляных структур, и предложен новый вариант районирования

соленосного и надсолевого комплексов Прикаспийского солеродного бассейна по типам разрезов и структур. С целью выяснения связей между закономерностями размещения различных типов соляных структур и ходом процесса галокинеза были рассмотрены возможные сценарии проявления процессов соляной тектоники. Однако это было сделано на основе качественного анализа структур, выявленных геолого-геофизическими исследованиями. В настоящей работе авторы постарались уточнить эти связи, сам ход галокинеза и особенности формируемых им структур при помощи численного моделирования этого процесса применительно к условиям Прикаспийского солеродного бассейна.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЙ

Галогенная формация Прикаспийской впадины охватывает возрастной интервал от конца артинского яруса нижней перми до верхов казанского яруса верхней перми. По составу и особенностям строения эта формация разделяется на три комплекса: верхнеартинско-кунгурский, преимущественно галогенный (на 95 % это каменная соль), уфимский терригенно-галогенный и казанский терригенно-карбонатно-галогенный, в которых солевые прослои имеют подчиненное (до 30 %) значение. Согласно расчетам, выполненным

по последним данным геофизики [Antipov, Volozh, 2012], так называемая седиментационная мощность галогенной формации достигает 4500 м. Из них на верхнеартинско-кунгурский комплекс приходится 2500–3000 м, а на уфимский и казанский – 1000–1500 м. В прибортовой части Прикаспийского солеродного бассейна нижний и верхний комплексы галогенной формации разделены межсоловой нижнеказанской толщей мощностью 150–610 м. На востоке это терригенные отложения (сосновская свита), на западе – сульфатно-терригенно-карбонатные (калиновская свита).

На основе анализа сейсмических и буровых данных были определены палеоглубины накопления кунгурских и казанских солей и построена карта батиметрии предкунгурского солеродного бассейна и карта мощностей пермской галогенной формации в целом (рис. 1) [Antipov, Volozh, 2012].

Принципиальное строение эвапоритовой формации представлено на рис. 2.

Строение пермской галогенной формации имеет следующие особенности [Antipov, Volozh, 2012].

1. Резкие различия седиментационной мощности галогенной формации Центрально-Прикаспийской и прибортовых областей бассейна. В центральной части бассейна седиментационная мощность соленосной формации почти втрое больше, чем в пределах

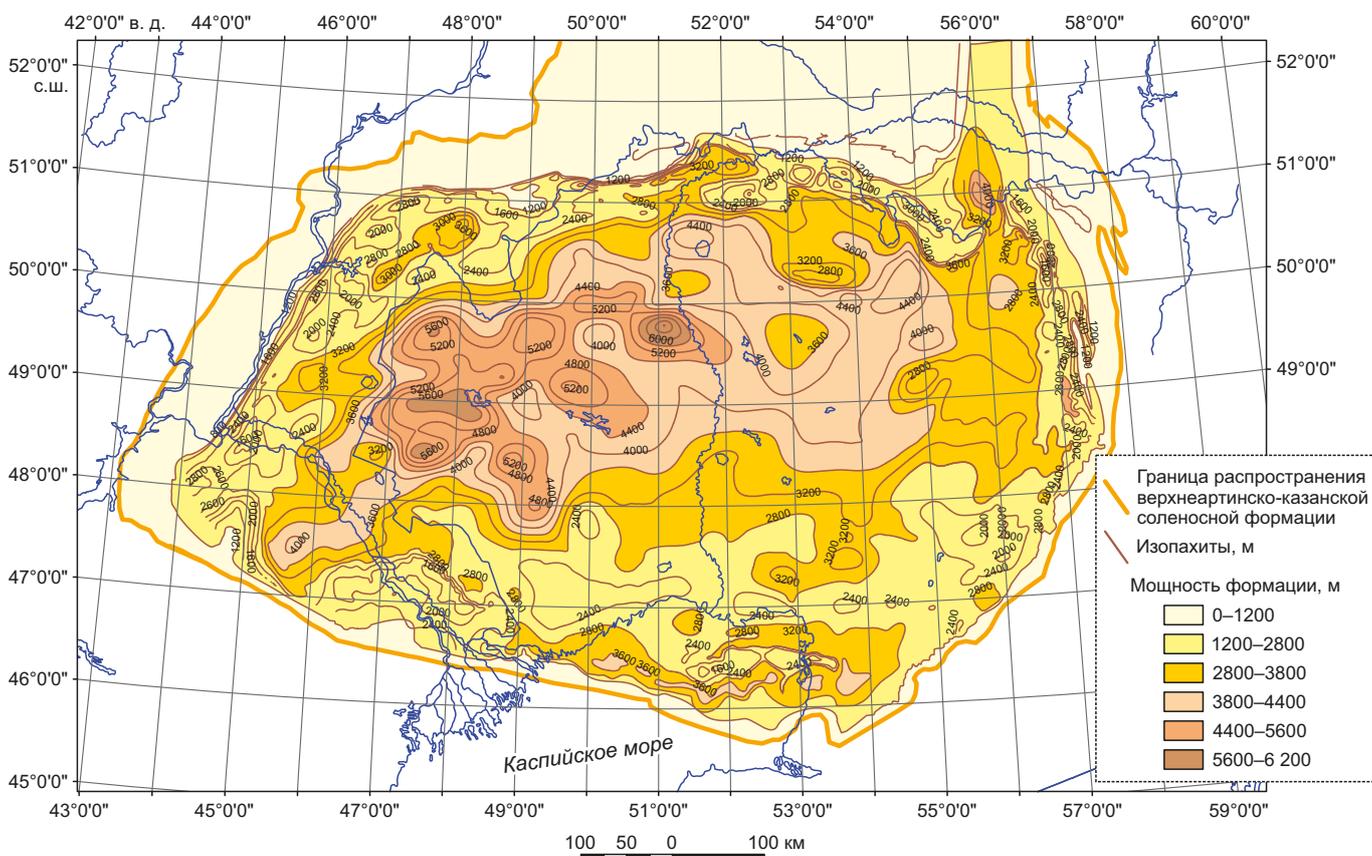


Рис. 1. Карта седиментационной мощности галогенной формации Прикаспийского солеродного бассейна (по [Antipov, Volozh, 2012]).

Fig. 1. Map of the sedimentation thickness of the halogen formation of the Pre-Caspian salt basin (after [Antipov, Volozh, 2012]).

прибортовых ступеней. Увеличение в основном происходит за счет двукратного разрастания мощности преимущественно галогенного верхнеартинско-кунгурского комплекса.

2. Существенные отличия в литологическом составе разрезов верхнеартинско-кунгурского соленосного комплекса северо-западного и юго-восточного борта Прикаспийской впадины. На северо-западе в нем выделяют три литолого-фациальных толщи: карбонатно-сульфатную, карбонатно-сульфатно-галогенную и

галогенную. На юго-восточном борту этот комплекс также имеет трехчленное строение, но состав толщ иной: нижняя – сульфатно-терригенная, средняя – галогенная и верхняя – сульфатно-терригенная.

3. Однотипный характер строения циклически построенных стратиграфических подразделений верхнеартинско-кунгурского преимущественно соленосного комплекса северо-западной бортовой области – трехчленный (глина – ангидрит – соль) для соленосной серии кунгура и двухчленный (карбонат – ангидрит) для

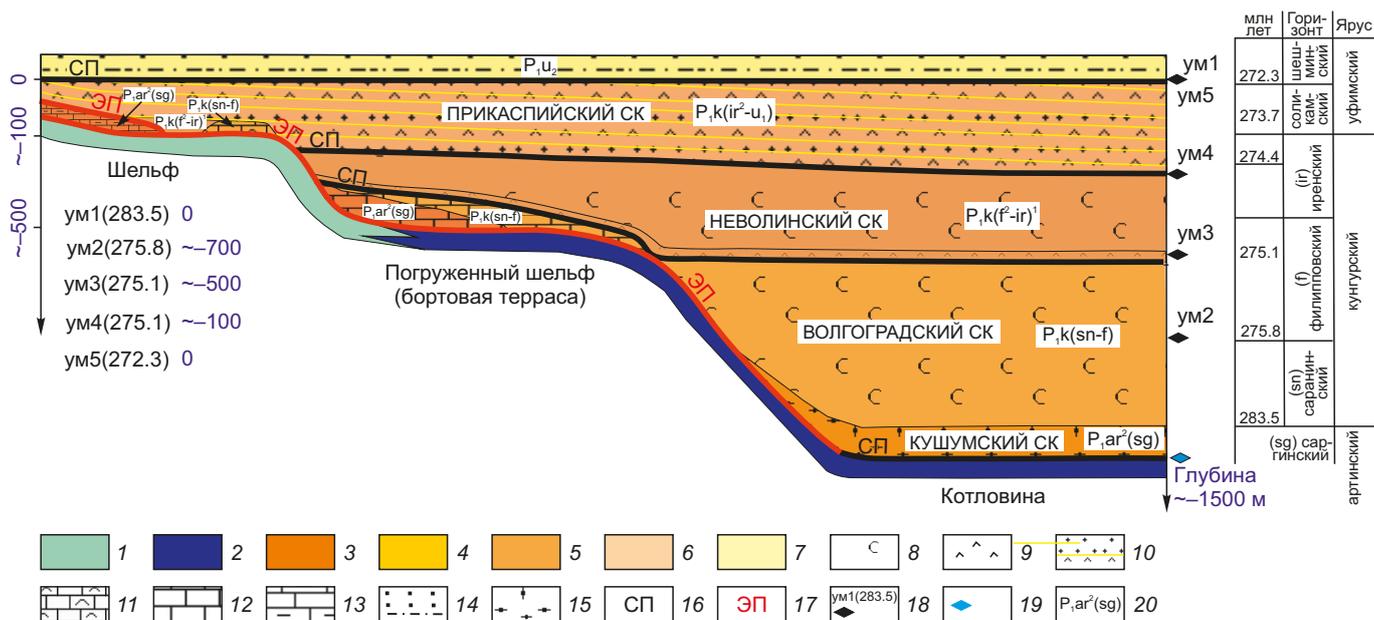


Рис. 2. Хроностратиграфическая схема расчленения пермской галогенной формации Прикаспийской впадины. Схема показывает седиментационный характер распределения эвапоритовой формации в пределах кунгурского бассейна и изменения его палеоглубин во времени, начиная с 1500 м перед накоплением эвапоритовой формации и завершая ее образование в конце уфимского времени при глубинах отдельных континентальных водоемов менее 50 м. В процессе развития солеродного бассейна можно выделить несколько стадий с разными уровнями моря. Время, фиксированное для каждой стадии, вычислено условно, исходя из скорости накопления соли в эвапоритовых бассейнах.

1 – мелководные отложения подсолевого комплекса; 2 – глубоководные образования подсолевого комплекса; 3–7 – сейсмокомплексы (СК) эвапоритовой формации: 3 – кушумский верхнеартинский (саргинский) СК, 4 – волгоградский саранинско-филипповский СК, 5 – неволинский филипповско-иренский СК, 6 – прикаспийский иренско-уфимский СК, 7 – верхнеуфимский терригенный СК; 8 – галиты; 9 – ангидриты; 10 – ритмично построенная соленосная толща с калийными солями; 11 – сульфатно-карбонатная толща, возможно с рифами; 12 – известняки и обломочные карбонатные отложения, продукты разрушения рифов и карбонатных платформ (отложения подножья рифов и платформ); 13 – терригенно-карбонатные отложения; 14 – терригенные отложения; 15 – отложения подводных конусов выноса в пределах котловины; 16 – седиментационная поверхность; 17 – эрозионная поверхность; 18 – отметки уровня моря для разных стадий развития эвапоритового бассейна, в скобках – временной интервал в млн лет; 19 – отметка глубины предкунгурского бассейна; 20 – стратиграфические индексы сейсмокомплексов.

Fig. 2. Chronostratigraphic scheme of the division of the Permian halogen formation of the Pre-Caspian basin. The scheme showing the sedimentation nature of the distribution of the evaporite formation within the Kungurian basin and its temporal paleodepth variation from 1500 m before the formation accumulation to its completion at the end of the Ufimian, with less than 50 m deep isolated continental water bodies. The process of development of the salt basin exhibits several different sea-level stages. The time for each stage was calculated conventionally based on the rate of salt accumulation in the evaporite basins.

1 – shallow water deposits of the subsalt complex; 2 – deep-water formations of the subsalt complex; 3–7 – seismic complexes (SC) of the evaporite formation: 3 – Kushum Upper Artinskian (Sargin) SC, 4 – Volgogradsky-Saraninsky-Philippovsky SC, 5 – Nevolinsky Filippovsky-Irensky SC, 6 – Caspian Irensky-Ufimian SC, 7 – Upper Ufimian terrigenous SC; 8 – halites; 9 – anhydrites; 10 – rhythmic salt-bearing strata with potassium salts; 11 – sulfate carbonates with possible content of reefs; 12 – limestones and clastic carbonate deposits, the products of reef and carbonate platform degradation (reef and platform basement deposits); 13 – terrigenous-carbonate deposits; 14 – terrigenous deposits; 15 – deposits of underwater fans within the basin; 16 – sedimentation surface; 17 – erosion surface; 18 – sea level marks for different stages of the evaporite basin development, in brackets is the time interval in million years; 19 – mark of the depth of the Kungurian basin; 20 – stratigraphic indices of seismic complexes.

карпенской серии в основании сейсмокомплекса [Pisarenko et al., 2011, 2021a, 2021b]. Трансгрессивный характер контакта пермской галогенной формации с подстилающими отложениями в краевых (изначально мелководных) зонах седиментационного бассейна и согласный – в глубоководной котловине.

4. Ограничение области распространения наиболее древней из известных соленосных толщ – волгоградской серии – аккумулятивными (седиментационными) шельфовыми уступами, которые отделяли мелководную часть предкунгурского бассейна от ее относительно глубоководной зоны: прибортовых ступеней и глубоководной котловины.

5. Появление в разрезе верхней части пермской галогенной формации центральных районов Прикаспийской впадины мощной терригенно-соленосной красноцветной толщи (возрастной аналог уфимского терригенно-галогенного и казанского терригенно-карбонатно-галогенного комплексов).

Многие исследователи отмечали различия в строении соляных куполов тех или иных районов Прикаспийской впадины и составляли схемы районирования впадины по типам этих структур [Volozh, 1971; Volozh et al., 1989, 1997b, 2000, 2003; Eskozha et al., 2007; Zholtaev, 1966; Zhuravlev, 1963, 1964, 1966; Konishchev, 1982; Volozh, Konishchev, 1989; Konishchev et al., 1990; Kosygin, 1950, 1960]. В работе [Antipov, Volozh, 2012]

на основе накопленной новой информации построена карта кровли пермских соленосных отложений Северного Прикаспия (рис. 3) и предложена новая схема районирования пермского солеродного бассейна Прикаспийской впадины (рис. 4).

Исходя из особенностей строения пермской галогенной формации, в пределах пермского солеродного бассейна Прикаспийской впадины можно выделить Прикаспийскую солянокупольную провинцию и Северо-Западную периферийную область. Внутри Прикаспийской солянокупольной провинции выделены восемь сейсмогеологических областей: Северная, Западная, Южная, Юго-Восточная, Центрально-Прикаспийская, Северокаспийско-Актюбинская, Карасальско-Смушковская и Примугоджарская (рис. 4).

В пределах выделенных областей наблюдаются следующие закономерности размещения различных типов соляных структур.

Штамповые (эмбриональные) соляные поднятия размещены вдоль Северо-Западной периферийной области, в зоне, ограниченной с внутренней стороны палеозойским карбонатным уступом, а с внешней – линией современного распространения соленосной толщи. Мощность соленосного комплекса здесь изменяется от 0 до 1200 м, а надсолевого – от 500 до 1500 м.

Соляные антиклинали распространены в Юго-Западной периферийной области, в узкой, шириной до

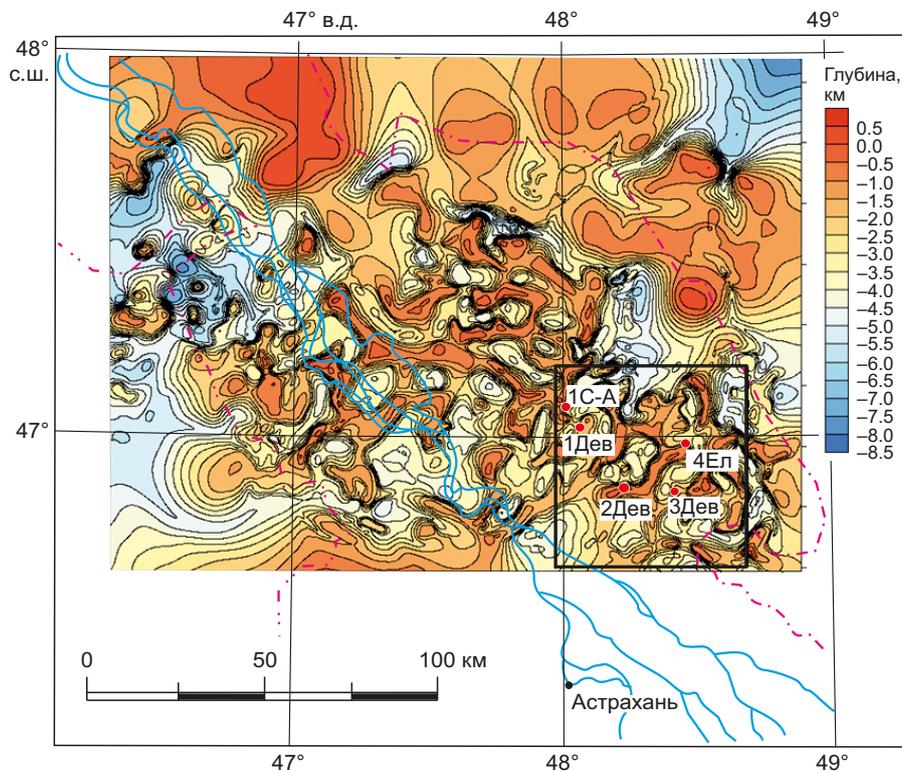


Рис. 3. Фрагмент структурной карты кровли пермских соленосных отложений Юго-Западного Прикаспия по [Antipov, Volozh, 2012]. Черным прямоугольником выделен участок 3D-моделирования. 1Дев, 2Дев, 3Дев – 1, 2 и 3-я девонские скважины, 1С-А – Северо-Астраханская.

Fig. 3. A fragment of the structural map of the top of the Permian salt deposits in the southwestern Pre-Caspian after [Antipov, Volozh, 2012]. The 3D modeling area is marked with a black rectangle. 1Dev, 2Dev, 3Dev – 1st, 2nd and 3rd Devonian wells, 1C-A – Astrakhanskaya well.

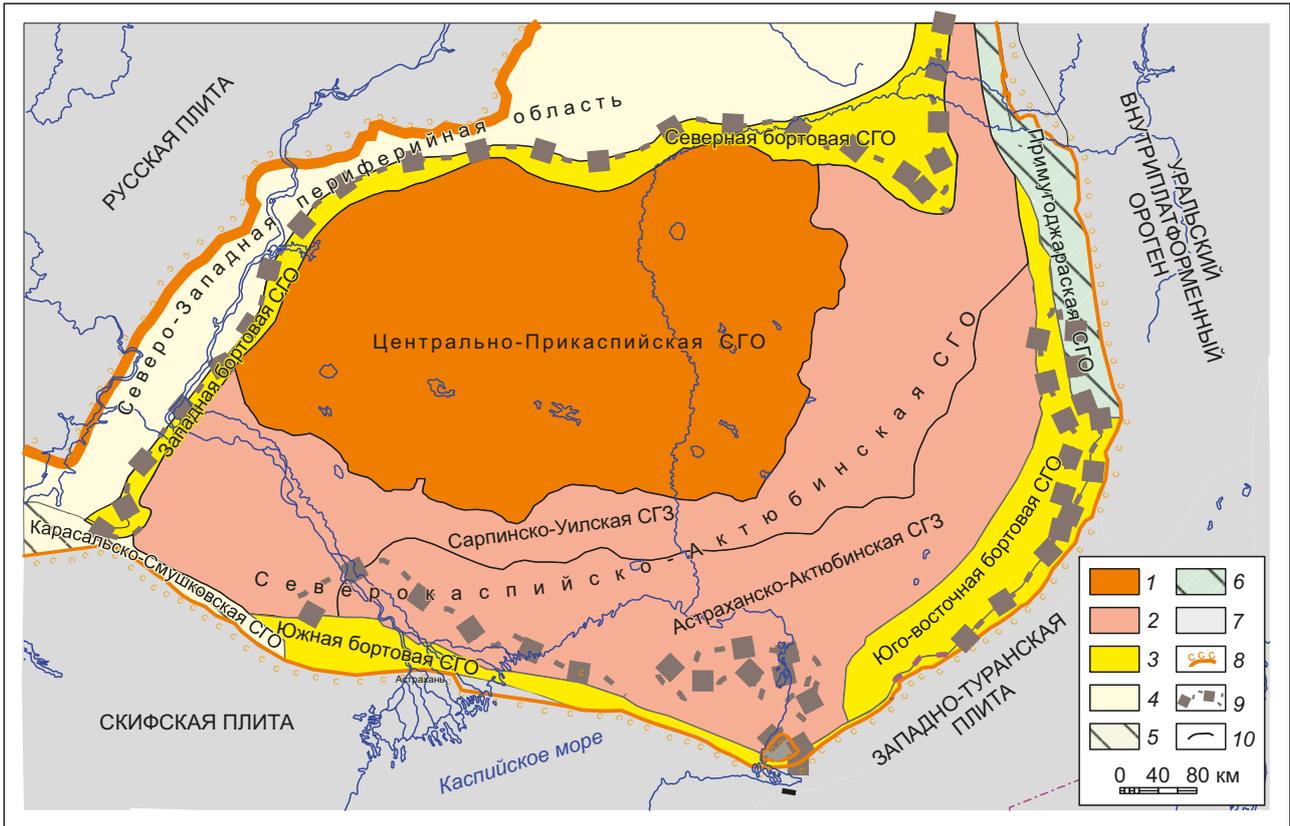


Рис. 4. Схема районирования соленосного и надсолевого комплексов Прикаспийского солеродного бассейна по типам разрезов и структур (с изменениями по [Antipov, Volozh, 2012]).

1 – Центрально-Прикаспийская сейсмогеологическая область (СГО); 2 – Северокаспийско-Актюбинская СГО, состоящая из двух сейсмогеологических зон (СГЗ): Сарпинско-Уилской и Астраханско-Актюбинской; 3 – бортовые СГО: Западная, Северная, Южная и Юго-Восточная; 4 – Северо-Западная периферийная СГО; 5–6 – области развития соляных антиклиналей (соляная тектоника): 5 – Карсальско-Смушковская, 6 – Примугоджарская; 7 – область отсутствия кунгурских соленосных отложений; 8 – граница распространения соленосной верхнеартинско-казанской формации Прикаспийского солеродного бассейна; 9 – граница башкирских внутрибассейновых карбонатных платформ и пермского карбонатного уступа; 10 – граница между Сарпинско-Уилской и Астраханско-Актюбинской сейсмогеологическими зонами.

Fig. 4. Scheme of zoning of the salt and supra-salt complexes of the Pre-Caspian salt-bearing basin according to the types of sections and structures (modified from [Antipov, Volozh, 2012]).

1 – Central Pre-Caspian seismogeological region (SGR); 2 – North Caspian – Aktobe SGS, consisting of two seismogeological zones (SGZ): Sarpa-Uil and Astrakhan-Aktobe; 3 – marginal SCS: Western, Northern, Southern and Southeastern; 4 – Northwestern peripheral SGR; 5–6 – areas of development of salt anticlines (salt tectonics): 5 – Karasal-Smushkov, 6 – Primugodzhar; 7 – area of no Kungurian salt-bearing deposits; 8 – the boundary of the distribution of the saline Upper Artinskian-Kazanian formation of the Pre-Caspian salt basin; 9 – boundary between the Bashkirian intra-basin carbonate platforms and the Permian carbonate scarp; 10 – boundary between the Sarpin-Uil and Astrakhan-Aktyubinsk seismogeological zones.

10 км, полосе, примыкающей к северному склону кряжа Карпинского.

По направлению к центру солеродного бассейна соляные антиклинали и подушки сменяются зоной развития соляных куполов. Она занимает юго-восточную часть впадины и состоит из трех подзон. Обособленная зона соляных подушек распространена также в пределах Соль-Илецкого выступа и Карсальской моноклинали. Ближе к периферии бассейна располагаются конические соляно-купольные структуры, которые сменяются вначале зоной ступенчатых куполов, а затем – грибовидных. Центральную часть Прикаспийского солеродного бассейна занимает область развития соляных массивов и амeboобразных соляных хребтов.

И, наконец, вдоль северо-западного борта впадины протягивается узкая полоса соляных валов. Все известные диапировые структуры Прикаспийской впадины размещены в пределах ее центральных областей.

Таким образом, в размещении галокинетических структур наблюдается отчетливая концентрическая зональность, соответствующая изменению седиментационной мощности эвапоритовой толщи.

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Постановка задачи моделирования галокинеза путем расчета ползучего течения неоднородной по плотности вязкой жидкости, ее обоснование и методы решения подробно описаны в предыдущих работах [Lunev,

Lapkovsky, 2009, 2014; Lunev et al., 2017a, 2017b; Abramov et al., 2016; Kontorovich et al., 2014, 2019; Abramov, Lunev, 2014; Abramov, 2015], поэтому здесь авторы ограничатся описанием конкретного применения методики для моделирования изучаемого объекта.

Для выяснения принципиальных особенностей развития неустойчивости представляющего соленасыщенную толщу низкоплотного слоя, в зависимости от его толщины и соотношения с общей толщиной перекрывающих более плотных слоев, удобно применить ранее разработанную программу 2-мерного моделирования «Diapir» [Lunev, Lapkovsky, 2009; Filippov et al., 2009]. При ее использовании сразу задается весь разрез, состоящий из слоев разной плотности и конфигурации, после чего «включается» сила тяжести и исследуется эволюция системы.

На рис. 5 показано развитие неустойчивости низкоплотного слоя, толщина которого изменяется от первых сотен до первых тысяч метров.

Видно, что в зависимости от толщины неустойчивого слоя и ее соотношения с общей толщиной перекрывающих слоев развитие неустойчивости идет с разной скоростью, формируя различные типы структур.

Когда мощность неустойчивого слоя больше мощности более плотных перекрывающих пород или сопоставима с ней, в результате всплывания его вещества формируются соляные массивы. Такой вариант развития неустойчивости имеет место на правом фланге

структуры, показанной на рис. 5. Отдельно он рассчитан и показан на рис. 6.

При большей мощности перекрывающего слоя формируются классические грибообразные диапиры, как это можно видеть в средней части структуры на рис. 5 и отдельно – на рис. 7.

И, наконец, при малой мощности низкоплотного слоя он, всплывая, вначале изгибается целиком, так что морфология его кровли и подошвы оказывается подобной и возникает обманчивое впечатление обычных штамповых складок (рис. 8). Там, где толщина низкоплотного слоя несколько больше, развиваются «подушки».

На рис. 5 развитие псевдоштамповых складок имеет место на левом фланге структуры. Между ними и зоной формирования диапиров наблюдается развитие «подушек».

Различный характер структур развития неустойчивости обусловлен взаимодействием двух основных факторов. Во-первых, характерный горизонтальный размер формирующихся структур (длина волны развивающейся неустойчивости) определяется мощностью конвектирующего слоя от подошвы всплывающего низкоплотного слоя до глубины, на которой его плотность становится больше плотности вышележащего вещества, в данном случае – до свободной поверхности. Во-вторых, чем больше мощность инверсионного слоя (при данной величине дефицита плотности),

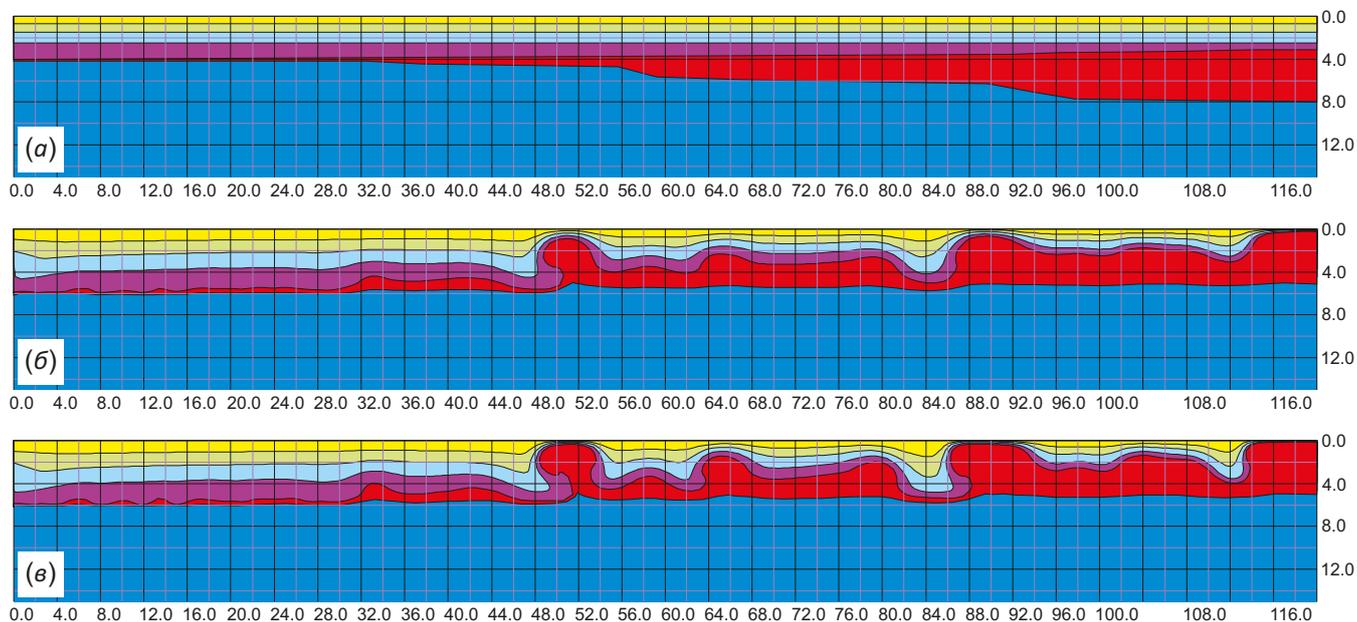


Рис. 5. Стадии развития неустойчивости низкоплотного слоя переменной толщины (показан красным цветом).

(а) – исходная стадия, (б) – промежуточная стадия, (е) – последняя из рассчитанных. Красным цветом показан неустойчивый (низкоплотный) слой, другими цветами – перекрывающие более плотные слои, синим – подстилающие, наиболее плотные. (На левом фланге тонкий красный слой почти не виден в силу масштаба изображения). Горизонтальный масштаб (внизу) и вертикальный масштаб (справа) здесь и далее даны в км.

Fig. 5. Stages of development of instability of a low-density variable-thickness layer.

(a) – initial stage, (b) – intermediate stage, (e) – last calculated stage. The instable (low-density) layer is shown in red, the overlying denser layers are shown in other colors, and the underlying, densest layers are shown in blue. (A thin red layer on the left flank is almost invisible due to image scaling). Horizontal scale (bottom) and vertical scale (right) dimensions here and below are shown in km.

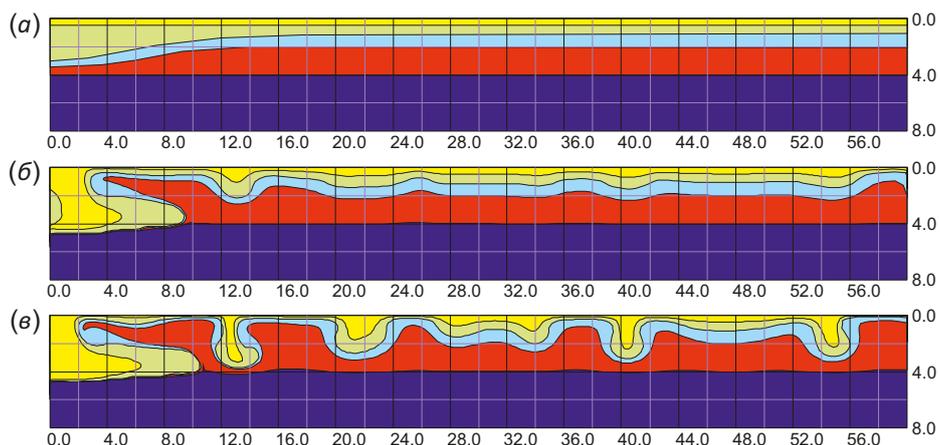


Рис. 6. Развитие неустойчивости толстого низкоплотного слоя (красный цвет), перекрытого пачкой более плотных слоев такой же мощности.

Fig. 6. Development of instability of a thick low-density layer (red) overlain by a denser sequence of layers of the same thickness.

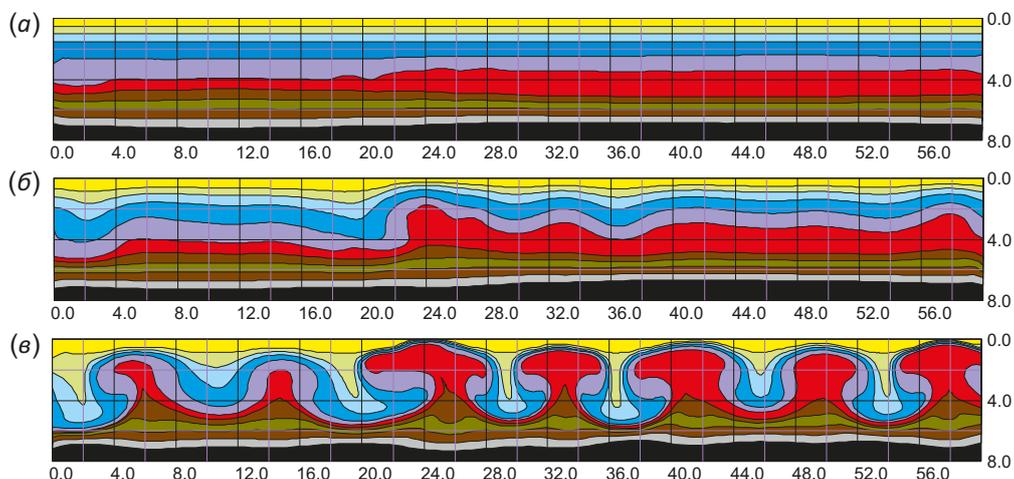


Рис. 7. Развитие неустойчивости низкоплотного слоя (красный цвет), мощность которого примерно вдвое меньше, чем у пачки перекрывающих его более плотных слоев, – формирование грибообразных диапиров.

Fig. 7. Development of instability of a low-density layer (red), whose thickness is about half as much as that of the overlying denser sequence of layers – the growth of mushroom-shaped diapirs.

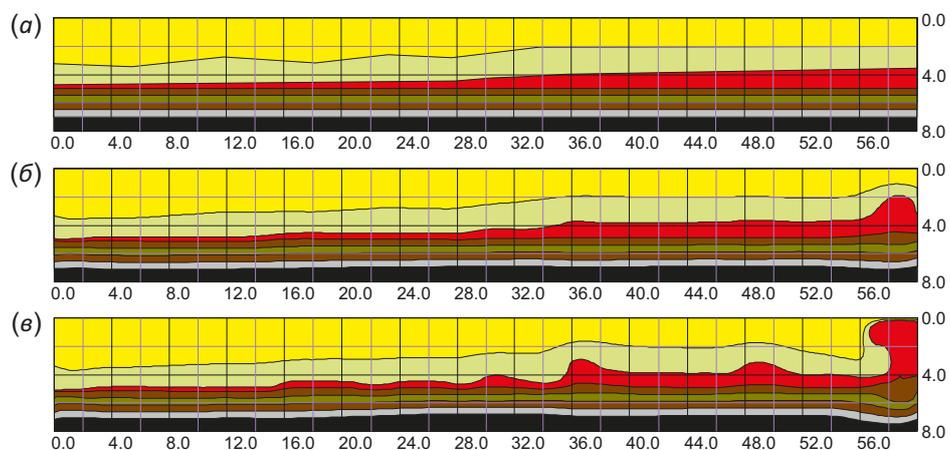


Рис. 8. Развитие неустойчивости тонкого низкоплотного слоя (красный цвет) с формированием псевдоштамповых складок, сменяющихся по мере утолщения неустойчивого слоя в правой части «подушками».

Fig. 8. The development of instability of a thin low-density layer (red) with the formation of pseudo-stamp folds, which change to "pillows" with the increase in the instable layer thickness on the right side.

тем быстрее развивается неустойчивость, поскольку с большими аномальными массами связаны и большие архимедовы силы и, соответственно, большие скорости вызываемого ими течения. В связи с этим в зоне с большой мощностью всплывающего слоя растущие возмущения успевают подняться к поверхности и сформировать развитые диапиры, тогда как в зоне малой мощности неустойчивого слоя амплитуда образующихся его изгибов остается сравнительно небольшой. Развитие соляных массивов в зоне, где мощность всплывающего слоя больше или сравнима с общей мощностью перекрывающих слоев, по-видимому, объясняется просто нехваткой места для формирования грибообразных диапиров.

Результаты моделирования согласуются с вышеприведенным описанием зональности размещения галокинетических структур (см. рис. 4) и изменения седиментационной мощности галогенной формации Прикаспийского солеродного бассейна (см. рис. 1) и вполне ее объясняют. При этом становятся неактуальными предположения о действии внешних сил для объяснения псевдоштамповых соляных складок в периферийной зоне с малой исходной мощностью соленосных отложений. Такая возможность и не исключается, но против нее говорит наблюдаемый характер структуры кровли эвапоритовой формации Прикаспия (см. рис. 3), который соответствует классической картине развития неустойчивости Рэлея – Тейлора с выдержанной характерной длиной волны возмущений. В связи с обсуждаемым можно также заметить, что отмеченное формирование систем валов, субпараллельных краю соленосной области, вполне объясняется краевым эффектом, являющимся прямым следствием геометрии солеродного бассейна.

Для более детального анализа влияния строения разреза на галокинез и характер результирующей структуры авторы воспользовались программой «Diapir3D» [Abramov et al., 2018]. Эта программа позволяет делать расчеты в соответствии с существенной трехмерностью наблюдаемых структур (см. рис. 3) и, кроме того, рассчитывать развитие неустойчивости Рэлея – Тейлора на фоне заданного процесса формирования разреза – региональных вертикальных движений, сопровождающихся накоплением и необратимым уплотнением осадков при опускании территории и их эрозией при воздымании.

Для моделирования был выбран участок (см. рис. 3), расположенный в пределах Северокаспийско-Актюбинской области, соответствующей погруженному шельфу предкунгурского бассейна (см. рис. 2). Здесь авторы статьи постарались возможно ближе воспроизвести наблюдаемую современную структуру эвапоритовой формации. Речь пока не шла о том, чтобы добиться портретного сходства модели с исследуемым объектом, авторы старались воспроизвести надежно установленные черты структуры – ее общую конфигурацию (размещение на участке куполов и разделяющих их мульд) и гипсометрические отметки кровли эвапоритовой

толщи на вершинах куполов и в мульдах согласно карте этой поверхности (см. рис. 3), а также общее гипсометрическое положение ее подошвы согласно данным бурения [Volozh, Parasyna, 2008]. В связи с этим пока не использовались имеющиеся возможности задавать изменения по участку фоновых региональных движений и составу отложений. Предполагалось, что региональные вертикальные движения в каждый момент времени были однородными по всему участку и что состав отложений (выраженный в их плотности), усредненный по выделенным слоям, тоже по всему участку однороден.

Скорости опускания территории рассчитывались как постоянные для каждого выделенного слоя, исходя из его мощности и геологического возраста его границ, с учетом заданного закона уплотнения осадков. Скорости воздымания рассчитывались на основе тех или иных предположений о величине размыва во время перерыва в осадконакоплении (сразу следует отметить, что по понятным причинам этот параметр модели может достаточно широко варьироваться). При этом предполагалось, что опускание территории компенсируется осадконакоплением с необратимым уплотнением осадков, а воздымание – эрозией, так что среднее положение дневной поверхности на исследуемом участке с точностью до некоторой константы остается постоянным, а ее рельеф определяется динамикой аномальных масс, обусловленных развитием плотностной неустойчивости, т.е. галокинезом. Плотность определяется как функция приписываемого каждому слою среднего состава и закона уплотнения, определяемого интерполяцией между заданными для каждого слоя значениями его плотности на некоторых глубинах.

Авторы рассчитали несколько десятков вариантов развития неустойчивости, моделирующих эволюцию соляных структур выбранного участка при различных параметрах. Параметры модели, наилучшим образом согласующейся в итоговом состоянии с данными наблюдений по гипсометрическим отметкам кровли эвапоритов на вершинах куполов и днищах мульд и средней гипсометрии их подошвы, приведены в табл. 1 (мощность выделенных слоев и возраст их границ) и в табл. 2 (законы изменения плотности выделенных слоев).

Заданное в модели деление эвапоритовой формации на три слоя – слои № 6–8 в табл. 1, 2 – требует объяснения.

Выделение относительно высокоплотного слоя, венчающего эвапоритовую формацию (слой № 8 в табл. 1, 2), обусловлено тем, что на представленных в литературе [Pisarenko et al., 2011, 2021a, 2021b] разрезах Прикаспия, построенных по данным бурения и сейсморазведки, диапиры, как правило, изображаются в виде высокоамплитудных «пальцев», лишь изредка можно видеть на них грибообразные формы и карнизы. Между тем известно (см., например, классическую работу [Jackson, Talbot, 1986]), что при таких амплитудах

Таблица 1. Параметры формирования разреза**Table 1.** Model parameters of the section

Номер слоя	Возраст кровли слоя, млн лет	Мощность слоя, м	Стратиграфическая номенклатура слоя
1	359	0	D
2	323	790	C1t-v-s
3	315	140	C2b
4	299	50	C2m+C3
5	284	100	P1s-a
6	280	700	P1k
7	278	500	P1k
8	273	800	P1k+P2(?)
9	201	2700	P3+T
10	174	-1000	J1
11	145	300	J2-3
12	66	300	K
13	10	1100	KZ
14	5	-1000	KZ
15	0	300	KZ

Примечание. Красным цветом выделены интервалы, в которых вместо накопления осадков имела место их эрозия и предполагаемые в модели эродированные мощности слоев ранее отложившихся пород – отрицательные значения. Нулевое значение мощности под границей № 1 означает отсутствие границ под ней (в модели).

Note. The red color in Table 1 shows the intervals where the accumulation of sediments was replaced by sediment erosion, and the model-inferred eroded thicknesses of the earlier deposits are negative. The zero value of the thickness beneath the boundary № 1 implies no borders thereunder (in the model).

Таблица 2. Закон изменения плотности**Table 2.** Density change dependency

Номер слоя	Мощность слоя, м	Глубина Н=0	Н=1000 м	Н=2500 м	Н=7000 м	Н=9000 м
1	0	2700	2700	2700	2700	2700
2	790	2700	2700	2700	2700	2700
3	140	2600	2600	2600	2600	2600
4	50	2500	2500	2500	2500	2500
5	100	2500	2500	2500	2500	2500
6	700	2450	2450	2450	2450	2450
7	500	2200	2200	2200	2200	2200
8	800	2450	2450	2450	2450	2450
9	2700	1900	2250	2350	2500	2520
10	-1000	1900	2250	2350	2500	2520
11	300	1900	2250	2350	2500	2520
12	300	1900	2250	2350	2500	2520
13	1100	1900	2250	2350	2500	2520
14	-1000	1900	2250	2350	2500	2520
15	300	1900	2250	2350	2500	2520

Примечание. В первом столбце – номер слоя (снизу вверх), во втором – исходная мощность (нулевое значение для первого слоя, как и в табл. 1, означает отсутствие в модели нижележащих границ), в последующих – плотность этих отложений на указанных глубинах для расчета уплотнения осадков по мере их захоронения.

Note. The first column is the number of layer (from bottom to top), the second column is the initial thickness (zero value for the first layer, as well as in Table 1, means the absence of underlying boundaries in the model), the next columns are deposit densities at specified depths for calculating the consolidation of sediments as they get buried.

куполов, как в исследуемом районе, они имеют обычно именно грибовидные формы. Однако на разрезах и карте представлена не кровля собственно насыщенного галитом неустойчивого слоя, а кровля эвапоритовой формации в целом. Можно предположить, что если верхнюю часть формации образует слой повышенной плотности, насыщенный терригенными породами и высокоплотными ангидритами или доломитами, то при развитии диапиров он будет облекать их, маскируя грибообразные формы и придавая структурам вид пальцев. Как будет видно из результатов моделирования, это предположение оправдалось. Реальным основанием для такого предположения является то, что в верхней части эвапоритовой формации Юго-Западного Прикаспия действительно выделяются толщи сульфатно-терригенного и карбонат-ангидрит-терригенного состава (см. рис. 2).

Предположение об изначальном присутствии сравнительно высокоплотного слоя толщиной в несколько сотен метров в основании эвапоритовой формации (слой № 6 в табл. 1, 2) базируется на следующих соображениях.

Хотя прикорневые зоны реальных соляных диапиров по понятным причинам остаются практически неисследованными, многочисленные физические эксперименты в центрифугах (см., например [Ramberg, 1985]) показывают изгибание вверх подошвы всплывающего слоя – вещество подстилающих горизонтов затягивается в диапир на большую или меньшую высоту в зависимости от соотношения плотности и зрелости диапира. Как показали численные эксперименты [Lunev, Lapkovsky, 2014], более глубокозалегающие слои при этом сминаются в инверсионные складки: под диапирами формируются синклинали, а под мульдами – антиклинали. Амплитуда складок может достигать первых сотен метров (при ширине, совпадающей с длиной волны развития диапиров) и затухает вниз по разрезу в интервале глубин до 1–2 км под неустойчивым слоем. Степень выраженности, амплитуда и скорость затухания инверсионной складчатости под неустойчивым слоем зависят от степени зрелости диапиров и плотности слоев, в которых она развивается.

Судя по амплитуде диапиров на изучаемой территории, можно ожидать вполне выраженного развития описанных деформаций. Однако, по данным бурения и сейсморазведки, подошва эвапоритовой формации демонстрирует сравнительно небольшие отклонения от субгоризонтального залегания, нет никаких признаков затягивания ее вверх, в диапиры. Если подошва эвапоритов является подошвой неустойчивого, насыщенного галитом всплывающего слоя, то такая ситуация (малость ее деформаций) возможна только при очень высокой плотности подстилающих слоев. Но по имеющимся данным [Volozh, Parasyna, 2008] плотность подстилающих эвапоритов пород не превышает 2700 кг/м^3 .

В связи с этим можно предположить, что подошва неустойчивого слоя расположена выше, а нижняя часть

эвапоритовой формации, так же как и верхняя, представлена сравнительно высокоплотными породами, насыщенными карбонатами или ангидритами. Это предположение также имеет реальные основания – в низах формации выделяются сульфатно-карбонатные или сульфатно-терригенные слои (см. рис. 2). О первоначальной мощности этого базального слоя эвапоритовой формации судить трудно в связи с его значительными деформациями в процессе галокинеза. В представленной модели его мощность – 700 м – подобрана так, чтобы с учетом остальных параметров итоговые вертикальные деформации его подошвы (соответствующей подошве всей эвапоритовой формации) оставались бы незначительными, в соответствии с имеющимися геолого-геофизическими данными, т.е. так, чтобы эта граница находилась вблизи уровня, разделяющего зоны согласной и инверсионной по отношению к диапирам складчатости).

Таким образом, исходное строение эвапоритовой толщи задано трехслойным: 500-метровый соленасыщенный, низкоплотный неустойчивый слой находится между двумя более плотными, сульфатно-карбонатными или сульфатно-терригенными слоями – 700-метровым внизу и 800-метровым вверху. Заметим, что такая структура формации согласуется с общими закономерностями накопления эвапоритов [Pisarenko et al., 2011, 2017, 2021a, 2021b].

Завершая описание исходной модели, следует остановиться на способе задания инициирующих возмущений, определяющих локализацию растущих диапиров и разделяющих их мульд. Известно, что общие параметры системы, такие как вязкость, соотношение мощности слоев и их плотности, определяют общие характеристики развития неустойчивости Рэлея – Тейлора – длину волны и скорость роста возмущений. Конкретная же локализация растущих возмущений (диапиров) является следствием стечения случайных обстоятельств – неровностей границ слоев и/или латеральных вариаций их плотности. Выявить реальные исходные возмущения, обусловившие наблюдаемую ныне соляно-купольную структуру, не представляется возможным. Но поскольку, в силу положительной обратной связи между распределением плотности и скоростью деформирования, начавшееся возмущение развивается очень устойчиво, то, в сущности, безразлично, от чего именно этот рост начался – важно лишь то, что он начался именно в этом месте. В связи с этим, чтобы воспроизвести наблюдаемую структуру, авторы просто задавали начальные возмущения в виде слабых ундуляций кровли неустойчивого (соленасыщенного) слоя, совпадающих в плане с современной структурой поверхности эвапоритовой формации, как она представлена на карте кровли соленосных отложений (см. рис. 3).

Вязкость среды в модели задана значением $2.5 \times 10^{20} \text{ Па}\cdot\text{с}$.

На рис. 9 и 10 приведены результаты моделирования галокинеза на указанном участке.

В итоговой структуре (см. [рис. 9](#)) собственно неустойчивый, соленасыщенный слой (№ 7 в [табл. 1, 2](#)) формирует ярко выраженные грибовидные диапиры с высоким затягиванием в них вещества подстилающего его слоя № 6 – базального слоя эвапоритов в модели, что соответствует общим закономерностям развития неустойчивости Рэлея – Тейлора. При этом кровля слоя № 8, венчающего эвапоритовую формацию в модели, облекает эти грибовидные структуры, скрывая «шляпки» диапиров и придавая им облик высокоамплитудных «пальцев». А подошва нижнего слоя эвапоритовой формации (слой № 6) слабо изгибается около одного гипсометрического уровня. Таким образом, несмотря на сложную внутреннюю структуру диапиров, рассчитанная конфигурация границ эвапоритовой формации в целом (ее кровли и подошвы) примерно соответствует той, которую видна на структурной карте кровли эвапоритов и геологических разрезов Юго-Западного Прикаспия, построенных по данным бурения и сейсморазведки.

Рассчитанная эволюция структур (см. [рис. 9](#)) характеризуется следующим. Первые заметные деформации в верхней части эвапоритовой формации с амплитудой складок по кровле неустойчивого, соленасыщенного слоя (№ 7) в первые сотни метров появляются после накопления, венчающего формацию плотного слоя (№ 8) и начала отложения осадков верхней перми. Далее, в течение почти 100 млн лет, до окончания нижней юры, эти деформации медленно растут, формируя «подушки». Накопление 2.7-километровой толщи пермско-триасовых отложений с последующей эрозией ее верхних 1000 м, по-видимому, имело своим следствием лишь заметное уплотнение терригенных отложений этого периода и соответствующее увеличение общего дефицита плотности всплывающего слоя, что могло способствовать дальнейшему ускорению роста куполов. В последующие 30 млн лет «подушки» начинают расти ускоренно, достигая к концу юры амплитуды около 2.5 км. В мелу купола подрастают к свободной поверхности и неустойчивый слой (№ 7) начинает формировать грибообразные диапиры, амплитуда которых достигает 3 км. В кайнозойе продолжается рост диапиров (до 4 км) и расширение их «шляпок» вдоль поверхности, так что местами формируются отрицательные углы наклона крыльев и карнизы даже по кровле верхнего плотного слоя эвапоритов (слой № 8), облекающего развитые грибовидные структуры внутреннего неустойчивого слоя (см. [рис. 9](#), стадия VIII; [рис. 10](#)).

Как видно из [рис. 9](#), с самого начала роста куполов мощность слоев в мульдах увеличивается, а над куполами уменьшается, так что в итоге мощность некоторых надсолевых отложений сокращается почти до нуля. Это относится и к верхнему плотному слою эвапоритов (№ 8), толщина которого на последних стадиях эволюции особенно разрастается на крыльях куполов. Отчасти это связано с конседиментационным характером развивающейся структуры, но в большей

степени все же с перераспределением вещества – его оттоком от вершин куполов в мульды. Это вполне ясно из моделей, выполненных при помощи программы «Diparig», в которой не моделируется накопление осадков, а сразу задается готовый разрез и рассчитываются его деформации (например, см. [рис. 5, 7](#)).

Границы подсолевых слоев на «подушечных» стадиях эволюции до окончания юры ([рис. 9](#), стадии I–V) изгибаются согласно надсолевым границам (с затуханием деформаций с глубиной). Начиная с мела, когда происходит ускоренный рост соляных структур и формируются диапиры, в подсолевых слоях развивается инверсионная складчатость [[Lunev, Lapkovsky, 2014](#)]. Она хорошо заметна в данной модели только по нижним из рассмотренных горизонтов, тогда как верхние, например подошва эвапоритов (подошва слоя № 6), демонстрируют сначала формирование под куполами антиклиналей, амплитуда которых затем убывает до нуля на завершающей стадии. При этом под диапирами формируются раздувы мощности нижнего слоя эвапоритов, кровля которого (она же – подошва неустойчивого, соленасыщенного слоя) высоко втягивается в растущие диапиры, а подошва, напротив, опускается.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Как видно из [рис. 9](#) (стадия VIII) и [рис. 10](#), итоговая структура участка, полученная как результат смоделированной эволюции, в общем, согласуется с реально наблюдаемой (см. [рис. 3](#)). Совпадение конфигурации структуры в плане, конечно, обусловлено указанным способом задания начальных малых возмущений. Тем не менее тот факт, что развившаяся в модели структура близко воспроизводит реальную, во-первых, подтверждает предположение о том, что реальная структура изучаемой территории сформировалась именно в результате развития неустойчивости Рэлея – Тейлора, а во-вторых, что подобранные параметры модели более-менее соответствуют действительности. О том же говорит и приблизительное соответствие рассчитанных и наблюдаемых гипсометрических отметок кровли эвапоритов на вершинах куполов и днищах мульд и общего гипсометрического положения подошвы эвапоритовой формации.

Основное отличие рассчитанной итоговой структуры кровли эвапоритов от ее представления на карте, приведенной на [рис. 3](#), заключается в более крутых крыльях антиклиналей у модели. Возможно, это неточность моделирования, но также возможно, что более пологие крылья куполов на карте являются результатом сглаживания поверхности при ее построении в результате интерполяции данных. Кроме того, можно отметить некоторые отличия в дифференцированности поверхности и кое-где в отметках ее глубины на вершинах куполов. Это, несомненно, указывает на несовершенство модели и необходимость дальнейшей работы над ней.

В рассчитанной эволюции структуры можно заметить некоторое расхождение со сделанными ранее

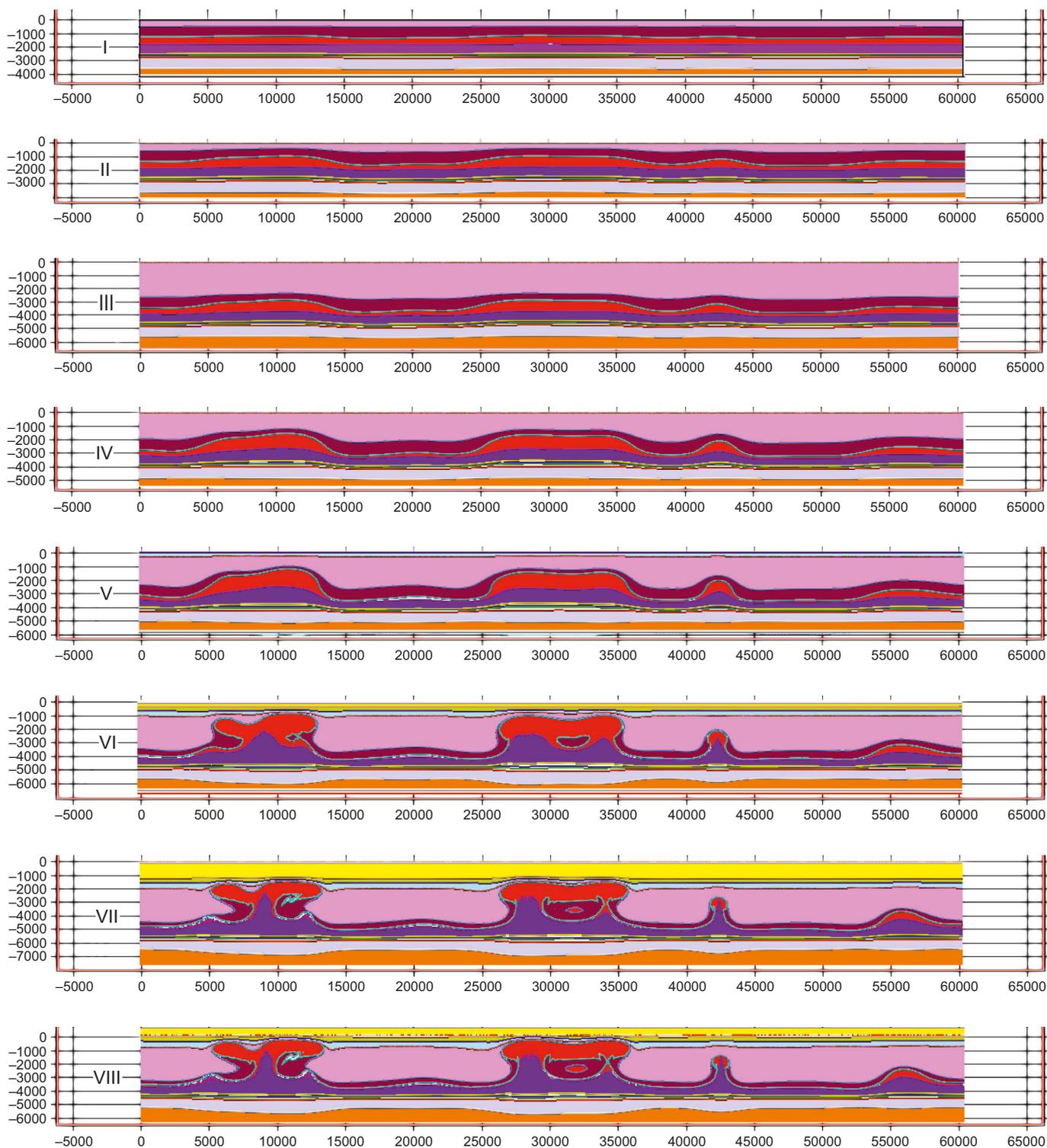


Рис. 9. Стадии рассчитанной эволюции по разрезу с запада на восток посередине выделенного участка на рис. 1.

Верхний этаж эвапоритовой толщи показан красно-коричневым цветом, нижний – темно-сиреневым. Между ними красным цветом показан соленасыщенный неустойчивый слой.

I. Возраст около 260 млн лет – накопились эвапориты, началось отложение осадков верхней перми – первые заметные деформации.

II. Продолжает накапливаться верхняя пермь – конседиментационные деформации в ней.

III. 201 млн лет – накопился пермско-триасовый комплекс (2.7 км).

IV. 174 млн лет – завершилась нижнеюрская эрозия (1 км).

V. 145 млн лет – завершилось накопление юры, заканчивается «подушечная» стадия развития куполов, начинается их ускоренный рост.

VI. 66 млн лет – завершилось накопление меловых отложений, в это время произошел основной рост куполов с формированием развитых диапиров.

VII. 10 млн лет – отложилась толща палеогена и, частично, миоцена мощностью 1.1 км.

VIII. 5 млн лет, начало плиоцена – произошел срез 1 км ранее накопленных кайнозойских отложений.

Fig. 9. Stages of the calculated evolution along the west-to-east section in the middle of the area highlighted in Fig. 1.

The upper level of the evaporite sequence is shown in red-brown, the lower – in dark lilac. The instable salt-saturated layer is shown in red therebetween.

I. About 260 Ma ago – evaporites accumulated, the Upper Permian sedimentation began – the first noticeable deformations occurred.

II. The Upper Permian continues to accumulate, with consedimentary deformations occurred therein.

III. 201 Ma ago – the 2.7-km Permian-Triassic complex has accumulated.

IV. 174 Ma ago – the 1-km Lower Jurassic erosion has completed.

V. 145 Ma ago – the accumulation of the Jurassic has completed, the “pillow” stage of the development of domes ends, and their accelerated growth starts.

VI. 66 Ma ago – the accumulation of Cretaceous deposits was completed; at that time, there occurred the main growth of domes with the formation of mature diapirs.

VII. 10 Ma ago – there was deposited the 1.1-km Paleogene and, partially, Miocene sediment layer.

VIII. 5 Ma ago, the beginning of the Pliocene epoch – there was a cut-off of the 1-km previously accumulated Cenozoic sediment.

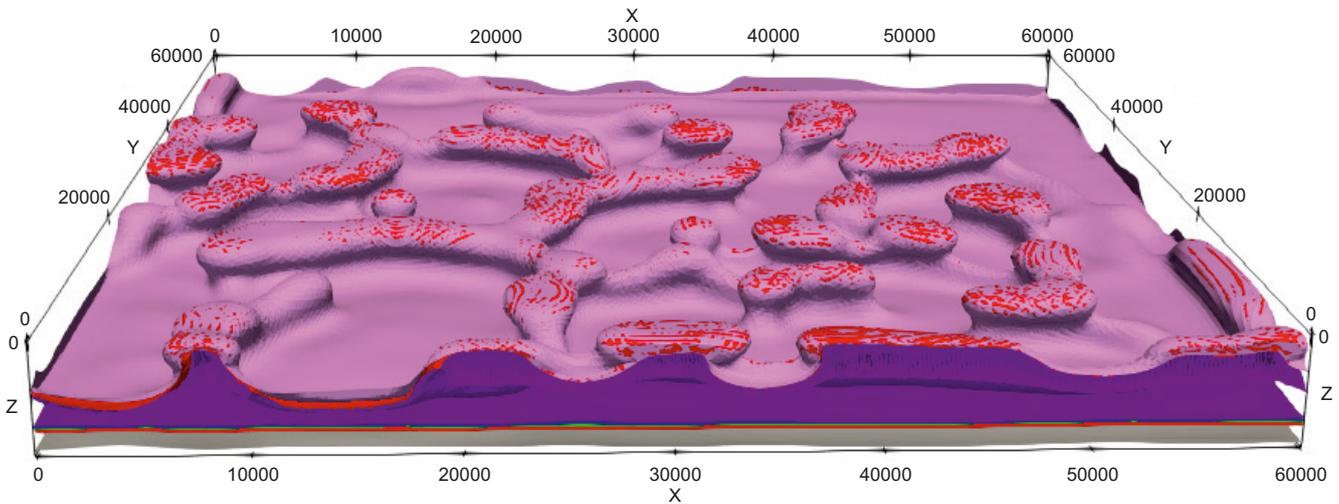


Рис. 10. Кровля эвапоритов по результатам моделирования.

Fig. 10. Top of evaporites according to the results of modeling.

выводами о высокоамплитудных галокинетических деформациях, имевших место на ранних стадиях, еще во время накопления верхнего этажа эвапоритовой формации [Antipov, Volozh, 2012]. Напомним, что по результатам моделирования, амплитуда возмущений кровли неустойчивого (среднего) слоя эвапоритов к окончанию накопления верхнего этажа формации достигает сотен метров (см. рис. 9, стадия I). Возможно, это расхождение обусловлено недостатками модели, например тем, что в ней не учитывается возможность ураганного накопления осадков верхнего этажа формации, мгновенно выравнивающего свободную поверхность. Как показано в работе [Poliakov et al., 1993], при мгновенном полном выравнивании свободной границы структуры галокинеза формируются гораздо быстрее. С другой стороны, вывод о значительных амплитудах галокинетических движений на ранних стадиях процесса, во время накопления верхнего этажа эвапоритовой формации, был сделан на основании больших вариаций его современной толщины – вплоть до исчезновения на вершинах куполов – в предположении, что они обусловлены конседиментационным

характером деформаций. Между тем это не обязательно так. Как уже обсуждалось выше и показано моделированием (см. рис. 5, 7, 9), такие изменения толщины могут происходить в результате перераспределения вещества исходно равномошного слоя в ходе постседиментационных деформаций. Во всяком случае именно такую картину изменения толщины верхнего этажа эвапоритовой формации дает представленная модель.

Заметим, что, как правило, все-таки начальная стадия галокинеза – формирование «подушек» – характеризуется очень медленным ростом возмущений [Jackson, Talbot, 1986]. Тем не менее имеет смысл в дальнейшем моделировании учесть влияние высокой скорости седиментации применительно к изучаемому району. Помимо ускоренного роста соляных куполов, в рамках такого моделирования возможно получение их результирующих столбообразных форм, независимо от облекания высокоплотными породами верхней части эвапоритовой формации [Poliakov et al., 1993].

В целом, общее приблизительное согласие модели с реальной структурой позволяет считать, что авторам

удалось воспроизвести принципиальные особенности развития галокинеза в Юго-Западном Прикаспии и выявить порождающие их причины. Моделирование показало прямую связь между литолого-стратиграфическим строением эвапоритовой формации с одной стороны и ходом галокинеза и характером порождаемых им структур – с другой.

Моделирование позволило объяснить наблюдающуюся зональность размещения типов галокинетических структур, выявив ее связь с общей исходной седиментационной мощностью галогенной формации Прикаспийского солеродного бассейна. Показано, что в зависимости от мощности неустойчивого слоя и ее соотношения с общей мощностью перекрывающих слоев развитие неустойчивости идет с разной скоростью, формируя различные типы структур, именно такие, как наблюдаются в реальности: по нарастанию относительной толщины неустойчивого слоя – псевдоштамповые складки, подушки, грибовидные диапиры и соляные массивы. Существенно, в частности, то, что этот результат делает излишними предположения о каких-либо внешних воздействиях.

Предположение об исходно трехслойном литолого-стратиграфическом строении эвапоритовой формации, с выделением в ее основании и наверху слоев с нормальной (не инверсионной) плотностью, насыщенных карбонатами и/или сульфатами, и заключенного между ними собственно неустойчивого, соленасыщенного слоя с низкой инверсионной плотностью позволило объяснить специфический характер куполов Прикаспия – пальцеобразные, несмотря на их большую амплитуду, диапиры по кровле эвапоритов с почти ровной, не втянутой высоко в диапиры подошвой. Показано, что, когда средний, неустойчивый, слой формирует классические грибовидные диапиры, более плотное вещество верхнего этажа эвапоритовой формации облекает их, растекаясь над вершинами куполов и скапливаясь на крыльях, благодаря чему весь сложенный эвапоритами купол приобретает облик «пальца». В то же самое время плотное вещество нижнего этажа формации образует под диапирами раздувы мощности, претерпевая характерные деформации верхних подсолевых слоев [Lunev, Lapkovsky, 2014], – его кровля (она же – подошва соленосного, неустойчивого слоя) втягивается высоко в диапиры, а подошва (совпадающая с общей подошвой формации) опускается под ними примерно к исходному уровню.

Надо сказать, что принятая в модели толщина этажей эвапоритовой формации (снизу вверх – 700, 500 и 800 м) выбрана более-менее произвольно, как и приписываемая им плотность. Установление реального исходного литолого-стратиграфического строения эвапоритовой толщи затруднено сильнейшими деформациями, которые она испытала в процессе галокинеза: на вершинах куполов верхний слой истончается, вплоть до исчезновения, а нижний, втягиваясь в диапиры, приобретает там субвертикальное залегание и сложно дислоцируется вместе с веществом среднего

неустойчивого слоя. В связи с этим литолого-стратиграфические разбивки, выполненные по данным каротажа пройденных в диапирах скважин, представляются сомнительными. На это указывают как каротажные исследования скважин, пробуренных в пределах крупных диапиров, так и данные сейсморазведки, говорящие о невозможности выделить в пределах куполов первичную стратиграфическую последовательность из-за сложной дислоцированности пород [Pisarenko et al., 2011, 2021a, 2021b]. Чтобы фактически выяснить этот вопрос (или, хотя бы – приблизиться к его выяснению), нужно иметь разбивку, выполненную по извлеченному керну скважины, пройденной в центре крупной мульды.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленная в настоящей работе модель имеет предварительный, оценочный характер. Ее построение имело целью выяснить принципиальные особенности процесса галокинеза в Прикаспии. В результате моделирования удалось выявить существующие здесь связи между особенностями литолого-стратиграфического строения эвапоритовой формации и характером галокинеза и поставить важные, на взгляд авторов статьи, вопросы изучения ее исходного устройства и характера образуемых ею структур.

Для ориентирования поисково-разведочных работ на углеводороды наиболее интересными результатами моделирования являются, возможно, более крутые, чем обычно предполагается, крылья эвапоритовых куполов в надсолевой толще и развитие инверсионной складчатости подстилающих эвапориты слоев, а также общая история деформаций бассейна. С крыльями куполов и особенно с карнизами, образуемыми кровлей эвапоритов, могут быть связаны небольшие (но сравнительно легкодоступные) месторождения в верхней, надсолевой, части бассейна, а исследование инверсионных складок под эвапоритами чрезвычайно интересно в связи с поисками гигантских месторождений. Поиски и разведка в подсолевых слоях связаны с дорогостоящим глубоким бурением, что требует особо тщательных предварительных и сопутствующих геолого-геофизических исследований с привлечением всех имеющихся методов. В частности, в условиях дефицита прямой информации о подсолевых объектах может оказаться весьма полезным прогноз подсолевой структуры на основании геодинамического моделирования, результаты которого следует уточнить путем отработки метода на детально разбуренном участке.

6. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

7. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Abramov T., Lavrentiev M., Lunev B., 2016. Implementation and Testing of the Fast Numerical Algorithm for Simulation of 3D Gravity Creeping Flow of Incompressible Newtonian Fluid. In: E. Pyshkin, V. Klyuev, A. Vazhenin (Eds), ICAIT-2016. Proceedings of the 2nd International Conference on Applications in Information Technology (October 6–8, 2016). The University of Aizu Press, Aizu-Wakamatsu, Japan, p. 121–124.

Abramov T.V., 2015. Massively Parallel Calculation of the Rayleigh-Taylor Instability Using the Analytical Expression of the Green's Function of the Corresponding Boundary Value Problem. *Computational Technologies* 20 (4), 3–16 (in Russian) [Абрамов Т.В. Массивно-параллельный расчет неустойчивости Релея-Тейлора с помощью аналитического выражения функции Грина соответствующей краевой задачи // Вычислительные технологии. 2015. Т. 20. № 4. С. 3–16].

Abramov T.V., Lunev B.V., 2014. Modeling of Salt Diapirism by Calculation of Three-Dimensional Creeping Currents Using CUDA® Parallel Computing Technology on GPU. *CUDA Almanac*, 10 p. (in Russian) [Абрамов Т.В., Лунёв Б.В. Моделирование соляного диапиризма расчетом трехмерных ползущих течений с использованием технологии параллельных вычислений CUDA® на GPU // CUDA альманах. 2014. 10 с.].

Abramov T.V., Lunev B.V., Lapkovsky V.V., 2018. A Software System for Modeling Evolution in a Sedimentary Basin Complicated by the Processes of Salt Tectogenesis Due to the Content of Salt-Bearing Rocks. Software Registration Certificate № RU 2018612365 of November 09, 2021. *ROSPATENT* (in Russian) [Абрамов Т.В., Лунев Б.В., Лапковский В.В. Программа для моделирования эволюции осадочного бассейна, осложненной процессами соляного тектогенеза из-за содержания соленосных пород: Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2018612365 от 16.02.2018 г. РОСПАТЕНТ, 2018].

Antipov M.P., Volozh Yu.A., 2012. Features of the Structure and Oil and Gas Content of the Post-Salt Section of the Precaspian Depression. *Oil and Gas* 1 (67), 47–71 (in Russian) [Антипов М.П., Волож Ю.А. Особенности строения и нефтегазоносность надсолевого разреза прикаспийской впадины // Нефть и газ. 2012. № 1 (67). С. 47–71].

Bakirov K.Kh., Kurmanov S.K., Chimbulatov M.A., Korkeev V.I., Ogai B.A., Chanyshiev P.Kh., Khabibullin E.G., 1992. Vertical Migration of Hydrocarbons and the Forecast of Large Prospects for the Industrial Oil and Gas Potential of the Permian-Triassic Complex of Deposits of the Precaspian Depression. *Alma-Ata – Aktyubinsk*, 215 p. (in Russian) [Бакиров К.Х., Курманов С.К., Чимбулатов М.А., Коркеев В.И.,

Огай Б.А., Чанышев Р.Х., Хабибуллин Э.Г. Вертикальная миграция углеводородов и прогноз крупных перспектив промышленной нефтегазоносности пермотриасового комплекса отложений Прикаспийской впадины // *Алма-Ата – Актыубинск*, 1992. 215 с.].

Eskozha B.A., Voronov G.V., Kuantaev N.E., Trokhimenko M.S., Shudabaev M.S., Madzhanov K.K., 2007. The Post-Salt Complex in the South of the Caspian Basin Is Still Promising for Oil and Gas Discovery. *News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences* 6, 33–49 (in Russian) [Ескожа Б.А., Воронов Г.В., Куантаев Н.Е., Трохименко М.С., Шудабаев М.С., Маджанов К.К. Надсолевой комплекс юга Прикаспийской впадины по-прежнему перспективен для обнаружения нефти и газа // *Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук*. 2007. № 6. С. 33–49].

Filippov Yu.F., Lapkovskii V.V., Lunev B.V., 2009. Numerical Modeling of Salt Tectogenesis in the Cambrian Deposits of the Cis-Yenisei Sedimentary Basin (PR3-Pz) (West Siberia). *Russian Geology and Geophysics* 50 (2), 96–103. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.08.001>.

Jackson M.P.A., Talbot C.J., 1986. External Shapes, Strain Rates and Dynamics of Salt Structures. *Geological Society of America Bulletin* 97, 305–323. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1986\)97<305:ESSRAD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1986)97<305:ESSRAD>2.0.CO;2).

Konishchev V.S., 1982. *Tectonics of Halokinesis Regions of the East European and Siberian Platforms*. Publishing House of Science and Technology, Minsk, 258 p. (in Russian) [Конищев В.С. Тектоника областей галокинеза Восточно-Европейской и Сибирской платформ. Минск: Наука и техника, 1982. 258 с.].

Konishchev V.S., Volozh Yu.A., Nurbaev B.O., 1990. Halokinesis in Secondary Saline Strata. *Doklady of the Academy of Sciences of BSSR* 34 (8), 736–739 (in Russian) [Конищев В.С., Волож Ю.А., Нурбаев Б.О. Галокинез во вторичных соленосных толщах // *Доклады АН БССР*. 1990. Т. 34. № 8. С. 736–739].

Kontorovich V.A., Lunev B.V., Lapkovsky V.V., 2019. Geological and Geophysical Characteristics of the Anabar-Khatanga Oil and Gas Region; Numerical Modeling of Salt Dome Formation Processes (Siberian Sector of the Russian Arctic). *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 459–470 (in Russian) [Конторович В.А., Лунев Б.В., Лапковский В.В. Геолого-геофизическая характеристика Анабаро-Хатангской нефтегазоносной области; численное моделирование процессов формирования соляных куполов (Сибирский сектор Российской Арктики) // *Геодинамика и тектонофизика*. 2019. Т. 10. № 2. С. 459–470]. <https://doi.org/10.5800/GT-2019-10-2-0421>.

Kontorovich V.A., Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Filippov Yu.F., 2014. Numerical Models of the Formation of Salt Tectonics Structures Identified by Seismic Exploration in the Cambrian Deposits of the Cis-Yenisei Sedimentary Basin (South-east of Western Siberia). *Geology and Mineral Resources of Siberia* 2, 105–115 (in Russian) [Конторович В.А., Лунев Б.В., Лапковский В.В., Филиппов Ю.Ф. Численные модели формирования структур соляной тектоники, выявленных сейсморазведкой в кембрийских отложениях

Предъенисейского осадочного бассейна (юго-восток Западной Сибири) // Геология и минерально-сырьевые ресурсы Сибири. 2014. № 2. С. 105–115].

Kosygin Yu.A., 1950. Salt Tectonics of Platform Areas. Gostoptekhizdat, Moscow, 248 p. (in Russian) [Косыгин Ю.А. Соляная тектоника платформенных областей. М.: Госоптехиздат, 1950. 248 с.].

Kosygin Yu.A., 1960. Types of Salt Structures in Platform and Geosynclinal Areas. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, 91 p. (in Russian) [Косыгин Ю.А. Типы соляных структур платформенных и геосинклинальных областей. М.: Изд-во АН СССР. 1960. 91 с.].

Kuandykov B.M., Matloshinsky N.G., Sentgiorgi K., Kovach A., Trokhimenko M.S., Eskozha B., Milota K., Fogarashi A., Li Yanchen, Gonts G., Turkov O.S., Nazarov M.Sh., 2011. Oil and Gas Content of the Paleozoic Shelf Margin of the North of the Precaspian Depression. Gylym Publishing House, Almaty, 280 p. (in Russian) [Куандыков Б.М., Матлошинский Н.Г., Сентгиорги К., Ковач А., Трохименко М.С., Ескожа Б., Милода К., Фогараша А., Ли Янчен, Гонц Г., Турков О.С., Назаров М.Ш. Нефтегазоносность палеозойской шельфовой окраины севера Прикаспийской впадины. Алматы: Изд-во Гылым, 2011. 280 с.].

Lunev B.V., Abramov T.V., Lapkovsky V.V., Priyemenko V.I., 2017a. An Efficient 3D Modeling of Salt Tectogenesis for Prediction Subsalt Structure. Technologies of Seismic Prospecting 3, 96–103 (in Russian) [Лунев Б.В., Абрамов Т.В., Лапковский В.В., Прийменко В.И. Высокоэффективное 3D моделирование соляного тектогенеза в целях прогноза структуры подсолевого комплекса // Технологии сейсморазведки. 2017. № 3. С. 96–103].

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., 2009. Rapid Numerical Modeling of Salt Tectonics: Possibility of Operational Use in Geological Practice. Physical Mesomechanics 12 (1), 63–74 (in Russian) [Лунев Б.В., Лапковский В.В. Быстрое численное моделирование соляной тектоники: возможность оперативного использования в геологической практике // Физическая мезомеханика. 2009. Т. 12. №1. С. 63–74].

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., 2014. Mechanism of Development of Inversion Folding in the Subsalt. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 50, 57–63. <https://doi.org/10.1134/S1069351314010066>.

Lunev B.V., Lapkovsky V.V., Kanakov M.S., Zastrozhnov A.S., 2017b. Solution of the Evolutionary Inverse Problem to Refine the Geological Structure in the Areas of Salt Tectonics. In: Marchuk Scientific Readings – 2017. Proceedings of the International Science Conference (June 25 – July 14, 2017). ICMMG SB RAS, Novosibirsk, p. 556–662 (in Russian) [Лунев Б.В., Лапковский В.В., Канаков М.С., Застрожных А.С. Решение эволюционной обратной задачи для уточнения геологической структуры в областях соляной тектоники // Марчуковские научные чтения – 2017: Труды Международной научной конференции (25 июня – 14 июля 2017 г.). Новосибирск: ИВМиМГ СО РАН, 2017. С. 557–563].

Matusevich A.V., 2005. Gravimetric Modeling of Salt-Bearing Deposits in the Precaspian Basin. The Top of Salt

Regional Model. News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences 6, 33–56 (in Russian) [Матусевич А.В. Гравиметрическое моделирование соленосных отложений Прикаспийской впадины. Региональная модель кровли соли // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2005. № 6. С. 33–56].

Matusevich A.V., 2007. Zoning of the Salt Domes of the Precaspian Depression Taking into Account the Structure of the Gravitational Field. News of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. Series of Geology and Technical Sciences 2, 26–44 (in Russian) [Матусевич А.В. Районирование соляных куполов Прикаспийской впадины с учетом структуры гравитационного поля // Известия НАН РК. Серия геологии и технических наук. 2007. № 2. С. 26–44].

Pisarenko Yu.A., Goncharenko O.P., Pisarenko V. Yu., 2021a. Structural Features of the Lower Permian Salt-Bearing Series and the Character of Salt-Tectogenesis Manifestations in the Northern and Northwestern Margins of the Caspian Depression. Paper I. Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences 21 (1), 58–64 (in Russian) [Писаренко Ю.А., Гончаренко О.П., Писаренко В.Ю. Особенности строения нижнепермской соленосной толщи и характер проявления соляного тектогенеза в северном и северо-западном обрамлении Прикаспийской впадины. Статья 1 // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 21. № 1. С. 58–64]. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-1-58-64>.

Pisarenko Yu.A., Goncharenko O.P., Pisarenko V. Yu., 2021b. Structural Features of the Lower Permian Salt-Bearing Series and the Character of Salt-Tectogenesis Manifestations in the Caspian Depression. Paper II. Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences 21 (2), 93–102 (in Russian) [Писаренко Ю.А., Гончаренко О.П., Писаренко В.Ю. Особенности строения нижнепермской соленосной толщи и характер проявления соляного тектогенеза в северном и северо-западном обрамлении Прикаспийской впадины. Статья II // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2021. Т. 21. № 2. С. 93–102]. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-2-93-102>.

Pisarenko Yu.A., Pisarenko V. Yu., Dunaeva M.N., 2017. Stratigraphical, Lithological-Facies and Structural Relationships of Salt-Bearing Rocks of Different Ages and Their Role in the Manifestation of Processes of Salt Tectogenesis, Forecasting the Structure of the Subsalt Bed within the Sol-Iletsk Dome. Interior of Povolzhye and Pricaspian Region 90, 3–10 (in Russian) [Писаренко Ю.А., Писаренко В.Ю., Дунаева М.Н. Стратиграфические, литолого-фациальные и структурные соотношения разновозрастных соленосных пород и их роль в проявлении процессов соляного тектогенеза, прогнозе структуры подсолевого ложа в пределах Соль-Илецкого свода // Недра Поволжья и Прикаспия. 2017. Вып. 90. С. 3–10].

Pisarenko Yu.A., Pisarenko V. Yu., Kireenko O.S., Goncharenko O.P., 2011. Model of Permian Stage of Salt Accumulation of South-Eastern Part of Russian Plate and Its Significance for Exploring Fields of Oil and Gas and Different

Types of Mineral Resources. *Geology and Oil and Gas* 1, 44–52 (in Russian) [Писаренко Ю.А., Писаренко В.Ю., Киренко О.С., Гончаренко О.П. Модель пермского этапа соленаккопления юго-восточной части Русской плиты и ее значение для поиска месторождений нефти и газа и различных видов полезных ископаемых // Геология и нефти и газа. 2011. № 1. С. 44–52].

Poliakov A.N.B., van Balen R., Podladchikov Yu., Daudre B., Cloetingh S., Talbot C., 1993. Numerical Analysis of How Sedimentation and Redistribution of Surficial Sediments Affects Salt Diapirism. *Tectonophysics* 226 (1–4), 199–216. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(93\)90118-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(93)90118-4).

Ramberg H., 1985. Gravity and Deformation in the Earth's Crust. Nedra, Moscow, 399 p. (in Russian) [Рамберг Х. Сила тяжести и деформации в земной коре. М.: Недра, 1985. 399 с.].

Tikhvinsky I.N., 1974. Stratigraphy and Potassium-Bearing Horizons of the Kungur of the Precaspian Syncline. *Soviet Geology* 5, 44–54 (in Russian) [Тихвинский И.Н. Стратиграфия и калиеносные горизонты кунгура Прикаспийской синеклизы // Советская геология. 1974. № 5. С. 44–54].

Volozh Yu.A., 1971. Methodology for Studying the Regional Structure of the Precaspian Basin in Order to Identify Zones of Oil and Gas Potential (Based on the Volumetric Method of Power Analysis). Brief PhD Thesis (Candidate of Geology and Mineralogy). Moscow, 25 p. (in Russian) [Волож Ю.А. Методика изучения региональной структуры Прикаспийской впадины с целью выделения зон нефтегазоносности (на основе объемного метода анализа мощностей): Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М., 1971. 25 с.].

Volozh Yu.A., Konishchev V.S., 1989. Tectonic Zonality of Salt Structures in Areas of Halokinesis. *Doklady of the Academy of Sciences of BSSR* 33 (9), 832–836 (in Russian) [Волож Ю.А., Конищев В.С. Тектоническая зональность соляных структур областей галокинеза // Доклады АН БССР. 1989. Т. 33. № 9. С. 832–836].

Volozh Yu.A., Lipatova V.V., Bukina T.F., Yanochkina Z.A., 2000. Features of the Structure of the Upper Permian Deposits of the South and Southeast of the Precaspian Depression. *Interior of Povolzhye and Pricaspian Region* 22, 10–22 (in Russian) [Волож Ю.А., Липатова В.В., Букина Т.Ф., Яночкина З.А. Особенности строения верхнепермских отложений юга и юго-востока Прикаспийской впадины // Недра Поволжья и Прикаспия. 2000. Вып. 22. С. 10–22].

Volozh Yu.A., Miletenko N.V., Kuantaev N.E., Lipatova V.V., 1997a. Prospects for the Development of Oil and Gas Prospecting in the Post-salt Complex of the Precaspian Depression. *Interior of Povolzhye and Pricaspian Region* 14, 7–11 (in Russian) [Волож Ю.А., Милетенко Н.В., Куантаев Н.Е., Липатова В.В. Перспективы развития нефтегазописковых работ в надсолевом комплексе Прикаспийской впадины // Недра Поволжья и Прикаспия. 1997. Вып. 14. С. 7–11].

Volozh Yu.A., Parasyna V.S. (Eds), 2008. Astrakhan Carbonate Massif: Structure and Oil and Gas Potential. Nauchnyi Mir, Moscow, 221 p. (in Russian) [Астраханский карбонатный массив: Строение и нефтегазоносность // Ред. Ю.А. Волож, В.С. Парасына. М.: Научный мир, 2008. 221 с.].

Volozh Yu.A., Talbot C.J., Ismail-Zadeh A.T., 2003. Salt Structures and Hydrocarbons in the Pricaspian Basin. *AAPG Bulletin* 87 (2), 313–334. DOI:10.1306/09060200896.

Volozh Yu.A., Volchegursky L.F., Groshev V.G., Shishkina T.Yu., 1997b. Types of Salt Structures in the Precaspian Depression. *Geotectonics* 31 (3), 204–217.

Volozh Yu.A., Votsalevsky E.S., Zhivoderov A.B., Nurbaev B.O., Pilifosov V.M., 1989. Problems of Oil and Gas Potential of Post-Salt Deposits of the Precaspian Depression. *Bulletin of the Kazakh SSR Academy of Sciences. Geological Series* 4, 3–15 (in Russian) [Волож Ю.А., Воцалевский Э.С., Живодеров А.Б., Нурбаев Б.О., Пилифосов В.М. Проблемы нефтегазоносности надсолевых отложений Прикаспийской впадины // Известия АН КазССР. Серия геологическая. 1989. № 4. С. 3–15].

Yatskevich S.V., Markina N.N., Taskinbaev K.M., Alzhonov A.A., 1990. Stratigraphic Section in the Superimposed Trough of the Karakuduk Dome. *Geology of Oil and Gas* 7, 36–39 (in Russian) [Яцкевич С.В., Маркина Н.Н., Таскинбаев К.М., Альжанов А.А. Стратиграфический разрез в наложенной мульде купола Каракудук // Геология нефти и газа. 1990. № 7. С. 36–39].

Zholtaev G.Zh., 1966. Morphological Types of Salt Accumulation in the Eastern Part of the Caspian Depression. *Oil and Gas Geology and Geophysics* 2, 15–21 (in Russian) [Жолтаев Г.Ж. Морфологические типы скопления соли в восточной части Прикаспийской впадины // Нефтегазовая геология и геофизика. 1966. № 2. С. 15–21].

Zhuravlev V.S., 1963. Types of Salt Domes in the Precaspian Depression. In: N.P. Kheraskov (Ed.), *Problems of Regional Tectonics of Eurasia*. Publishing House of the USSR Academy of Science, Moscow, p. 162–201 (in Russian) [Журавлев В.С. Типы соляных куполов Прикаспийской впадины // Проблемы региональной тектоники Евразии / Ред. Н.П. Херасков. М.: Изд-во АН СССР, 1963. С. 162–201].

Zhuravlev V.S., 1964. Comparative Tectonics of the Pechora, Precaspian and North Sea Exogonal Depressions of the European Platform. *Proceedings of the Geological Institute of the USSR Academy of Science*. Iss. 232. Nedra, Moscow, 397 p. (in Russian) [Журавлев В.С. Сравнительная тектоника Печорской, Прикаспийской и Североморской экзогональных впадин Европейской платформы // Труды ГИН АН СССР. М.: Недра, 1964. Вып. 232. 397 с.].

Zhuravlev V.S., 1966. Classification of Local Structures of the Precaspian Depression. In: *Materials on Geology and Minerals of the Western Kazakhstan*. Nauka, Alma-Ata, p. 110–116. (in Russian) [Журавлев В.С. Классификация локальных структур Прикаспийской впадины // Материалы по геологии и полезным ископаемым Западного Казахстана. Алма-Ата: Наука, 1966. С. 110–116].