

© В.В. ПЫХАЛОВ

Астраханский государственный технический университет
viktor.pihalov@yandex.ru

УДК 551.24:553.55

РАССЛОЕННОСТЬ КОНСОЛИДИРОВАННОЙ КОРЫ АСТРАХАНСКОГО СВОДА

CONSOLIDATED CRUST LAYERING OF ASTRAKHAN ARCH

АННОТАЦИЯ. В толще консолидированной коры Астраханского свода по данным сейсмических исследований выявлены энергетически выраженные разнонаклоненные отражатели, природа которых неясна. Морфологически расслоенность консолидированной коры проявляется в виде глубоких внутрикоровых мульд и «диапиров». В гравитационном поле внутрикоровые «диапиры» характеризуются положительными аномалиями поля силы тяжести.

Построенная модель расслоенности консолидированной коры Астраханского свода показывает, что ее формирование связано с влиянием интенсивных напряжений сжатия и последующего внедрения нижней коры в верхнюю вследствие деформаций ползучести. Исследования морфологии палеозойского осадочного чехла, литофациальный анализ, а также выполненные палеорекострукции указывают, что время формирования расслоенности консолидированной коры относится к раннепермскому. Следовательно, процессы формирования внутрикоровой расслоенности оказали значимое влияние на вторичные преобразования порового и трещинного пространства пород коллекторов, слагающих допермский Астраханский карбонатный массив.

Данные бурения, в том числе и исследования кернового материала по витриниту, указывают на существование связи между морфологией нижней коры и распределением пластов коллекторов в девонско-каменноугольном разрезе Астраханского свода. Эта связь проявляется в резком уменьшении доли коллекторов в башкирском разрезе и их увеличением в нижележащих отложениях над участками распространения сводов внутрикоровых «диапиров». Выявленная закономерность может быть использована при планировании геологоразведочных работ на нефть и газ.

SUMMARY. According to the seismic data, energetically expressed reflectors with different gradients of unclear nature are found out in the consolidated crust formation of Astrakhan Arch. Morphological layering of consolidated crust is manifested in the form of deep intracrustal troughs and «diapirs». Intracrustal 'diapirs' are characterized by positive anomalies of the gravity in the gravity field.

The constructed model of consolidated crust layering of Astrakhan Arch shows that its formation is due to the influence of intense compressive stresses and the subsequent intrusion of the lower crust to the top due to creep deformation. The study of the Paleozoic sedimentary cover morphology, lithofacies analysis, and paleoreconstruction indicate that the formation of the consolidated crust layering refers to the Early Permian. Consequently, the formation of intracrustal layering had a significant impact on the secondary conversion of pore space rocks and fractured reservoirs composing before Permian Astrakhan carbonate array.

Drilling data, including studies of core material on vitrinite indicate the link between the morphology of the lower crust and the distribution of reservoir beds in Devonian-Carboniferous section of Astrakhan Arch. This link is manifested in sharp decrease

of collectors in Bashkir section and their increase in the underlying sediments spread over the arches of intracrustal «diapirs». The identified pattern can be used while planning oil and gas exploration.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА. Астраханский свод, пластические деформации, деформации ползучести, консолидированная кора, расслоенность консолидированной коры.

KEY WORDS. Astrakhan Arch, consolidated crust, plastic deformation, creep deformation, consolidated crust, consolidated crust layering.

Астраханский свод, в пределах которого расположен одноименный карбонатный массив, представляет собой крупную положительную структуру, расположенную в юго-западной части Прикаспийской впадины. Консолидированная кора свода по данным сейсмических исследований имеет двухслойное строение (рис. 1). Верхняя кора характеризуется акустически прозрачной средой. Нижняя кора расслоена и проявляется в виде энергетически выраженных разнонаклоненных осей синфазности [1], которые образуют крупные внутрикоровые мульды и «диапиры». Расслоенность консолидированной коры, установленная во многих нефтегазоносных регионах мира [2], [3], [4], может иметь различную природу [5]. Выяснение природы расслоенности консолидированной коры Астраханского свода определяет актуальность настоящей работы.

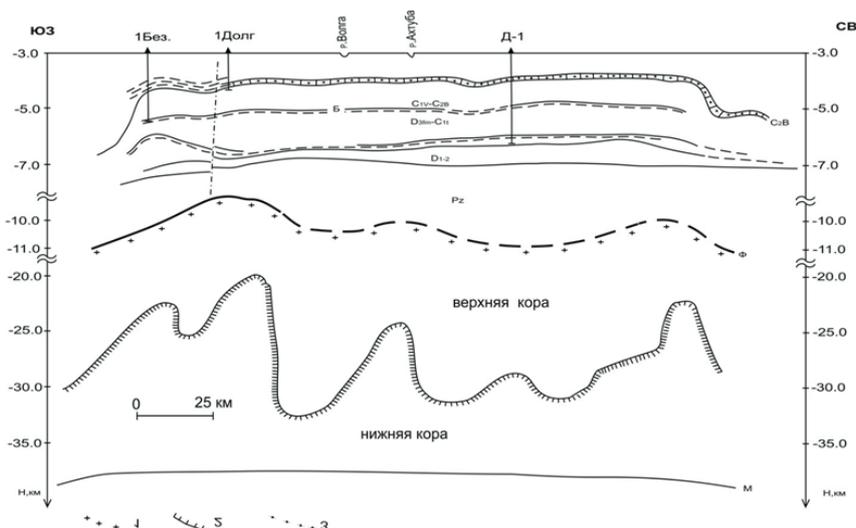


Рис. 1. Геолого-геофизический разрез земной коры Астраханского свода: 1 — кровля консолидированной коры; 2 — кровля нижней коры; 3 — глинистые отложения. Положение разреза показано на рис. 2.

Выявленные в толще консолидированной коры Астраханского свода внутрикоровые «диапиры» имеют амплитуду более 19 км, и в плане образуют систему линеаментов, которые субпараллельны шовной зоне Скифской плиты и юго-западной периферии Прикаспийской впадины, маркируемой складчатым основанием кряжа Карпинского.

Выполненные морфологический и палеоструктурный анализы указывают на отсутствие взаимосвязей между внутрикоровой расслоенностью и условиями седиментации палеозойских допермских отложений Астраханского свода. Это,

в свою очередь, доказывает послекламенноугольное время появления внутрикоревой расслоенности.

Фаза складкообразования в зоне сочленения юго-запада Прикаспийской впадины и Скифской плиты, начавшаяся со второй половины сакмарского и завершившаяся во второй половине кунгурского веков, характеризовалась значительной интенсивностью [6], [7]. Следствием этих тектонических событий явилось формирование складчатого основания кряжа Карпинского, его надвигание на Астраханский свод, формирование сложнопостроенной зоны покрово-надвиговых дислокаций в пределах южной периферии Астраханского свода. Формирование таких крупных структур сжатия возможно под влиянием значительных напряжений (от 0.3 до 0.51 ГПа, [3,8]), которые должны были отразиться и на строении консолидированной коры Астраханского свода.

Для оценки величины напряжений (σ_c), необходимых для инициации внутрикоревой складчатости, воспользуемся двухслойной моделью строения кристаллического фундамента с изначально субгоризонтальным и субпараллельным залеганием верхней и нижней коры. В этом случае толщина нижней коры должна составлять порядка 11 км. Для расчетов примем следующие параметры нижней коры [9], [10]: модуль Юнга $E = 0,5 \cdot 10^6$ Па; коэффициент Пуассона $\sigma = 0,25$; плотность $\rho_m = 2,9$ г/см³. Для верхней коры плотность $\rho_g = 2,7$ г/см³.

Согласно [9], в соответствии с выражением 1, расчетное напряжение, необходимое для инициации внутрикоревой складчатости, составит 0.54 Гпа.

$$\sigma_c = \left(\frac{E(\rho_m - \rho_g)g}{3(1 - \sigma^2)} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (1)$$

где: g — ускорение свободного падения — 10 м/с².

Выполненные расчеты показывают, что напряжения сжатия, приведшие к значительным морфологическим изменениям в осадочном чехле Астраханского свода, могли обусловить внутрикоревую складчатость.

В соответствии с [11], согласно выражению 2, при заданных выше параметрах среды амплитуда формирующихся складок (W_0) составит менее 100 м.

$$W_0 = \frac{h}{\frac{\rho_g}{\rho_m} - 1 + J}, \quad (2)$$

где: D — изгибная жесткость пластины, $\rho_m = 2,9$ г/см³ — ее плотность, параметр J определится из выражения:

$$J = 2\pi \left(\frac{D}{\rho_m g} \right)^{0,25}. \quad (3)$$

Таким образом, в результате сжатия могли быть сформированы малоамплитудные складки в нижней коре. Это позволяет предположить, что дальнейшие процессы формирования расслоенности коры были связаны с подъемом нижнекорового вещества на высоту порядка 8 км относительно первоначального горизонтального уровня вследствие либо пластичного внедрения, либо деформаций ползучести.

Пластичное внедрение нижней коры характеризуется высокой скоростью (от десятков до сотен метров в год) и требует разогрева пород нижней коры до температуры в 1 000 °С и более.

Повышение температуры в нижней коре могло быть вызвано подходом высокотемпературной мантии. Косвенно приток к подошве нижней коры высокотемпературной мантии подтверждается подъемом свода в позднекаменноугольное время [12].

Величину палеопрогрева башкирских отложений, обусловленную влиянием внутрикорового «диапира», оценим на основе решения задачи распределения температуры вокруг внедряющегося тела, полученного Д. Егером [13]. Исходные данные для расчета следующие: температура (T) в толще «диапира» постоянна; движение летучих компонентов и конвекция в теле «диапира» отсутствует; толщина «диапира» в своде (H) составляет 19-20 км; глубина (Z) его залегания относительно кровли отложений башкирского яруса 10-13 км. В этом случае палеотемпература (t) для башкирских отложений, согласно графику зависимости $\frac{Z}{H}(t)$, приведенного в работе [14], составит от 160 до 250°С.

Результаты исследований пород башкирского яруса по витриниту [15] показали, что максимальная их палеотемпература, обусловленная влиянием внутрикоровых «диапиров», не превышала 140 °С (скв. 2-Долгожданная). Кроме того, «быстрое» внедрение нижней коры неизбежно привело бы к появлению зон дислокаций, крупных антиклиналей в толще осадочного чехла над сводами внутрикоровых «диапиров», что не подтверждается данными сейсморазведки. Следовательно, пластичное внедрение высокотемпературной нижней коры в верхнюю маловероятно.

Малая скорость внедрения нижней коры (на порядок меньше, чем при пластичном внедрении) и ее сравнительно невысокая температура могут быть обеспечены деформациями ползучести.

Реализация таких деформаций требует, прежде всего, наличия постоянно действующих напряжений на протяжении всего периода «роста» внутрикоровых «диапиров». Скорость таких деформаций зависит от термобарических и ряда других условий [8].

При длительности нижнепермской тектонической активности в 13 млн лет скорость «роста» внутрикоровых «диапиров» составила 0,6 мм/год, что возможно исключительно при деформациях ползучести.

Внедрение нижней коры за счет деформаций ползучести не привело к значительным деформациям осадочного чехла, но нашло свое отражение в интенсивности вторичных преобразований карбонатных пород, залегающих над участками распространения сводов внутрикоровых «диапиров».

Палеотемпература пород, слагающих башкирский разрез, в пределах участков распространения внутрикоровых мульд близка к современной (106-109°С) [15]. В этом случае над участками распространения сводов внутрикоровых «диапиров» палеотемпература пород, слагающих башкирские отложения на 30°С была выше, чем для остальной территории свода.

Такой перепад температуры способствовал усилению вертикальной миграции агрессивных флюидов (минерализованной воды, газов), которые при своем движении растворяли кальцит и формировали каверны в добашкирских породах. Поступая в кровлю карбонатного массива, в породы башкирского яруса, эти

высокоминерализованные растворы приводили к инкрустации порового и трещинного пространства кальцитом (в отдельных случаях — доломитом и др.). Освободившаяся вода диффундировала в вышележащие терригенные сакмаро-артинские отложения.

Следствием вышеописанного процесса должно являться снижение фильтрационно-емкостных свойств пород, слагающих башкирские отложения над участками распространения сводов внутрикоровых «диапиров» и наличие повышенной кавернозности в нижележащих отложениях. При этом для пород, сформированных в различных литофациальных зонах, интенсивность вторичной преобразованности их порово-трещинного пространства будет различна. Данные бурения подтверждают этот вывод.

Для карбонатных пород башкирского яруса, сформированных в зоне накопления мелководно-морских фаций шельфа карбонатной платформы в условиях пассивного гидрорежима (рис. 2), и вскрытых скважинами 1, 200 Николаевские, 1-Безымянная, 5, 5, 7, 14 Ю-А и др. в пределах территории распространения сводов внутрикоровых «диапиров» относительная толщина эффективных пластов коллекторов не превышает 3%. Для этой же зоны характерно увеличение относительной эффективной толщины пластов коллекторов в добашкирских каменноугольных отложениях. В ряде разрезов в визейской толще выявлены отдельные интервалы мощностью более 30 м, где породы характеризуются высокой кавернозностью.

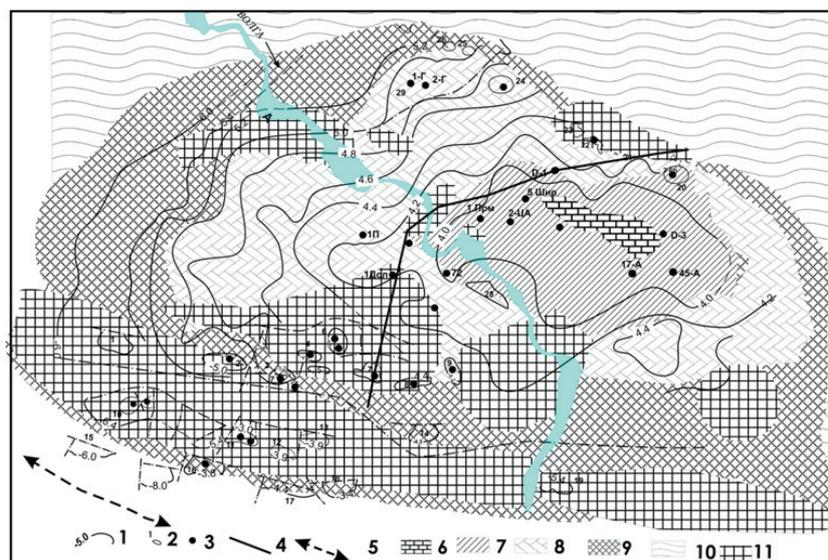


Рис. 2. Литофациальная модель башкирских отложений Астраханского свода:

- 1 — изогипсы по кровле башкирских отложений; 2 — антиклинальные структуры; 3 — скважины глубокого бурения; 4 — линия сейсмогеологического разреза; 5 — ось складчатого основания кряжа Карпинского; Литофации: 6 — мелководно-морские фации, сформированные в активной гидродинамической обстановке, 7 — мелководно-морские фации, сформированные в активной нестабильной гидродинамической обстановке, увеличенное содержание обломочного материала, 8 — мелководно-морские фации, сформированные в условиях пассивного гидрорежима, повышенное содержание обломочного и детритового карбонатного материала, наличие терригенных пропластков, 9 — склоновые фации, 10 — глубоководные, депрессионные фации котловины; 11 — область распространения внутрикоровых «диапиров» толщиной более 19 км

Для скважин, вскрывших башкирские отложения в этой же литофациальной зоне вне участков распространения сводов внутрикоровых «диапиров» (скважины 1Прав, 1-Г, 2-Г и др.), относительная эффективная толщина пластов коллекторов в башкирских отложениях изменяется от 11 до 22%.

Для башкирских отложений, вскрытых в зоне развития склоновых фаций над участком распространения свода внутрикорового «диапира» (скв. 3-Зав., 61-Зав.) относительная эффективная толщина пластов коллекторов составляет порядка 6% (скважины вскрыли разрез в пределах склона внутрикорового «диапира»). В то же время башкирский разрез, вскрытый скважиной 1-Х (расположенной в этой же литофациальной зоне), характеризуется относительной эффективной толщиной пластов коллекторов более 9%.

Аналогичная картина отмечается и в пределах других литофациальных зон.

Приведенные в статье расчеты носят достаточно упрощенный характер и имеют своей целью показать принципиальную возможность образования расслоенности консолидированной коры Астраханского свода вследствие первоначальной складчатости и последующих деформаций ползучести.

Следствием из построенной модели внутрикоровой расслоенности является зональность в распределении коллекторских свойств пород, слагающих Астраханский карбонатный массив, отличающаяся от литофациальной. Такая зональность проявляется в резком уменьшении доли коллекторов в башкирском разрезе и их увеличением в нижележащих отложениях над участками распространения сводов внутрикоровых «диапиров». Выявленная закономерность может быть использована при планировании геологоразведочных работ на нефть и газ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бродский А.Я., Воронин Н.И., Миталев И.А. Модель глубинного строения зоны сочленения кряжа Карпинского и Астраханского свода // Отечественная геология. 1994. № 4. С. 50-53.
2. Леонов Ю.Г. Платформенная тектоника в свете представлений о тектонической расслоенности кристаллического фундамента // Геотектоника. 1991. № 6. С. 3-20.
3. Павленкова Н.И. Развитие представлений о сейсмических моделях кристаллического фундамента // Геофизика. 1996. № 4. С. 11-19.
4. Трофимов В.А. Глубинные сейсмические исследования МОВ-ОГТ на геотраверсе Татсейс-2003, пересекающем Волго-Уральскую нефтегазоносную провинцию // Геотектоника. 2006. № 4. С. 3-20.
5. Леонов М.Г. Тектоника консолидированной коры и нефтегазоносность кристаллических пород // М-лы 38-го тектонического совещания. М.: Геос, 2005. С. 386-390.
6. Волож Ю.А., Антипов М.П., Леонов Ю.Г., Морозов А.Ф., Юров Ю.А. Строение кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1. С. 28-43.
7. Писаренко Ю.А. Позднепалеозойская тектоно-седиментационная модель Прикаспийского региона и ее значение для определения геолого-разведочных работ на нефть и газ: Автореф. дисс. д-ра геол.-минерал. наук. Саратов, 2005. 50 с.
8. Polyansky, J.P., Babichev, A.B., Reverdatto, V.V., Korobeynikov, S.N. Computer Modeling of Granite Gneiss Diapirism in the Earth's Crust: Controlling Factors, Duration, and Temperature Regime // Petrology. 2010. Vol. 18. №. 4. Pp. 432-446.
9. Лобковский Л.И. Геодинамика зон спрединга, субдукции и двухъярусная тектоника плит. М.: Наука, 1988. 252 с.
10. Бродский А.Я., Пыхалов В.В., Лыгин В.А., Пьянков В.Я. Выделение зон повышенной трещиноватости в карбонатном разрезе по данным сейсмо- и гравиразведки // Геофизика. 2011. № 3. С. 57-63.

11. Теркот Д., Шуберт Дж. Геодинамика. В 2-х т. Т. 1 / Пер. с англ. М.: Мир, 1985. 376 с.
12. Воронин Н.И. Особенности геологического строения и нефтегазоносность юго-западной части Прикаспийской впадины. Астрахань: Изд-во АГТУ, 2004. 163 с.
13. Jaeger, J.S. Temperature outside a cooling intrusive sheet // Amer. J Sci. 1959. № 1. Pp. 44-54.
14. Оровецкий Ю.П., Кутас Р.И., Болюбах К.А. Связь теплового режима кристаллического фундамента и анатексиса с глубинными магматическими диапирами // В кн.: Принципы и методы сопоставления данных геотермии и палеогеотермического анализа. М.: Наука, 1980. С. 38-53.
15. Бочкарев А.В., Бочкарев В.А. Катагенез и прогноз нефтегазоносности недр. М.: ВНИИОЭНГ, 2006. 324 с.

REFERENCES

1. Brodskii, A.Ia., Voronin, N.I., Mitalev, I.A. Deep structure model of the junction zone of the Karpinsky Ridge and Astrakhan Arch. *Otechestvennaia geologiya — Native Geology*. 1994. № 4. Pp. 50-53. (in Russian).
2. Leonov, Iu.G. Platform tectonics in the light of ideas about tectonic delamination of the crystalline basement. *Geotektonika — Geotectonics*. 1991. № 6. Pp. 3-20. (in Russian).
3. Pavlenkova, N.I. Knowledge about the seismic models of the crystalline basement. *Geofizika — Geophysics*. 1996. № 4. Pp. 11-19. (in Russian).
4. Trofimov, V.A. Deep seismic studies by CMP-CDP on Tatseys-2003 geotraverse crossing the Volga-Ural oil and gas province. *Geotektonika — Geotectonics*. 2006. № 4. Pp. 3-20. (in Russian).
5. Leonov, M.G. Tectonics of consolidated crust and petroleum potential of crystalline rocks // *M-ly 38-go tektonicheskogo soveshchaniia* [Proceedings of the 38th meeting on tectonics]. Moscow, 2005. Pp. 386-390. (in Russian).
6. Volozh, Iu.A., Antipov, M.P., Leonov, Iu.G., Morozov, A.F., Iurov, Iu.A. et al. Structure of the Karpinsky Ridge. *Geotektonika — Geotectonics*. 1999. № 1. Pp. 28-43. (in Russian)
7. Pisarenko, Iu.A. *Pozdnepaleozoiskaia tektono-sedimentatsionnaia model' Prikaspiiskogo regiona i ee znachenie dlia opredeleniia geologo-razvedochnykh rabot na nefi' i gaz* (Avtoref. diss. dokt.) [Late Paleozoic tectonic and sedimentary model of the Caspian region and its significance for the determination of oil and gas exploration (Doct. Diss. thesis)]. Saratov, 2005. 50 p. (in Russian).
8. Polyansky, J.P., Babichev, A.B., Reverdatto, V.V., Korobeynikov, S.N. Computer Modeling of Granite Gneiss Diapirism in the Earth's Crust: Controlling Factors, Duration, and Temperature Regime. *Petrology*. 2010. Vol. 18. № 4. Pp. 432-446.
9. Lobkovskii, L.I. *Geodinamika zon spreadinga, subduksii i dvukhsiarusnaia tektonika plit* [Geodynamics of spreading zones, subduction and plate tectonics bunk]. Moscow, 1988. 252 p. (in Russian).
10. Brodskii, A.Ia., Pykhalov, V.V., Lygin, V.A., P'iankov, V.Ia. Isolation of excessive fissuring zones in carbonate section according to seismic and gravity measurements. *Geofizika — Geophysics*. 2011. № 3. Pp. 57-63. (in Russian).
11. Terkot, D., Shubert, G. *Geodinamika. V 2-kh t. T. 1* [Geodynamics. In 2 Vol. Vol. 1]. / Transl. fr. Eng. Moscow, 1985. 376 p. (in Russian).
12. Voronin, N.I. *Osobennosti geologicheskogo stroeniia i neftegazonosnost' iugo-zapadnoi chasti Prikaspiiskoi vpadiny* [Geological structure and petroleum potential of the south-western part of the Caspian Basin]. Astrakhan, 2004. 163 p. (in Russian).
13. Jaeger, J.S. Temperature outside a cooling intrusive sheet. *Amer. J Sci*. 1959. № 1. Pp. 44-54.
14. Orovetskii, Iu.P., Kutas, R.I., Boliubakh, K.A. The link of the thermal regime of the crystalline basement and anatexis with deep magmatic diapirs // *Printsipy i metody*

sopostavleniia dannykh geotermii i paleogeotermicheskogo analiza [Principles and methods of comparison of geothermic data and paleo-geothermal analysis]. Moscow, 1980. Pp. 38-53. (in Russian).

15. Bochkarev, A.V., Bochkarev, V.A. *Katagenez i prognoz neftegazonosnosti nedr* [Catagenesis and subsurface petroleum potential forecast]. Moscow, 2006. 324 p. (in Russian).

Автор публикации

Пыхалов Виктор Владимирович — доцент кафедры геологии нефти и газа Астраханского государственного технического университета, кандидат технических наук

Author of the publication

Victor V. Pykhalov — Cand. Sci. (Techn.), Associate Professor, Geology of Oil and Gas Department, Astrakhan State Technical University (Astrachan)