



УДК 622.276:574

## ОСОБЕННОСТИ СЛАНЦЕВЫХ ФОРМАЦИЙ: ПРОТЯЖЕННЫЕ ЛОВУШКИ И ОБОГАЩЕННОСТЬ РУДНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

### FEATURES OF SHALE FORMATIONS: EXTENDED TRAPS AND ENRICHMENT OF ORE ELEMENTS

**Пуланова Светлана Александровна**

доктор геол.-мин. наук,  
старший научный сотрудник,  
ведущий научный сотрудник,  
Институт проблем нефти и газа РАН  
punanova@mail.ru

**Punanova Svetlana Alexandrovna**

Doctor of Geol.-Min. Sciences  
Senior Researcher,  
Leading Researcher,  
Institute of Oil and Gas Problems of the RAS  
+7-499-135-72-21  
punanova@mail.ru

**Аннотация.** В статье рассмотрены особенности сланцевых формаций, связанные с их обогащенностью рудными элементами и строением ловушек нетрадиционного типа. Сланцевый характер отложений и частое чередование более плотных и менее плотных пород – накопителей и производителей углеводородов (УВ), приводят к трудностям дешифровки в их строении собственно нефтематеринских (с остаточной нефтью) и продуктивных прослоев тонких протяженных ловушек. Приведены средние содержания микроэлементов (МЭ), в том числе потенциально токсичных элементов (ПТЭ), в сланцах различных сланценосных бассейнах мира; отмечены концентрации ряда элементов, значительно превышающие кларковые содержания для глинистых пород. Поступление ПТЭ в окружающую среду значительно увеличивается в результате теплового воздействия на пласт. Оно имеет место при разработке подобных месторождений горючих ископаемых методом горизонтального бурения и гидроразрыва пласта (ГРП), а также при некоторых процессах переработки УВ сырья. Исходя из этого, необходимо учитывать экологические риски последствия разработки сланцевых формаций в связи с высокими содержаниями в них Fe, As, Be, Cl, Co, Cr, F, Hg, Mn, Ni, Pb, Sr, Sb, Se, Tl, V, Zn, U, Th и других элементов.

**Annotation.** The report examines the features of shale formations associated with their enrichment in ore elements and the structure of unconventional traps. The shale nature of the deposits and the frequent alternation of denser and less dense rocks – reservoirs and producers of hydrocarbons, lead to difficulties in deciphering in their structure the actual oil source (with residual oil) and productive layers of unconformity subtle traps. The average contents of trace elements, including potentially toxic elements (PTE), in shales of various shale basins of the world are given; the concentrations of a number of elements were noted, significantly exceeding the clark contents for clay rocks. The release of PTE into the environment is significantly increased as a result of thermal impact on the formation. It takes place in the development of such deposits of fossil fuels by the method of horizontal drilling and hydraulic fracturing, as well as in some processes of conversion hydrocarbon raw materials. Based on this, it is necessary to take into account the environmental risks of the consequences of the development of shale formations due to the high contents of Fe, As, Be, Cl, Co, Cr, F, Hg, Mn, Ni, Pb, Sr, Sb, Se, Tl, V, Zn, U, Th and other elements.

**Ключевые слова:** сланцевые формации, углеводороды, микроэлементы, тонкие протяженные ловушки, коллектор.

**Keywords:** shale formations, hydrocarbons, trace elements, unconformity subtle traps, reservoir.

#### Тонкие протяженные ловушки сланцевых формаций

Многими исследователями основной приоритет развития нефтегазопроисковой геологии отдается строению и морфологии ловушек – аккумуляторам нефти и газа. Так, в работе зарубежных ученых [1, 2] за основу классификации нефтегазоносных бассейнов (НГБ) по характеру и типу УВ систем приняты особенности резервуаров. В каждом НГБ существуют три основные типы нефтяных систем в соответствии с тремя основными типами резервуаров – вмещающими нефтяными УВ, которые характеризуются качеством резервуара и морфологией ловушек в сочетании с соответствующими показателями миграции и накопления УВ. Отложения в НГБ сообразно такой классификации содержат непрерывные, квазинепрерывные и прерывистые скопления. Достаточно подробное описание этой классификации нами приведено в работе [3]. Сланцевые формации представлены нефтематеринской (или исходной) нефтяной системой (source-rock petroleum system SPS) с непрерывными (continuous) резервуарами. Они характеризуются следующим:

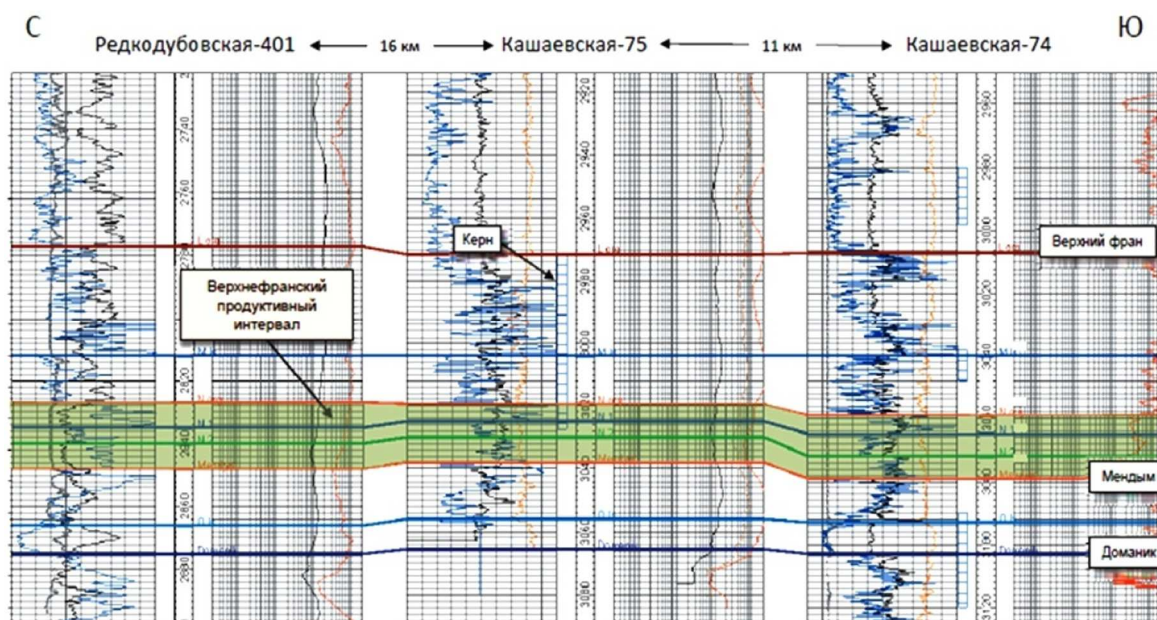
- образование и накопление УВ происходит одновременно в породах-источниках и ловушках;
- миграция не является необходимой; незначительная или на короткие расстояния;
- распределение УВ обширное, непрерывное и не имеет четких границ;
- резервуарами являются исходные породы, коллектора-ловушки не требуются;
- сохранность скоплений считается отличной;
- типичная аккумуляция: сланцевые нефть и газ.



В мировой литературе такие «собиратели» нефти носят название «протяженных» или «непрерывных» резервуаров (continuous reservoirs) или тонких ловушек несоответствия (unconformity subtle traps). Они представляют собой тонкие, длинные, большой протяженности, но малой мощности участки, в которых продуктивность резервуара-залежи не контролируется традиционными структурными или литолого-стратиграфическими ограничениями, а лишь условными «линиями» [4].

Прогноз продуктивности углеродсодержащих (сланцевых) толщ до сих пор остается сложной задачей. Особенности свит, т.е. их сланцевый характер и частое чередование более плотных и менее плотных пород – накопителей и производителей УВ, приводят к трудностям дешифровки в их строении собственно нефтематеринских (с остаточной нефтью) и продуктивных прослоев. Эта неопределенность вызвана тем, что методы исследования традиционных УВ скоплений не применимы к нетрадиционным объектам, которые являются одновременно и нефтематеринскими и нефтесодержащими. Пласты коллекторы не являются ловушками в обычном понимании, а представлены довольно протяженными участками с хорошими коллекторскими свойствами. В работах [5, 6] четко сформулированы основные характеристики таких «ловушек» в сланцевых толщах на примере доманиковой толщи Волго-Уральского НГБ. Авторы под залежью понимают нефть в пласте или группе пластов, отличающихся от соседних пластов лучшими коллекторскими свойствами и дающих промышленные притоки при освоении.

Пример таких протяженных залежей показан на рисунке 1 [5]. Продемонстрирована латеральная выдержанность слоев и пачек пород доманиковой толщи, которая распространяется по всей территории Кашаевского участка (Муханово-Ероховский прогиб) и выходит за его пределы. Учитывая повсеместную нефтенасыщенность доманиковой толщи и связь повышенной пористости пород с кремнисто-карбонатными слоями, обогащенными ОВ, авторы предполагают, что промышленные притоки нефти при условии применения оптимальной технологии будут получены на всей этой территории из продуктивной части разреза. Авторы исследований сланцевых формаций считают, что геохимические данные свидетельствуют о том, что источником нефти в поровом пространстве пород доманиковой толщи является ОВ, содержащееся в тех же породах. Результаты аналитических работ показывают отличную корреляцию нефтей, полученных при опробовании различных интервалов разреза скважины, с битумоидами, экстрагированными из пород тех же интервалов. Эта корреляция является как при сопоставлении биомаркеров, так и методами резервуарной геохимии с помощью построения звездных диаграмм по данным газовой хроматографии.



**Рисунок 1** – Корреляции верхнефранских отложений доманиковой толщи, показывающая широкое распространение протяженного потенциально продуктивного резервуара [5]

Гигантские протяженные ловушки в сланцевых формациях с большими запасами УВ разрабатываются на американском континенте. Примером могут служить формации – Austin Chalk и Woodbinestone [1]. Формация Woodbinestone – геологическое образование на востоке Техаса, пласты которого относятся к сеноманскому ярусу верхнего мела. Совместно с Austin Chalk и Eagle продуктивны на гигантском нефтяном месторождении Восточного Техаса (также известного как «Черный гигант»), из которого добыто более 5,42 миллиарда баррелей нефти. Формация Woodbinestone нефте-

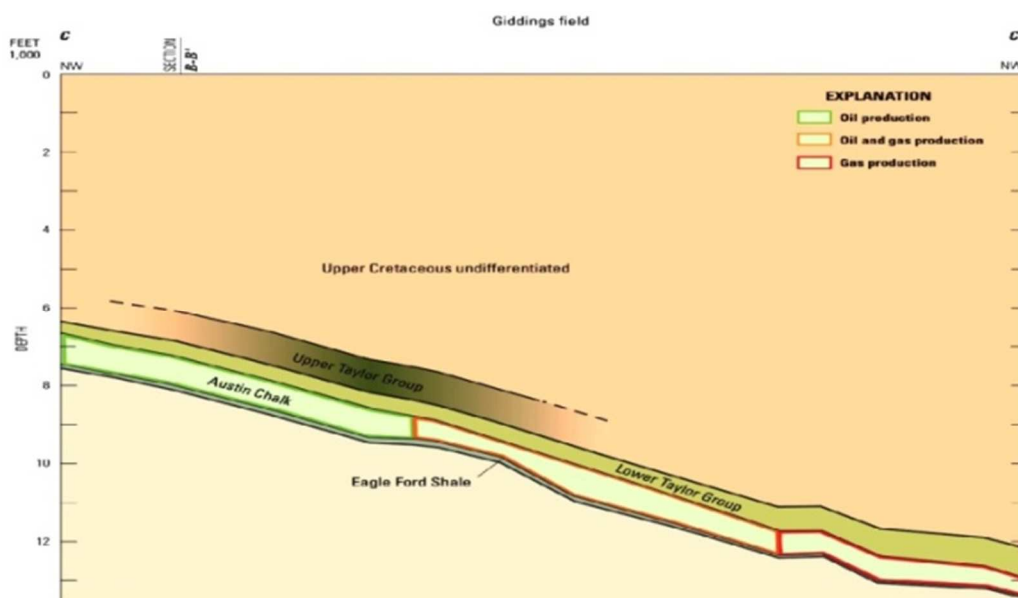


материнских сланцевых отложений на глубине около 1700 км простирается на территориях штатов Техас, Луизианы и Миссисипи на 500 км в длину и 50 км в ширину.

На рисунке 2 показаны «тонкие» ловушки месторождения Giddings, аккумулирующие нефть и газ, и расположение формаций, которые являются как продуктивными коллекторами, так и генераторами нефти (sours rocks). Особенно показательна высокими генерационными возможностями формация Eagle Ford, являющаяся подстилающей пачкой в этом месторождении [7].

### Экологические риски при разработке сланцевых формаций

Многими практиками и учеными отмечались негативные экологические последствия процессов разработки сланцевых формаций и добычи из них нефтяных и газовых УВ. При добыче сланцевой нефти и газа часто используют метод ГРП, закачивая при этом в скважину огромные количества химических реагентов – пропантов. Следствием этого являются предсказуемые экологические катастрофы: рост сейсмоактивности в связи с изменением структуры недр; загрязнение грунтовых вод, что напрямую связано с последующим заражением питьевой воды, поверхностных вод и почвы в местах непосредственной близости от добычи; выброс в атмосферу метана. Однако при разработке и добыче нефтегазовых ресурсов сланцевых формаций кроме всего перечисленного, необходимо учитывать большие содержания ПТЭ – Fe, As, Be, Cl, Co, Cr, F, Hg, Mn, Ni, Pb, Sr, Sb, Se, Tl, V, Zn, U, Th и др., концентрирующихся как в самих сланцах, так и добываемом из них УВ сырье.



**Рисунок 2** – Поперечный разрез месторождения Giddings field, показывающий относительное структурное положение районов добычи нефтяных (Oil production), нефтегазовых (Oil and gas production) и газовых (Gas production) УВ и их стратиграфические привязки: Upper Cretaceous undifferentiated (верхний мел нерасчлененный); Upper Taylor Group, Lower Taylor Group (нижний и верхний Тэйлор-групп), Austin Chalk (Остин Мел), Eagle Ford Shale (Игл Форд) (длина разреза 56,3 км) По оси ординат – глубины (Depth) в футах (feet): 12 000 feet соответствует 3 657,6 м [7]

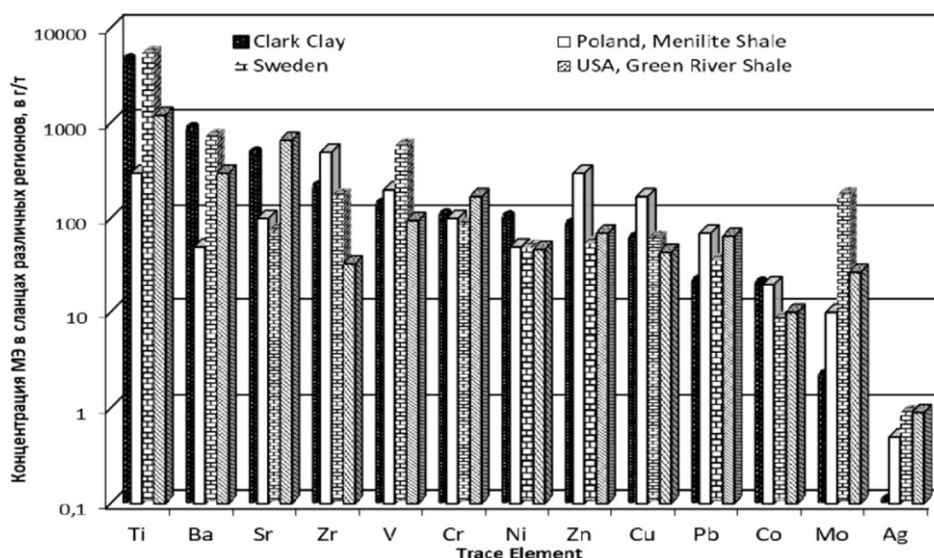
На фоне сравнительно высокой изученности свойств и последствий воздействия УВ на окружающую среду, практически без исследований осталось негативное влияние многих МЭ, в том числе и ПТЭ, присутствующих в УВ сырье. Тепловое воздействие на пласт, увеличение давления, закачка химических реагентов в ходе ГРП при большом количестве перфораций на протяженных горизонтальных участках может привести к высвобождению элементоорганических соединений, возможному образованию газообразных соединений и их выбросу в окружающую среду. Около 15–20 % добываемого УВ сырья уже содержат в своём составе МЭ в количествах, превышающих их безопасный уровень, и объёмы его добычи с годами возрастают. Наиболее миграционно подвижные и летучие из них Hg, Cd, As и др. В числе прочно химически связанных в комплексные металлоорганические соединения – V, Ni, Co, Cr, Cu, Zn и другие элементы, биологически инертные в природной нефти и битумах, но активно опасные в микродисперсном состоянии после техногенного, особенно высокотемпературного (> 450° C), воздействия на сырьё. Нами собрана большая база данных по содержанию МЭ, в том числе ПТЭ, в сланцах различных регионов: Швеции, Польше, Болгарии, Беларуси, России, США, Казахстане и др. [8–10]. На рисунке 3 показаны концентрации элементов в сланцах различных сланцевых бассейнов мира. Содержания следующих рудных элементов выше, чем кларки глин (по



А.П. Виноградову): в менилитовых сланцах Польши – Zr, Zn, Cu, Pb, Mo, Ag, V; зоценовой формации Грин-Ривер (США) – Sr, Cr, Pb, Mo, Ag; Швеции (Нерке) – V, Pb, Mo, Ag.

Учитывая результаты проведенных исследований, необходимо оценивать экологические риски, возникающие при разработке и добыче УВ в условных «ловушках» сланцевых формаций. Для учета экологической ситуации участков, вводимых в разработку и принятия решений о комплексной технологии переработки сланцев с извлечением газа, нефти и металлов, требуется проведение дополнительных исследований по мониторингу МЭ состава сланцевых формаций для проведения экологической экспертизы с целью воспрепятствованию попаданию токсичных элементов в окружающую среду и в буровое оборудование.

Так называемый сланцевый «бум», или «сланцевая» революция затронет со временем многие страны, т.к. сланцевые формации имеют региональное распространение с высоким содержанием ОВ. По данным ИНЭИ РАН запасы сланцевой нефти в 4 раза больше, чем запасы традиционных нефтяных месторождений.



**Рисунок 3** – Концентрация микроэлементов в сланцах различных регионов (по аналитическим данным Voronin, Panova, 2018; Parviainen, Loukola-Ruskeeniemi, 2019 и др.)

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме: «Развитие научно-методических основ поисков крупных скоплений УВ в неструктурных ловушках комбинированного типа в пределах платформенных нефтегазоносных бассейнов», АААА-А19-119022890063-9.

**Литература:**

1. Dolson J. Understanding Oil and Gas Shows and Seals in the Search for Hydrocarbons. Springer International Publishing. – Switzerland, 2016. – № XIX. – 486 p.
2. The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities / Jing-Zhou Zhao [et al.] // Petroleum Science. – 2019. – № 16. – P. 229–251.
3. Пуанова С.А. Прогноз неантиклинальных ловушек и оценка качества скоплений углеводородов в них – приоритетное направление развития нефтегазового комплекса // Экспозиция Нефть Газ. – 2020. – № 6. – С. 20–24.
4. Dolson John, He Zhiyong, Horn Brian W. Advances and Perspectives on Stratigraphic Trap Exploration-Making the Subtle Trap Obvious // Search and Discovery. – 2018. – № 60054. – 67 p.
5. Нетрадиционные резервуары нефти в доманиковой толще Оренбургской области / Г.Ф. Ульмишек [и др.] // Геология нефти и газа. – 2017. – № 5. – С. 57–67.
6. Роль геохимических методов в прогнозе нефтеносности и оценке ресурсного потенциала черносланцевых толщ (на примере баженовской свиты) / М.Б. Скворцов [и др.] // Геология и геофизика. – 2017. – Т. 58. – № 3–4. – С. 495–503.
7. Pearson K. Geologic Models and Evaluation of Undiscovered Conventional and Continuous Oil and Gas Resources – Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast U.S. // Geological Survey, Reston – Virginia. – 2012.
8. Пуанова С.А., Нукунов Д. К вопросу об экологических последствиях горизонтального бурения сланцев в связи с их обогащенностью микроэлементами // Георесурсы. – 2017. – Т. 19. – № 3. – Ч. 1. – С. 239–248.
9. Пуанова С.А., Шпирт М.Я. Экологические последствия разработки сланцевых формаций, содержащих токсичные микроэлементы // Химия твердого топлива. – 2018. – № 6. – С. 55–63.
10. Пуанова С.А. Следы элементного состава сланцевых образований. 29-е Международное совещание по органической геохимии. – Швеция : EAGE-IMOG-2019. Все тезисы. – С. 495–496.

**References:**

1. Dolson J. Understanding Oil and Gas Shows and Seals in the Search for Hydrocarbons. Springer International Publishing. – Switzerland, 2016. – № XIX. – 486 p.
2. The petroleum system: a new classification scheme based on reservoir qualities / Jing-Zhou Zhao [et al.] // Petroleum Science. – 2019. – № 16. – P. 229–251.
3. Punanova S.A. Forecast of non-antiklinal traps and assessment of the quality of accumulations of hydrocarbons in them – a priority direction of development of the oil and gas complex // Exposition Oil Gas. – 2020. – № 6. – P. 20–24.
4. Dolson John, He Zhiyong, Horn Brian W. Advances and Perspectives on Stratigraphic Trap Exploration-Making the Subtle Trap Obvious // Search and Discovery. – 2018. – № 60054. – 67 p.
5. Unconventional oil reservoirs in the Domannikova strata of the Orenburg region / G.F. Ulmishak [et al.] // Geology of oil and gas. – 2017. – № 5. – P. 57–67.
6. The role of geochemical methods in the prediction of oil-bearing capacity and resource potential assessment of black shale strata (on the example of the Bazhenov Formation) / M.B. Skvortsov [et al.] // Geology and Geophysics. – 2017. – Vol. 58. – № 3–4. – P. 495–503.
7. Pearson K. Geologic Models and Evaluation of Undiscovered Conventional and Continuous Oil and Gas Resources – Upper Cretaceous Austin Chalk, U.S. Gulf Coast U.S. // Geological Survey, Reston – Virginia. – 2012.
8. Punanova S.A., Nukenov D. On the environmental consequences of horizontal drilling of oil shale in connection with their enrichment with trace elements // Georesursy. – 2017. – Vol. 19. – № 3. – Part. 1. – P. 239–248.
9. Punanova S.A., Shpirt M.Y. Environmental consequences of the development of shale formations containing toxic trace elements // Chemistry of Solid Fuels. – 2018. – № 6. – P. 55–63.
10. Punanova S.A. Traces of the elemental composition of shale formations. 29-th International Meeting on Organic Geochemistry. – Sweden : EAGE-IMOG-2019. All abstracts. – P. 495–496.