

УДК 550.8.055

Хао Юэсян¹, Шарданова Т.А.², Хуан Чунсин³

ОСОБЕННОСТИ СТРОЕНИЯ ВЫСОКОУГЛЕРОДИСТЫХ ПОРОД НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕСИЛУРИЙСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ В ДЕПРЕССИИ СЫЧУАНЬ ПЛАТФОРМЫ ЯНЦЗЫ (КНР)

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», геологический факультет, 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1

Корпорация «Бурение и разведка», 610051, КНР, провинция Сычуань, г. Чэнду, р-н Чэнхуа, ул. Мэнчайван, 6
Moscow State University, Faculty of Geology, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1

Chuanqing Drilling and Exploration Corporation Co., Ltd.

610051, No. 6, Mengzhuiwan Street, Chenghua District, Chengdu, Sichuan, China

Рассмотрены петрофизические, геохимические и литологические особенности строения граптолитовых сланцев нижней части формации Лонмасы раннесилурийского возраста в провинции Сычуань (КНР). Выявлены основные закономерности формирования высокоуглеродистых осадков во внутришельфовых депрессиях.

Ключевые слова: граптолитовые сланцы, высокоуглеродистые породы, нижний силур, КНР.

Petrophysical, geochemical, and lithological features of the structure of graptolite schists from the lower part of the Longmazi Formation of the Lower Silurian age of the Sichuan Province of the People's Republic of China are considered. The main regularities of the formation of high-carbon sediments in intrashelf depressions are revealed.

Key words: graptolite schists, high carbon rocks, Lower Silurian, China.

Введение. В последние десятилетия работы, направленные на поиски месторождений нетрадиционных углеводородов (сланцевой нефти и газа), весьма востребованы. В связи с этим появились многочисленные публикации, посвященные литолого-геохимическим и петрофизическим особенностям строения пород высокоуглеродистых комплексов, рассматриваемых ранее исключительно как нефтематеринские породы (баженовская свита верхней юры, доманиковый горизонт верхнего девона и т.д.) [Билибин и др., 2015; Конюхов, 2015; Ступакова и др., 2015]. Все исследователи отмечают, что для формирования высокоуглеродистых пород характерны следующие особенности: а) высокая биопродуктивность, приведшая к накоплению осадков разного состава, — от чистых сапропелевых до известковых, глинистых, кремнистых, с преобладанием осадков смешанного состава; б) низкая скорость седиментации в центральных частях внутри шельфовых депрессий, более высокая в их краевых частях за счет привноса обломочного материала гравитационными потоками с обрамляющих поднятий; в) стабильный тектонический режим и низкий темп погружения. Объект нашего изучения — осадочный комплекс

раннесилурийского возраста, обогащенный органическим веществом, — формация Лонмасы (Longmazi) в бассейне Сычуань (КНР). В последние несколько лет изучение граптолитовых ордовикских и силурийских сланцев в КНР связано с разведкой и освоением месторождений сланцевого газа [Лян Синьпин, 2016; Wang Yuman et al., 2016]. В работе основное внимание нами уделено нижней части формации Лонмасы, наиболее обогащенной органическим веществом (ОВ).

Общая характеристика района исследования. Объект исследований находится в южной части впадины Сычуань, район Вэйюань (Нычиань, КНР). Согласно предыдущим исследованиям структура района Вэйюань имеет моноклинальное залегание с погружением в юго-восточном направлении, с незначительными углами наклона и без крупных тектонических нарушений. На рубеже среднего и позднего ордовика на территории Янцзы в результате роста поднятий Сюфенг, Сычуань и Гуйчжоу режим открытого морского бассейна сильно изменился. Сформировалась область полужакрытых морей, имеющих более застойный характер относительно нормальной морской обстановки. Во время осадконакопления в раннем

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, аспирант; e-mail: yuriiyx@hotmail.com .

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра нефтегазовой седиментологии и морской геологии, доцент; e-mail: tshardanova@mail.ru

³ Корпорация «Бурение и разведка», КНР, CCDC (Chuanqing Drilling and Exploration Corporation Co., Ltd.), инженер; e-mail: huangcx_dyy@cnpc.com.cn .

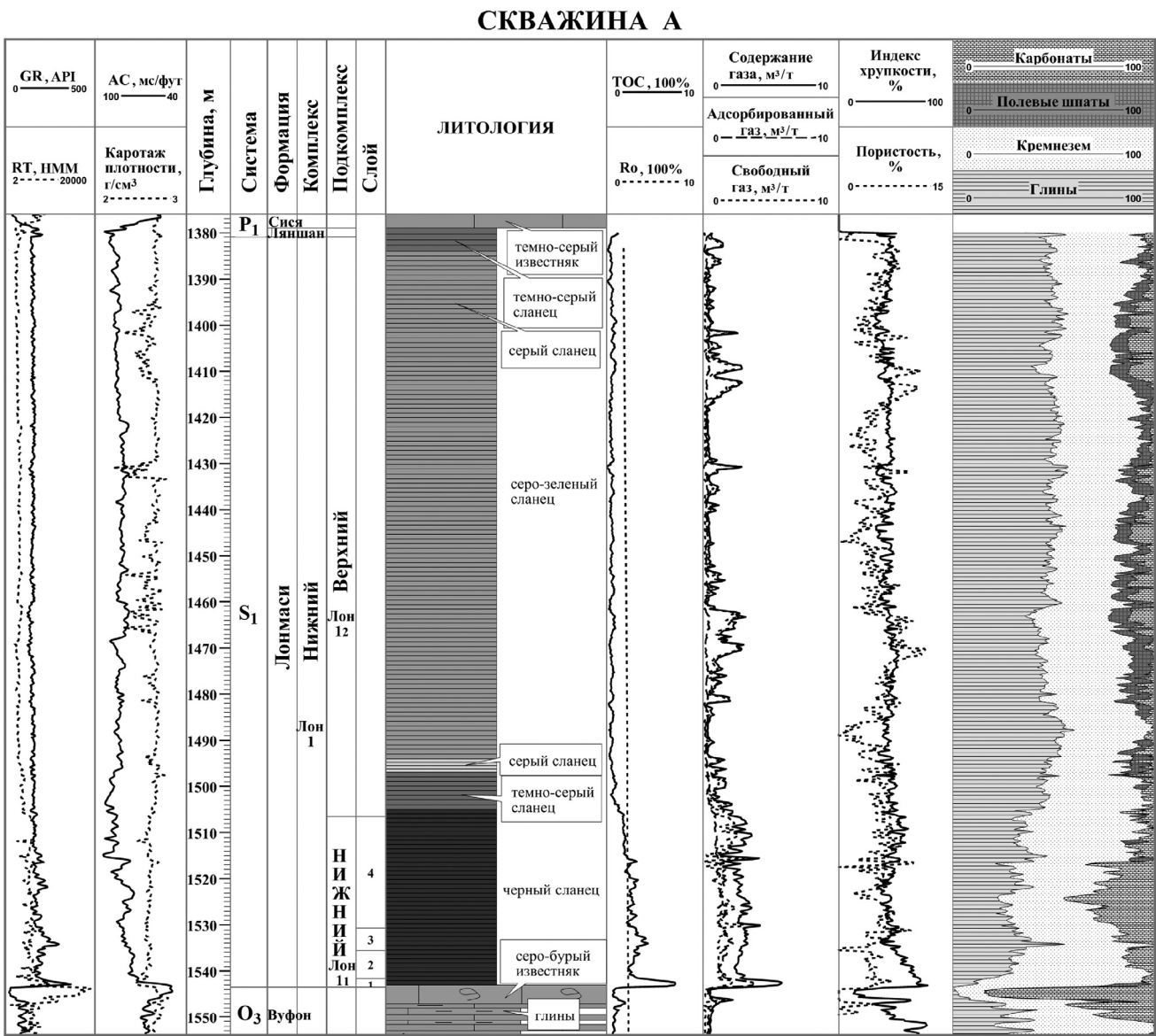


Рис. 1. Обобщенный разрез нижней части формации Лонмаси в районе Вэйюань, провинции Сычуань, в южной части впадины Сычуань (КНР)

силуре палеоподнятия выходили из под уровня моря с широким развитием приливных и лагунных фаций. Между поднятиями в шельфовых впадинах депрессионного типа откладывались высокоуглеродистые осадки, причем как в пределах глубоководного, так и мелководного шельфа. Последние исследования показали, что сланцы в нижней части формации Лонмаси сформировались в анаэробной среде [Wu Lanyu et al., 2016]. Во время формирования осадков, обогащенных ОБ, бассейн Сычуань был окружен поднятиями с ограниченной циркуляцией вод, что подтверждается отсутствием биотурбационных структур. Глинистые сланцы верхней части формации Лонмаси формировались уже в аэробной среде. Смена аноксической среды на окисдную связана с падением уровня моря и возникновением придонных течений. Повышение скорости седиментации также не способствовало

сохранению ОБ [Wu Lanyu et al., 2016]. В дальнейшем в результате каледонских движений северо-западная часть поднятий в районе исследований подверглась эрозии, что привело к частичному размыву нижнесилурийских отложений и отсутствию девонских и каменноугольных осадочных комплексов.

Формация Лонмаси представлена высокоуглеродистыми, преимущественно пелитоморфными породами смешанного состава. Сверху вниз по разрезу отмечено уменьшение размерности и преобладание тонкой горизонтальной слоистости («сланцеватости»), цвет становится темнее, характерно обилие пиритовых конкреций, реже известковых; присутствует большое количество остатков граптолитов. Общая мощность комплекса 300–600 м, глубина залегания с северо-запада на юго-восток постепенно увеличивается с 1500 до

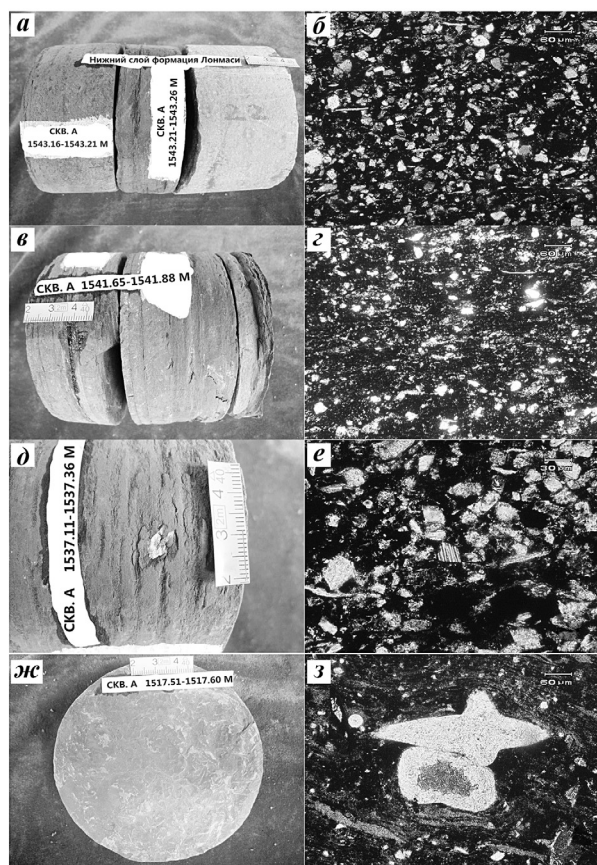


Рис. 2. Высокоуглеродистые породы (граптолитовые сланцы) нижнего силура в районе Вэйюань: а — контакт кремневого сланца слоя 1 и известняка формации Вуфон; б — кремневый сланец (слой 1); в, г — известково-глинисто-кремнистые сланцы с пиритовыми стяжениями (слой 2); д — известково-глинисто-кремнистые сланцы с пиритовыми и известковыми конкрециями (слой 3); е — примесь плагиоклаза и ракушнякового детрита в сланце (слой 3); ж — сланец смешанного состава с отпечатками граптолитов (слой 4); з — раковинный детрит и остатки кремневых губок (слой 4)

4000 м. В изученных разрезах высокоуглеродистые породы согласно подстилаются породами формации Вуфон позднеордовикского возраста, представленными глинистыми известняками со значительным количеством ракушнякового детрита, остатков брахиопод и иглокожих. Перекрывают несогласно нижнепермскими отложениями формации Ляншань, выполненными высокоуглеродистыми глинистыми сланцами, содержащими уголь. В области Вэйюань мощность формации Ляншань 2–10 м, вдали от денудационных зон толщина формации увеличивается. По геофизическим данным для высокоуглеродистых пород формации Лонмаси характерны высокие значения гамма-каротажа (GR) и низкие значения удельного сопротивления (RT), что позволяет уверенно выделять и коррелировать разрезы этих комплексов (рис. 1).

Осадочный разрез формации Лонмаси делится на два крупных комплекса: нижний — Лон I и верхний — Лон II. Породы нижнего комплекса широко распространены, мощность колеблется от

140 до 240 м. В разрезе преобладают темно-серые и черные высокоуглеродистые пелитоморфные разновидности (граптолитовые сланцы) с отчетливой горизонтальной слоистостью, насыщенные пиритом. Породы верхнего комплекса имеют невыдержанную мощность — от 0 до 260 м и представлены чередованием серых и черных «сланцев» с неясной стратификацией. В представленном разрезе они отсутствуют, а породы нижнего комплекса Лон I перекрываются отложениями раннепермского возраста. В свою очередь нижний комплекс Лон I исследователи делят на два подкомплекса: нижний Лон I₁ и верхний Лон I₂. Подкомплексы уверенно расчленяются по данным гамма-каротажа (GR) и удельному сопротивлению пород (RT) (рис. 1), а также по литолого-геохимическим особенностям пород. Нижний высокоуглеродистый «сланец» обогащен разнообразными формами граптолитов, скоплениями (нередко послойными) пирита. Среднее содержание органического углерода (ТОС) составляет более 2%. Мощность 36–48 м. В верхнем подкомплексе отмечено резкое уменьшение количества граптолитовых остатков и присутствие прослоев песчано-глинистых пород. Мощность колеблется от 105 до 200 м.

Результаты исследований и их обсуждение. По литологическим, геохимическим, петрофизическим характеристикам подкомплекс Лон I₁ разделяется на 4 слоя (снизу вверх): Лон I₁¹, Лон I₁², Лон I₁³ и Лон I₁⁴.

Слой Лон I₁¹ представлен черными высокоуглеродистыми пелитоморфными породами преимущественно кремневого состава, содержащими большое количество пирита и трещин, залеченных кальцитом. Для пород характерно большое количество и видовое разнообразие остатков граптолитов (*Orthograptus vesiculosus*, *Climacograptus*, *Petalolithus* Suess), присутствуют спикеры губок и радиолярии. Этот интервал имеет лучшую региональную контрастность относительно подстилающих верхнеордовикских пород формации Вуфон и более однородные литолого-геохимические характеристики по сравнению с вышележащими породами (рис. 1, 2, а, б). Общее содержание ТОС ≈ 5–15% (среднее 7%). Естественная радиоактивность достигает 200–500 API (по значениям используемыми American Petroleum Institute). Среднее удельное сопротивление пласта (RT) 40 Ом·м, средняя акустическая разница во времени составляет 80 мкс/фут (микросекунда/фут), плотность 2,1–2,5 г/см³, пористость около 3%, а индекс хрупкости <55%. Содержание газа около 9 м³/т.

Слой Лон I₁² по литологическим характеристикам не очень отличается от слоя Лон I₁¹. В основном он сложен черными высокоуглеродистыми породами, обогащенными граптолитовыми остатками (*Glyptograptus*, *Orthograptus vesiculosus*, *Climacograptus*, *Pristiograptus*, *Aki-dograptus acuminatus*, *Didymograptus*). Выявлены остатки

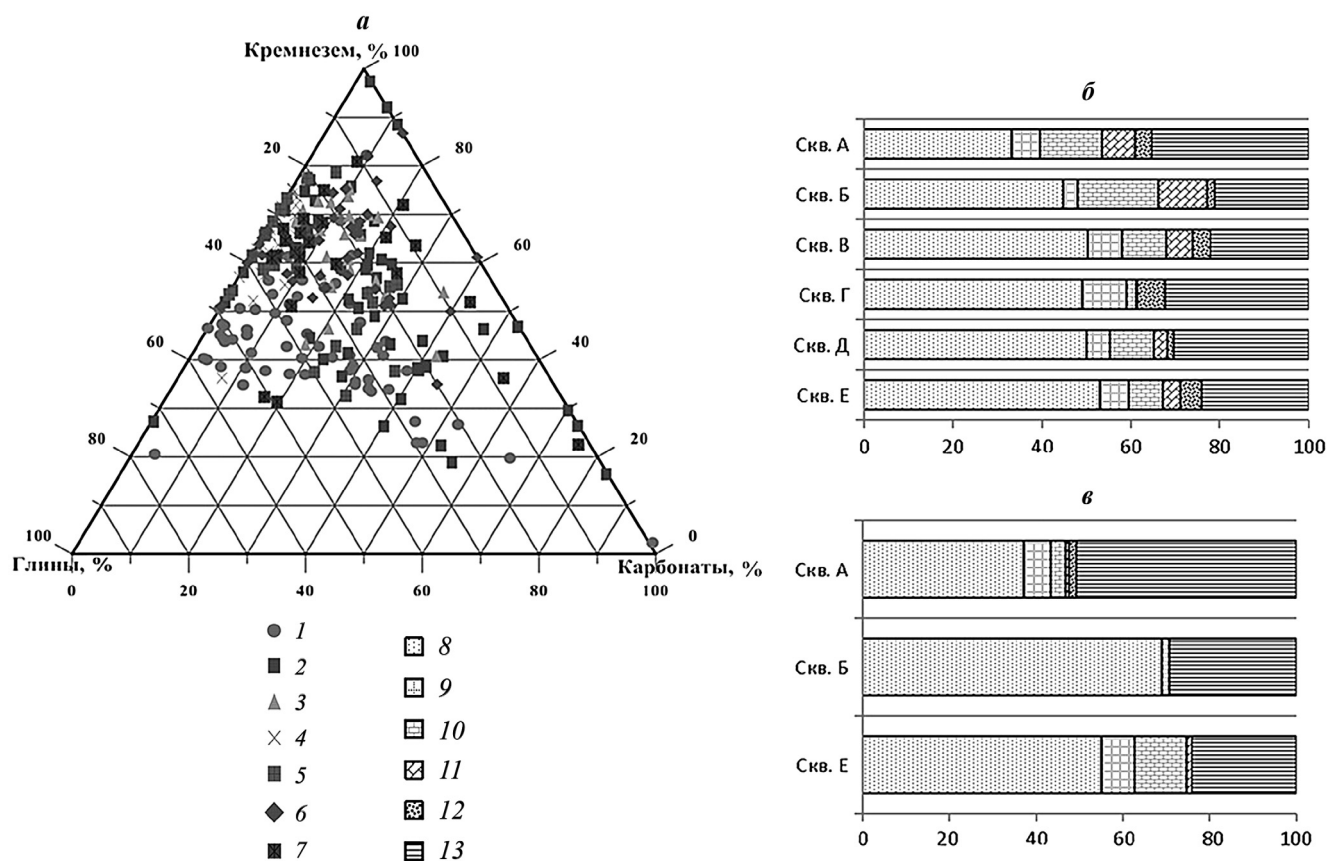


Рис. 3. Минеральный состав (средний) высокоуглеродистых нижнесилурийских пород в районе Вэйюань: *a* — формация Лонмасы; *б* — нижний комплекс Лон I; *в* — верхний комплекс Лон II; 1–7 — скважины А–Ж соответственно, 8 — кремнезем, 9 — полевые шпаты, 10 — кальцит, 11 — доломит, 12 — пирит, 13 — глины

остракод и радиоларий, пиритовые стяжения и кальцитовые прожилки. Однако отмечается постепенное повышение содержания глинистых и карбонатных компонентов, что определяет известково-глинисто-кремнистый состав пород (рис. 1, 2*в*, *з*). По данным гамма-каротажа ($GR=140\div 180$ API) и геохимических исследований отмечено резкое уменьшение ТОС до 3–5% (среднее 3,7%). Среднее удельное сопротивление пласта (RT) 30 Ом·м, средняя акустическая разница во времени 80 $\mu s/ft$, плотность (DEN) $\sim 2,4$ г/см³, пористость ~ 4 –6%, индекс хрупкости 65%, содержание газа $\sim 5,5$ м³/т.

Слой Лон I_1^3 при внешней литологической схожести с подстилающими породами отличается несколько повышенными значениями ТОС (до 4–5%), что отражается в появлении на кривых гамма-каротажа второго пика повышенной радиоактивности до 160–270 API (среднее 200 API) (рис. 1, 2*д*, *е*). Для этого слоя, так же, как и для подстилающих пород, характерен многообразный комплекс остатков граптолитов (*Glyptograptus*, *Climacograptus*, *Dicranograptus*, *Didymograptus*), радиоларий, появляются остатки брюхоногих моллюсков. Среднее удельное сопротивление пласта (RT) 16 Ом·м, средняя акустическая разница во времени 90 $\mu s/ft$, плотность (DEN) 2,5 г/см³,

пористость ~ 5 –8%, индекс хрупкости $< 55\%$. Содержание газа ~ 5 –8 м³/т.

Слой Лон I_1^4 — переходный к породам верхнего подкомплекса и отличается от подстилающих отложений присутствием темно-серых интервалов известковистых и песчано-глинистых «сланцев». Анализ минерального состава показал равное соотношение кремневых, глинистых и карбонатных компонентов (рис. 1, 2, *ж*, *з*). Характерно незначительное содержание пирита и остатков граптолитов (*Demirastrites*, *Aki-dograptus acuminatus*, *Pristiograptus*). Кроме радиоларий и брюхоногих моллюсков отмечены остатки трилобитов. Благодаря более низкому содержанию органического углерода (ТОС = 1,8–2,1%), значения гамма-каротажа составляют ~ 140 –180 API. Среднее удельное сопротивление пласта (RT) 25 Ом·м, средняя акустическая разница во времени 85 $\mu s/ft$, плотность 2,56 г/см³, пористость ~ 5 –7%, индекс хрупкости ~ 45 –54%, содержание газа $\sim 3,6$ –4,5 м³/т.

Минеральный состав. Анализ минеральных компонентов в образцах высокоуглеродистых «граптолитовых сланцев» формации Лонмасы в районе Вэйюань показал поликомпонентный состав (%): кварц 45,5 (1,6–97,9), карбонатные минералы (кальцит и доломит) 16,7 (0–98,4), глинистые минералы 29,3 (0–75,9%), полевые шпаты

6,4 (0–25,6). Тонкая слоистость, наличие вторичных изменений (окремнение, карбонатизация), неравномерная терригенная и биогенная примесь влияют на резкие колебания минерального состава высокоуглеродистых пород. Выделяются как чистые кремниевые и карбонатные разности, так и смешанные разности: карбонатно-глинисто-кремнистые, карбонатно-кремнисто-глинистые (рис. 3). Однако, если сравнивать минеральный состав изучаемых пород нижнего комплекса Лон I и верхнего комплекса Лон II (по фондовым материалам), в последнем заметно значительное увеличение доли глинистых минералов (Лон I 21,2–35,2%, Лон II 24,2–50,8%) и уменьшение содержания карбонатных минералов (Лон I 2,5–29,0%, Лон II 1,6–13,2%).

Органическое вещество. В изученных породах формации Лонмасы преобладает кероген I и II типов. По составу ОВ выделяют группу сапропеля (72–90%) и группу битуминита. Органическое вещество в нижнесилурийских сланцах формации Лонмасы характеризуется высокой степенью зрелости, благоприятной для генерация сухого газа (значение R_o около 1,64–2,15%, грация катагенеза $МК_{5-6}$).

Статистический анализ данных о содержании органического углерода (C_{org}) в формации Лонмасы показал большой диапазон распределения ТОС (от 0,07 до 8,2%, при средних значениях, равных 1,54%). Количество образцов с $ТОС < 1\%$ составляет 45,73% от общего объема, с $ТОС > 2\%$ — 34,14%, с $ТОС > 5\%$ — 1,3%. Исследования показали, что «сланцы» формации Лонмасы обладают повышенными гетерогенными характеристиками не только по разрезу, но и по площади. Даже в наиболее обогащенном органическим веществом

нижнем комплексе Лон I (при среднем значении $ТОС = 2,05 \pm 2,88\%$) существует определенная разница в его содержании в каждой скважине.

Выводы. 1. Наиболее обогащенные ОВ отложения нижнего подкомплекса Лон I₁ представлены преимущественно известково-глинисто-кремнистыми породами с тонкой горизонтальной слоистостью («сланцеватостью») и обилием пиритовых конкреций. Отмечено увеличение глинистой составляющей снизу вверх по разрезу.

2. Для пород характерно отсутствие бентосных форм организмов. Биогенные остатки представлены преимущественно планктоногенными формами и только в верхнем слое Лон I₁⁴ появляются формы граптолитов, ведущих донный или псевдопланктонный образ жизни. Для этого слоя характерно сокращение видового состава граптолитов относительно подстилающих слоев, а также увеличение доли песчано-алеврито-глинистых компонентов и уменьшение пиритовых стяжений.

3. Количество ОВ максимально в кремнистых породах нижнего слоя Лон I₁¹ (ТОС до 15%), которое представлено преимущественно сапропелевым материалом.

4. Все перечисленные признаки позволяют предположить, что осадочный комплекс слоя Лон I₁^{1–3} формировался во внутришельфовых депрессиях с анаэробной придонной средой. Для периода формирования слоя Лон I₁⁴ отмечены признаки усиления терригенного сноса в результате снижения относительного уровня моря и периодического восстановления аэробного режима придонных вод.

Благодарности. Авторы благодарят сотрудников компании «Chuanging Drilling and Exploration Corporation» (КНР) за помощь в сборе и обработке фактического материала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Билибин С.И., Калмыков Г.А., Ганичев Д.И., Балушкина Н.С. Модель нефтесодержащих пород баженовской свиты // Геофизика. 2015. № 3. С. 3–15.

Конюхов А.И. Черные глины и другие отложения, обогащенные органическим веществом, на окраинах материков в раннем и позднем палеозое // Вестн. Моск. ун-та. 2015. Сер. 4. Геология. № 4. С. 22–33.

Лян Синьпин. Сравнительный анализ условий формирования и нефтегазоносности доманиковых отложений юго-востока Русской платформы и сланцевых пород нижнего палеозоя Сычуаньской депрессии платформы Янцзы Китая: Автореф. канд. дисс. М., 2016.

Ступакова А.В., Калмыков Г.А., Фадеева Н.П. и др. К оценке ресурсов и запасов сланцевой нефти // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2015. № 3. С. 3–10.

Wang Yuman, Dong Dazhong, Huang Jinliang et al. Guanyinqiao Member lithofacies of the Upper Ordovician Wufeng Formation around the Sichuan Basin and the significance to shale gas plays, SW China // Petrol. Explor. and Develop. 2016. Vol. 43, N 1. P. 42–50.

Wu Lanyu, Hu Dongfeng, Lu Yongchao et al. Advantageous shale lithofacies of Wufeng Formation-Longmaxi Formation in Fuling gas field of Sichuan Basin, SW China // Petrol. Explor. and Develop. 2016. Vol. 43, N 2. P. 189–197.

Поступила в редакцию 04.12.2018

Поступила с доработки 27.02.2019

Принята к публикации 27.02.2019