

УДК 550.8.055

Хао Юэсян¹, Т.А. Шарданова², Хуан Чунсин³**ЛИТОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ГРАПТОЛИТОВЫХ СЛАНЦЕВ НИЖНЕГО СИЛУРА (ПЛАТФОРМА ЯНЦЗЫ, КНР)***ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские Горы, 1**Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, GSP-1, Leninskiye Gory, 1*

Выделены и охарактеризованы основные литологические типы пород, слагающие самую высокоуглеродистую часть разреза формации Лонмаси раннесилурийского возраста в провинции Сычуань (КНР). Анализ распределения редких и рассеянных элементов в граптолитовых сланцах позволил предположить редокс-условия формирования высокоуглеродистых осадков.

Ключевые слова: граптолитовые сланцы, литологические типы высокоуглеродистых пород, редокс-условия, нижний силур, КНР.

The main lithological rock types typical of the highest carbon part of the section of the Lonmasi formation of the Lower Silurian age of the Sichuan province of the People's Republic of China (PRC) were identified and characterized. An analysis of the distribution of rare and trace elements in graptolite schists allowed us to suggest the redox conditions for the formation of high-carbon sediments.

Key words: graptolite schists, lithological types of high-carbonaceous rocks, redox conditions, lower silur, China.

Введение. Целевыми слоями для разведки и разработки месторождений сланцевого газа служат породы формация Лонмаси раннесилурийского возраста. Глубина погружения структуры с северо-запада на юго-восток меняется от 1500 до 4500 м, мощность осадочного комплекса увеличивается с северо-запада на юго-восток от 180 до 600 м. Формация Лонмаси несогласно перекрыта формацией Ляншань пермского возраста и согласно подстилается формацией Вуфон позднеордовикского возраста, представленной глинистыми известняками со значительным количеством ракушнякового детрита, остатков брахиопод и иглокожих. Породы среднего и верхнего отделов силура представлены светло-серыми, желтыми глинистыми и песчано-глинистыми углеродистыми «сланцами», которые сформировались на стадии регрессии, связанной с ростом внутрибассейновых поднятий. Общая мощность пород силурийского возраста 360–1440 м [Bai Wenhua et al., 2019]. Большая часть отложений силурийской системы в области исследований отсутствует. Их нижняя высокоуглеродистая часть вскрыта скважинами лишь на периферии бассейна Сычуань и склоне горы Хуаханшань. Нижний отдел силурийской системы представлен высокоуглеродистыми, преимущественно пелитоморфными породами смешанного состава (граптолитовые черные сланцы). Сверху вниз по разрезу

отмечено уменьшение размерности терригенной и эдафогенной примеси, преобладание тонкой горизонтальной слоистости («сланцеватости»), цвет становится темнее, характерно обилие пиритовых, реже известковых конкреций; присутствует большое количество остатков граптолитов [Хао Юэсян и др., 2019]. В области Вайюань и Лучжоу к западу и северо-западу от рассматриваемого района преобладают мелководно-морские детритовые карбонатные породы.

Материалы и методы исследований. *Литологическая характеристика пород.* Объект исследования — породы самой нижней части формации Лонмаси раннесилурийского возраста (слой Лон I₁¹), вскрытый 4 скважинами. Профиль ориентирован с запада на восток (рис. 1), расстояние между скважинами составляет в среднем 16–20 км. Толщина слоя в скважинах следующая: Б — 5,2 м, Г — 5,5 м, В — 3,4 м, Д — 4,1 м. Черные граптолитовые сланцы представлены неяснослоистыми высокоуглеродистыми пелитоморфными разностями преимущественно кремниевое и смешанного состава, содержащими большое количество пирита. Для пород характерно значительное количество и видовое разнообразие остатков граптолитов (*Orthograptus vesiculosus*, *Climacograptus*, *Petalolithus* Suess), отмечены спикеры губок и радиолярии. Этот интервал имеет лучшую региональную контрастность

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 Научно-исследовательский институт геологоразведки и развития, CCDC (Chuanging Engineering co., Ltd.), инженер; *e-mail:* huangcx_dyy@cnpc.com.cn

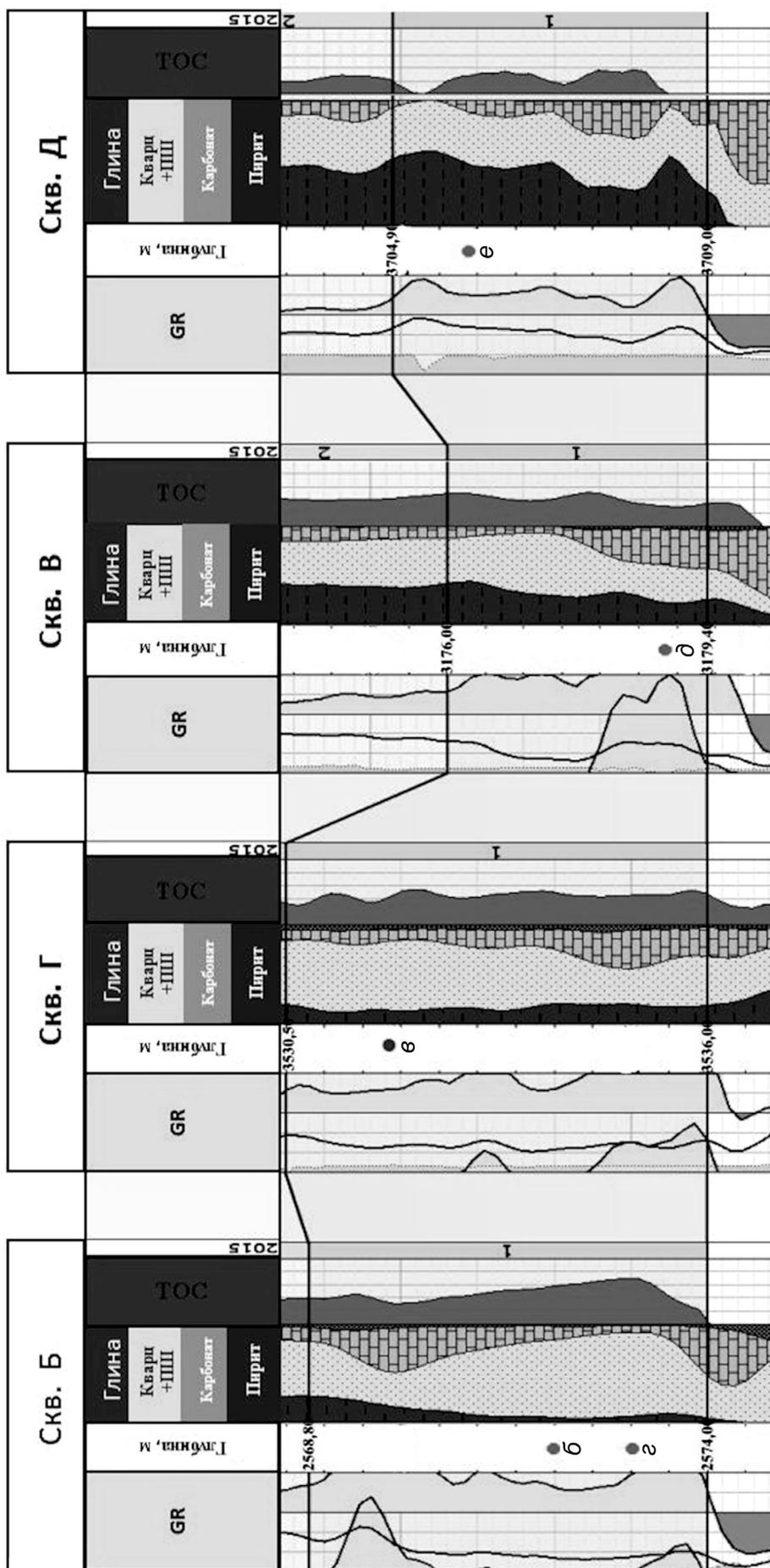


Рис. 1. Минеральный состав граптолитовых сланцев нижней части формации Лонмасы (Лон I₁¹): б, в, г, д, е — места отбора образцов

по гамма-каротажу относительно подстилающих верхнеордовикских пород формации Вуфона за счет повышенного содержания органического вещества (ОВ) (до 15 масс.%) и более однородных литолого-геохимических характеристик по сравнению с вышележащими породами.

Изучение минерального состава пород с рассеянным органическим веществом (керогеном) обычными петрографическими методами крайне затруднено. Основная масса породы представлена черным колломорфным, почти изотропным веществом за счет повышенного содержания ОВ с рассеянными включениями (аутигенными, терригенными, биогенными). Определение минерального состава и процентного соотношения компонентов возможно при использовании рентгенофазового анализа (РФА), однако он не позволяет определить их генетическую принадлежность. Для решения этой задачи породы изучали с использованием QEMSCEN («Количественная оценка минералов под торговой маркой Scanning Electron microscopy»). Интегрированная система включает в себя сканирующий электронный микроскоп (СЭМ), рентгеновскую установку и собственное программное обеспечение для автоматизированного сбора данных. Исследования проводились в компании «iRock Technologies» (Xiamen) Co., Ltd (Китайская Народная Республика).

Результаты исследований и их обсуждение. Несмотря на кажущуюся однородность разреза, детальное изучение пород показало резкую изменчивость их минерального состава. По соотношению кремниевых, глинистых и карбонатных компонентов выделены три группы высокоуглеродистых пелитоморфных пород: кремниевые (скв. Б, Г), глинисто-кремнисто-карбонатные (скв. В) и карбонатно-глинисто-кремнистые (скв. Д) (рис. 1).

Черные сланцы кремниевого состава. Эта группа пород выделена по преобладанию кремниевой составляющей. Содержание кремнезема достигает 75–85%, карбонатных компонентов 7–8% (кальцит 3,6–4,8%, доломит 3,0%), сумма глинистых минералов 3–5% (иллит, хлорит, смектит, с резким преобладанием иллита, до 4,7%), содержание полевых шпатов 1,5–2,5%, мусковита и биотита — от 0,1 до 2,8% (с преобладанием мусковита),

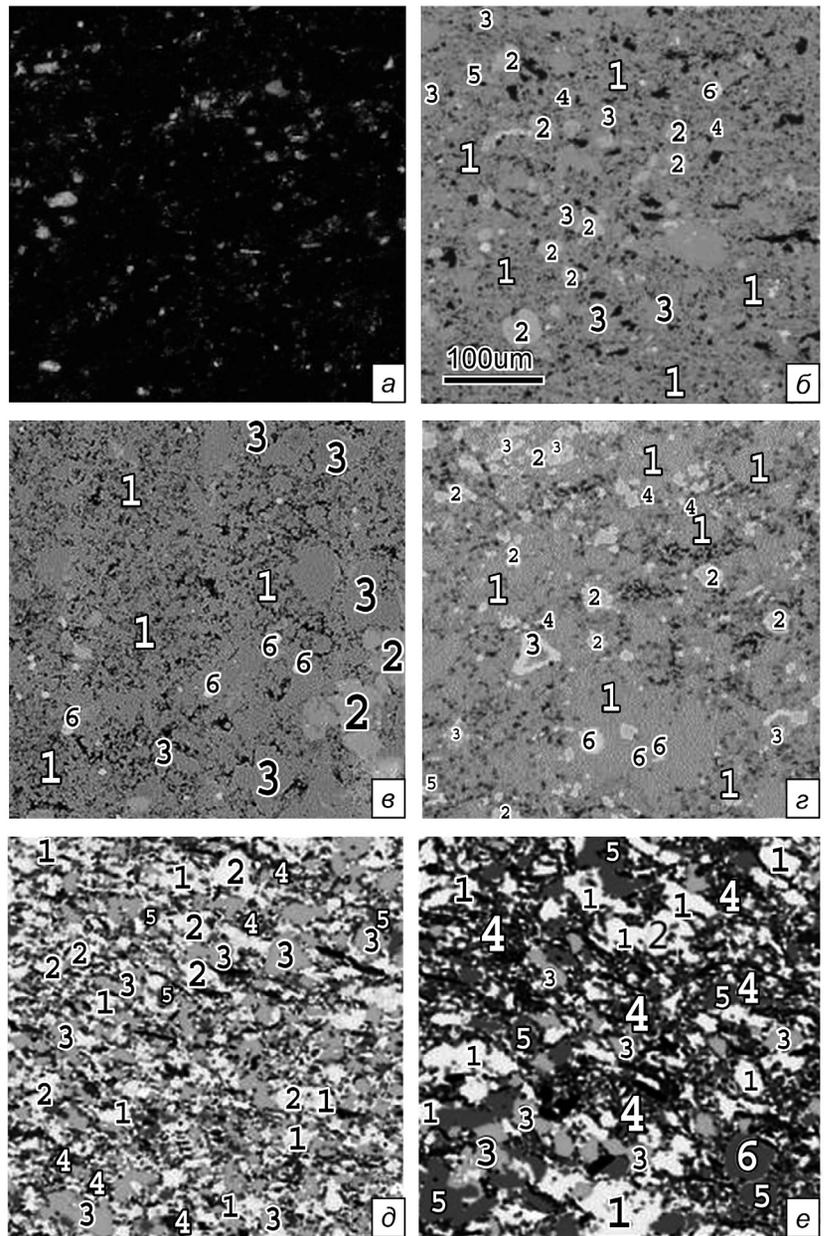


Рис. 2. Литологические типы пород: черные сланцы кремниевого (а, б, в, г), глинисто-кремнисто-карбонатного (д) и глинисто-кремнистого (е) состава: 1 — доломит, 2 — кальцит, 3 — кварц, 4 — глинистые минералы, 5 — полевый шпат, 6 — пирит. Место взятия образца см. рис. 1

пирита от 1,3 до 5,7%. Однако по структурным особенностям строения породы можно выделить две разновидности. Преобладающая структура первой — криптозернистая, микрогранобластовая (рис. 2, а–в). Состав преимущественно халцедон-кварцевый (аутигенный). Отмечены единичные кристаллы аутигенного доломита и кальцита, характерно повышенное значение ТОС. Вторая разновидность пород кремниевого состава отличается значительным содержанием (до 30%) интенсивно перекристаллизованных радиолярий размером 0,025–0,05 мм. Содержание глинистой и карбонатной примеси незначительно (рис. 2, г). Таким образом, среди кремнистых пород выделяются породы с реликтовой радиоляриевой структурой

биоморфного генезиса и породы с преобладающей криптозернистой структурой, возможно, биогенно-хемогенного генезиса.

Черные сланцы глинисто-кремнисто-карбонатного состава. Эта группа пород отличается резким увеличением карбонатной и глинистой составляющих относительно кремнистой (рис. 2, д). Этот литологический тип встречается на разных участках изученных разрезов, но преобладает в нижней части скв. В. Доля (%) карбонатных компонентов — 52, кремниевых — 22,5, глинистых — 18 (также с преобладанием иллита), полевых шпатов — 2,3, мусковита и биотита — до 2, пирита — 2,2. Среди карбонатных компонентов можно выделить идиоморфные кристаллы аутигенного доломита размером до 0,05 мм (до 28%). Известковые включения представлены как ракушняковым детритом тонкоалевритовой размерности (до 0,025 мм), так и аутигенным кальцитом. Кремниевая составляющая представлена криптозернистой массой преимущественно кварцевого состава.

Черные сланцы карбонатно-глинисто-кремнистого, глинисто-кремнистого состава. Этот тип сланцев характерен для разреза, вскрытого скважиной Д, и отличается резким увеличением глинистой (до 31%, преимущественно иллита) и полевошпатовой (до 11,5%) терригенной примеси. В отдельных интервалах отмечено резкое сокращение ракушняковой примеси (0–8%) (рис. 2, е).

Геохимическая характеристика. При геохимических исследованиях отложений основное внимание уделяется анализу распределения редких и рассеянных элементов. Осаждение компонентов, которыми сложены породы, происходит непосредственно из толщи воды или осадка. В процессе седиментогенеза накапливаются те химические элементы и соединения, которые на момент формирования находятся в бассейне седиментации в различных миграционных формах. К ним относятся обломки, микрочастицы, коллоиды, взвеси, золи, химические и органические соединения. Для каждой физико-химической обстановки характерны определенные концентрации и наличие отдельных элементов. Для пород, обогащенных ОВ, характерен высокий фон среднего содержания ряда микроэлементов по сравнению с их кларками в глинистых породах [Юдович, Кетрис, 1988]. Выявлена прямая зависимость между содержанием ОВ и Fe, Co, Ni, Zn, Ni, Cr, V, Cu, Ti, Mo, S, As, S, Re и ураном. Пониженные значения содержания Mn в кремниевых породах, насыщенных радиолариями, позволяют предположить установление режима открытого бассейна «апвеллингового типа» с нормальной соленостью [Шарданова и др., 2019].

Для формирования высокоуглеродистых осадков приняты два основных механизма [Brumsack, 2006]. При первом механизме допускается поступление большого количества органического вещества на дно бассейна вследствие повышенной

биопродуктивности даже в условиях нормальной аэрации придонных вод. Консервации ОВ способствуют высокие значения скорости седиментации сапропелевых илов, отсутствие устойчивых донных течений. Вторым механизмом объясняет улучшение консервации ОВ даже в условиях низкой скорости седиментации ОВ вследствие кислородного истощения столба воды, т.е. формирование аноксической обстановки придонных вод.

Нами рассмотрены те петрохимические модули, которые целесообразны и информативны при рассмотрении геохимической (окислительно-восстановительной) обстановки накопления высокоуглеродистых осадков. Содержание переходных металлов и соотношения Th/U, V/(V+Ni), V/Cr и Ni/Co можно использовать для идентификации древней аноксической среды. Как правило, когда $Th/U < 2$, $V/(V+Ni) > 0,45$, $V/Cr > 2$ и $Ni/Co > 5$, среда была бескислородной [Wu Lanyu et al., 2016]. Результаты измерений образцов из скв. Б для слоя Лон I₁¹ показали, что отношение Th/U составляло от 0,20 до 0,83; Ni/Co — от 7,7 до 30,9; V/Cr варьировало от 1,4 до 2,7, а V/(V+Ni) изменялось от 0,89 до 0,99. Распределение этих модулей по разрезу нижнего комплекса формации Лонмасы и формации Вуфонь имеет четкую корреляцию с содержанием ОВ и радиоактивностью пород. Все эти соотношения указывают на то, что осадки, формирующие слой Лон I₁¹, накапливались преимущественно в дизоксичной (бескислородной) среде (рис. 3). Частично это относится и ко времени формирования слоя Лон I₁³, в отличие от условий накопления осадков слоев Лон I₁² и Лон I₁⁴. Для последних изменились условия сохранения ОВ (с бескислородной среды на кислородную), что привело к снижению содержания ТОС.

Результаты исследований и их обсуждение. Во время формирования осадков, обогащенных ОВ, на ранней стадии формирования формации Лонмасы бассейн Сычуань был окружен поднятиями с ограниченной циркуляцией вод, что подтверждается отсутствием биотурбационных структур и преобладанием граптолитов, ведущих преимущественно нектонный образ жизни.

Детальное изучение минеральных компонентов, которые слагают пелитоморфные породы, обогащенные органическим веществом, позволило выделить две группы процессов, ответственных за состав рассматриваемых пород: седиментационные и постседиментационные. Под седиментационными понимаются процессы, действующие на стадии накопления осадка: биогенные — накопление радиолариевых и сапропелевых илов; биохемогенные — накопление опаловых илов; механогенные — привнос известкового детрита и полевошпат-глинистого материала. Среди постседиментационных факторов выделяются процессы карбонатизации (образование аутигенного кальцита и доломита), причем эти процессы наиболее

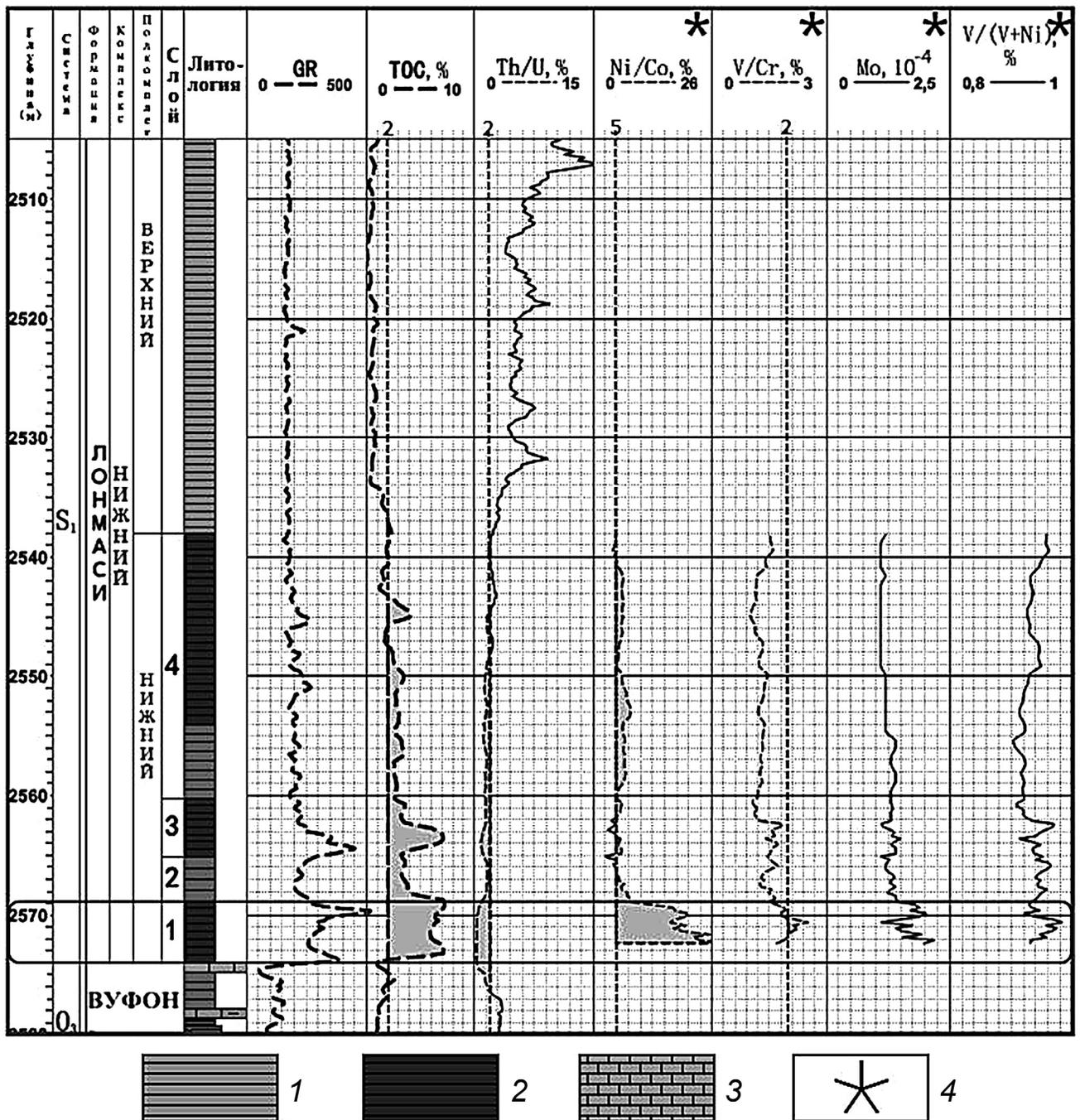


Рис. 3. Геохимические модули, характеризующие окислительно-восстановительную обстановку формирования высокоуглеродистых осадков (на примере скв. Б для формаций Вуфонь и Лонмаси): 1 — серые сланцы, 2 — черные сланцы, 3 — известняки, 4 — данные для других скважин этого района

активны в осадках, насыщенных известковым ракушняковым детритом. Опал, слагающий как основную массу, так и радиолярии, перекристаллизован на стадии катагенеза до кварца.

Необходимо обратить внимание, что по мере удаления от подножия склона внутри бассейнового палеоподнятия увеличивается доля терригенной глинистой примеси (рис. 1). Возможно, перенос как ракушнякового детрита, так и глинистых минералов в удаленные участки бассейна осуществлялся в виде нефелоидной мути (взвеси), транспортировка материала происходила с мел-

ководных участков в более глубоководную часть шельфовой впадины. Колебание соотношения этих компонентов связано, возможно, как с составом мелководных осадков, взмученных штормовыми процессами, так и с процессами дифференциации при осаднении. Преобладание в присклоновой обстановке осадков, насыщенных кремниевым планктоном, связано, вероятно, с восходящими апвеллинговыми течениями, насыщенными питательными компонентами и способствующими увеличению биопродуктивности. Аналогичная закономерность (увеличение доли ракушнякового

детрита и глинистой примеси в кремнистых высокоуглеродистых породах) отмечена и вверх по разрезу. Последнее связано с усилением привноса терригенного и эдафогенного материала в результате роста внутрибассейновых поднятий.

Заключение. В результате литологических исследований определены основные седиментационные факторы, повлиявшие на изменения минерального состава высокоуглеродистых пород

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Хао Юэсян, Шарданова Т.А., Хуан Чунсин. Особенности строения высокоуглеродистых пород на примере нижнесилурийских отложений в депрессии Сычуань платформы Янцзы // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2019. № 4. С. 84–88.

Шарданова Т.А., Хомяк А.Н., Хао Ю. Литолого-фациальный анализ высокоуглеродистых комплексов // «Экзолит–2019». М: МАКС Пресс, 2019. С. 157–159.

Юдович Я.Э., Кетрис М.П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.

Bai Wenhua, Wang Qiang, Sun Shasha et al. Geochemical characteristics and sedimentary environment of the

нижней части формации Лонмаси: повышенная биопродуктивность, привнос терригенного и эдафогенного материала нефелоидитами, анаэробная обстановка придонных вод в условиях максимальной трансгрессии.

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

Wufeng-Longmaxi shales: A case study from southwestern margin of the Sichuan basin // J. China University of Mining & Technology. 2019. Vol. 48, N 6. P. 1197–1210.

Brumsack H.J. The trace metal content of recent organic carbon-rich sediments: implications for Cretaceous black shale formation // *Palaeogeograph., Palaeoclimatolog., Palaeoecolog.* 2006. Vol. 232. P. 344–361.

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 19.02.2019

Поступила с доработки 26.02.2020

Принята к публикации 26.02.2020