

5. Тиссо Б. Образование и распространение нефти /Б. Тиссо, Д. Вельте.– М.: Мир: Редакция литературы по вопросам геологических наук, 1981.– 504 с.
6. Щепетова Е. В. Седиментология и геохимия углеродистых толщ верхней юры и нижнего мела Русской плиты: автореф. дис. на соиск. учен. степени канд. геол.-минерал. наук.– М., 2011.– 24 с.
7. Behar F. Rock-Eval 6 Technology: Performances and Developments /F. Behar, V. Beaumont, H. L. De B. Penteado /Oil & Gas Science and Technology.– Rev. IFP.– 2001.– V.56.– N.2.– P.111–134.
8. Espitalie J. Geochemical logging /J. Espitalie, F. Marquis, I. Barsony //Analytical pyrolysis – techniques and applications.– Boston: Butterworth, 1984.– P.276–304.
9. Peters K. E. The Biomarker Guide, Volume 1: Biomarkers and Isotopes in the Environment and Human History /K. E. Peters, C. C. Walters, J. M. Moldowan.– 2nd edition.– Cambridge University Press, 2005.– 474 p.
10. Peters K. E. Guidelines for evaluating petroleum source rock using programmed pyrolysis //AAPG Bulletin.– 1986.– V.70.– N.3.– P.318–329.

УДК 56 (116.2) 552.52

ВЕРХНЕЮРСКАЯ СЛАНЦЕВАЯ ФОРМАЦИЯ ЕВРАЗИИ: СРАВНЕНИЕ ВОЛЖСКОГО И ЗАПАДНО-СИБИРСКОГО БАССЕЙНОВ

© 2018 г. Л. А. Анисимов
ООО "ЛУКОЙЛ – Инжиниринг"

Среди горючесланцевых толщ волжская сланценосная толща занимает особое положение, будучи наиболее распространенной на огромной территории Северного полушария (рис. 1). Наряду с волжскими сланцами Русской платформы и баженовской свитой Западной Сибири в других районах Северного полушария в поздней юре – начале раннего мела также формировались высокоуглеродистые толщи – кимериджские глины Англии, формация Хеккинген Норвежского и Баренцева морей и др. Формирование сланценосных толщ поздней юры оценивается как событие, имеющее субглобальный характер [5, 11, 12]. В этих условиях целесообразно рассмотреть не только широко распространенные точки зрения на природу горючих сланцев, но и сопоставить их с альтернативными взглядами. Сравнение горючих сланцев Русской платформы и баженовской свиты Западной Сибири, имеющих сходный состав, но зале-

гающих в различных геолого-тектонических условиях, позволит более уверенно подойти к решению поставленных вопросов.

Распространение. Единый или изолированные бассейны позднеюрского моря?

Средневолжские «горючие» сланцы распространены на востоке *Русской платформы*. Если в Северном Каспии и Приаралье отложения представлены низкоуглеродистыми известняками и доломитами, то к северу в междуречье Волги и Урала горючие сланцы широко распространены и протягиваются в Среднее Поволжье. В северной половине платформы волжские сланценосные отложения установлены в Костромской обл. (Мантуровский сланценосный р-н), на юге Республики Коми (Сысольский и Яренгский сланценосные р-ны) и в Кировской обл. (Волго-Вятский сланценосный р-н). Еще севернее волжские углеродистые отложения установлены в Печорской синеклизе и отмечены в Баренцевом и Норвежском



Рис. 1. Распространение волжского яруса в Северном полушарии Земли. Площадь распространения волжского яруса превышает 20 млн км². Затуманена территория фактического или потенциального распространения волжского яруса [15]

морях [11, 12]. Урал и Приуралье отделяют горючесланцевые толщи Русской платформы от Западно-Сибирского мегабассейна.

В *Западной Сибири* основным аналогом волжских горючих сланцев выступает баженовская свита. Баженовская черносланцевая свита при относительно небольшой мощности (главным образом в пределах 25–30 м) распространена в области Западно-Сибирского бассейна на площади более 1 млн км². Возраст ее определяется от волжского яруса (титона) верхней юры до берриаса нижнего мела включительно [28].

Присутствие горючих сланцев в юрских отложениях установлено в южной части *Тур-*

гайской впадины. Здесь сланценосная пачка мощностью около 50 м имеет своеобразную электрокаротажную характеристику и четко выделяется среди вмещающих пород, что и послужило поводом для ее опробования. Мощности пластов и пропластков горючих сланцев колеблются от 0,3 до 3 м. Пласты имеют сложное строение: горючие сланцы перемежаются с аргиллитами и алевролитами, обогащенными ОВ, реже мелкозернистыми песчаниками. Суммарная мощность горючих сланцев в разрезе пачки составляет около 7–8 м [19].

Прослеживание горючих сланцев в Тургайском прогибе ставит вопрос о возмож-

ном соединении двух мегабассейнов в периоды формирования горючесланцевых толщ. Исследованиями геоморфологов (А. В. Тевелев) установлено, что горный рельеф Урала – результат новейших тектонических поднятий. Крупные блоки Полярного, Приполярного и Южного Урала испытали поднятия до 1,4 км местами с очень высокими градиентами движений. На Северном и Среднем Урале проявлены преимущественно сводовые поднятия с амплитудой до 250 м. При этом активизация неотектонических движений произошла на Южном Урале в конце палеогена, на Северном – в неогене и на Полярном – в середине плейстоцена. Вдоль ограничений Урала проявлены тектонические уступы высотой до 150 м с деформацией местами отложений палеогена.

Из-за различной амплитуды поднятий выделились разновысотные отрезки горной системы, играющие роль физико-географических областей: Полярно-Уральской, Приполярного Урала, Северо-Уральской, Среднеуральской, Южно-Уральской, Урало-Мугоджарской. В интервале с поздней юры до палеогена и даже раннего миоцена ориентировка морских бассейнов вокруг Урала практически не отражает уральских простираний, а в раннем мелу, по данным Е. Ю. Барабашкина, Урал был попросту затоплен. С позднего миоцена перед фронтом поднятия Южного Урала образуется устойчивая область осадконакопления, структурно подобная передовому прогибу, которая сохраняется в рельефе до настоящего времени.

Все эти данные говорят о возможной связи бассейнов Русской платформы и Западной Сибири во время юрских трансгрессий, а главный вопрос сводится к тому глобальному фактору, который определил сходные условия накопления органических веществ в глинах в относительно короткий период геологического времени на огромной территории.

Особенности состава углеродистых сланцев

В верхнеюрских толщах *Русской платформы* установлено много маломощных (0,1–0,5 м) углеродистых горизонтов локального распространения: от верхнего оксфорда до берриаса. В результате проведенных многочисленных исследований детально изучены углеродистые отложения оксфорда, кимериджа и волжского яруса, которые являются представительными для реконструкции обстановок накопления ОВ, возникавших в позднеюрских морских палеоводоемах. Эти отложения довольно близки по уровню содержания $C_{орг.}$ седиментологическим, геохимическим характеристикам. Они формировались в сходных условиях, которые в значительной мере контролировались колебаниями уровня обширных мелководных эпиконтинентальных морей, покрывавших территорию РП в максимальную фазу развития средне-позднеюрской морской трансгрессии.

Для верхнеюрских отложений характерны небольшая мощность (первые сотни м), невыдержанное распространение стратиграфических подразделений, обилие перерывов разного масштаба и длительности, резкая смена гранулометрических типов отложений по разрезу и площади за счет явлений размыва и конденсации. Сложны верхнеюрские отложения не только терригенным материалом, заметная роль в них принадлежит автохтонным осадочным компонентам – биогенным остаткам (карбонатным и, в меньшей степени, кремнистым), а также аутигенным минеральным новообразованиям, приобретающим пороодообразующее значение в отдельных стратиграфических интервалах [6].

В изученных разрезах сланценосной толщи устанавливается отчетливо выраженная слоистая структура, обусловленная чередованием пластов (толщиной от первых дм до 1 м, иногда и более) темно-коричневых

углеродистых сланцев и более светлых известково-глинистых пород.

Углеродистые сланцы во всех разрезах характеризуются отчетливо выраженной ламинарной текстурой, свидетельствующей об отсутствии значительной биотурбации первоначальных углеродистых осадков и неблагоприятных условиях для обитания зарывающихся организмов, в отличие от вмещающих глинистых отложений. В то же время петрографические исследования показывают, что горизонтальная ориентировка осадочных компонентов редко бывает настолько выдержанной, чтобы полностью исключить процессы биотурбации в углеродистых осадках. Кроме того, характерной особенностью углеродистых сланцев является частое присутствие в них остатков фауны, образующих скопления вдоль отдельных поверхностей напластования: сплюснутых раковин некрупных (в том числе ювенильных) аммонитов, двустворчатых моллюсков, гастропод; встречается раковинный детрит различной размерности. На тех же плоскостях, как правило, наблюдаются многочисленные мелкие ходы зарывающихся организмов *Chondrites* и одиночные субгоризонтально ориентированные ходы *Planolites*. По содержанию $C_{орг.}$ и текстурным особенностям сланцы подразделяются на темно-коричневые тонколистоватые, интенсивно обогащенные ОВ (15,8–24,4% $C_{орг.}$) и несколько более светлые, менее углеродистые (5,8–13,6% $C_{орг.}$), плитчатые; последние преобладают в составе сланценовой толщи. Скопления раковин и следы инфауны чаще присутствуют в относительно низкоуглеродистых сланцах, в то время как высокоуглеродистые разности обычно лишены раковинного материала, либо содержат редкие отпечатки мелких раковин, в значительной степени растворенных.

Детальное изучение структуры сланценовой толщи показало, что наиболее ха-

рактерной ее чертой является цикличность [6, 11]. Элементарный циклит (до 1 м) характеризуется контрастным содержанием $C_{орг.}$ и $CaCO_3$ в слагающих его пластах. В наиболее полном виде он состоит из трех элементов. Нижний представлен углеродистыми сланцами, верхний – светло-серыми глинисто-карбонатными отложениями, обогащенными $CaCO_3$ и практически не содержащими ОВ. Темно-серые породы среднего слоя имеют переходные характеристики между углеродистыми сланцами и карбонатными глинами. Границами циклитов являются подошвы сланцевых пластов – резкие и отчетливые, тогда как внутри циклитов переходы между пластами постепенные. Цикличность сланценовой толщи прослеживается во всех разрезах и по своему масштабу, а также характеру распределения ОВ и $CaCO_3$ близко напоминает мелкоциклическую структуру вмещающих верхнеюрских глинистых толщ, однако геохимическая контрастность циклитов существенно усилена высокими концентрациями ОВ в отложениях, слагающих нижние элементы циклитов.

Отложения *баженовской свиты* залегают на глубине от 600 м (у границ распространения) до 3500–3800 м. Как было показано многими исследователями, основными компонентами в составе баженовской свиты являются аутигенный кварц, глинистые минералы (смешанослойный иллит-сметит, хлорит, каолинит, в меньшей степени смектит, пирит, карбонат (преимущественно доломит), полевые шпаты (плагиоклаз, ортоклаз) [5, 20, 26].

Глинисто-кремнистые породы характеризуются наиболее высоким содержанием органического углерода, пирита, как и наиболее высокими показателями восстановительного режима при пониженном содержании глинистого материала. Аргиллиты нормальных разрезов имеют пониженные содержания пирита и органического угле-

рода. Породы аномальных разрезов характеризуются минимальным содержанием пирита и органического углерода в условиях окислительно-восстановительного режима как слабоокислительного или переходного от восстановительного к окислительному и трактуются как продукты наиболее быстрой седиментации материала из подводных дельт или каньонов. При этом глинисто-кремнистые породы отвечают более медленному темпу седиментации слагающего их материала, более высокому содержанию пирита и органического вещества. Сделан вывод, что основными концентраторами того и другого компонента являлись пирит и органическое вещество в условиях их повышенного содержания, пониженного темпа седиментации и повышенного восстановительного режима среды.

Для баженовской свиты на некоторых частях разреза наблюдается исключительно высокая насыщенность породы аммонитами. «Кладбища» аммонитов встречаются и в керне многих скважин, но во всех случаях они приурочены только к баженовитам. Существенно более высокое содержание аутигенного кремнезема в баженовитах, по сравнению с аргиллитами, указывает, что в осадок, по которому сформированы баженовиты, поступало значительно большее количество остатков организмов с кремнистым скелетом, или же существовал другой источник кремнезема.

Органическое вещество

Петрографические исследования волжских сланцев показали, что в углеродистых сланцах присутствует в основном бесструктурное ОВ (до 90–99%), соответствующее коллоальгиниту [6, 13, 30], окрашенному в разные оттенки желтого, оранжевого и коричневого цветов. Он образует тонкие слои или мелкие линзочки (длиной до нескольких мм), располагающиеся параллельно напластованию. Возрастание концентраций $C_{орг}$ в сланцах коррелируется

с увеличением содержания в них коллоальгинита. Глинистый матрикс углеродистых сланцев часто бывает пропитан ОВ, напоминающим коллоальгинит, но тонкодисперсный. В составе ОВ средневожских углеродистых сланцев иногда присутствуют многочисленные остатки деформированных тонкостенных одноклеточных водорослей (до 10%), не поддающихся точным таксономическим определениям. В настоящее время они представлены светло-желтыми сферическими образованиями, смятыми или надорванными, а также их отдельными фрагментами. По морфологическим признакам эти компоненты относятся к талломоальгиниту [13]. В виде незначительной примеси (1–5%) в ОВ сланцев присутствуют споры и пыльца наземных растений, имеется также примесь мелких темных обрывков наземной растительности. Наибольшее количество наземного фитодетрита отмечается в углеродистых сланцах со значительным содержанием алевритовой примеси. Генерационный потенциал волжских углеродистых сланцев оценивается как высокий (32,86–159,6 УВ/г), однако для известково-глинистых пород характерны его низкие значения (0,40–2,82 УВ/г). Значения водородного индекса ($HI = 402–874$) керогена углеродистых сланцев свидетельствуют о его преимущественно морском происхождении. В целом кероген волжских сланцев принадлежит к керогену I–II типа, который обычно характеризуется хорошей сохранностью углеводородной части первичного ОВ, несмотря на имевшие место процессы окислительной биохимической деструкции. В известково-глинистых отложениях установлены гораздо более низкие значения HI (17–302). Наименьшие из них характерны для пород (в которых $C_{орг} < 3\%$), практически не содержащих коллоальгинита. Несколько повышенное по сравнению с фоновым уровнем содержание органиче-

ского углерода в них связано с присутствием существенно преобразованной органики, а в ряде случаев – с мелким аллохтонным углефицированным растительным фитодетритом.

В составе верхнеюрских отложений *Западно-Сибирской плиты* отмечалось также присутствие свободного кремнезема в виде прослоев кремней, скоплений криптокристаллического кварца в глинистой массе, остатков радиолярий и т.д. Лебедевым Б. А. с соавторами [20] было показано, что повышенное содержание ОВ (средние значения 5,5–13,5%) отвечает породам глинисто-кремнеземисто-пиритового состава с тем или иным количеством карбонатного материала. Среднее содержание аутигенного кремнезема по отдельным типам пород составило от 4 до 40% и более. Что же касается собственно аргиллитов, то для них типично содержание ОВ менее 2%. Отмечалось, что повышение содержания органического углерода обычно влечет за собой рост концентраций биогенного кремнезема, фосфора, серы, извести [26].

Генезис позднеюрских сланцев: природа глинистых отложений

Масштабы переноса эндогенных материалов и флюидов в зону развития осадочных процессов часто недооцениваются, особенно это касается глинистых пород. При рассмотрении строения ряда глинистых формаций большой мощности (силурийская Балтийского бассейна, майкопская Каспийско-Черноморского региона) выявлен незначительный объем пород кластического материала более крупных фракций, что не соответствует общей схеме механической дифференциации при разрушении коренных пород магматических и метаморфических комплексов.

С другой стороны, ряд исследователей приводят факты о значительном присутствии *вулканогенных продуктов* в составе глинистых пород для многих глинистых

формаций, что указывает на необходимость оценки эндогенных факторов при рассмотрении условий их формирования. После эолового переноса вулканический пепел, состоящий в основном из химически неустойчивого вулканического стекла и других силикатов, осаждается на земную или водную поверхность. В морском бассейне реакционно способный вулканокластический материал легко преобразуется в более устойчивые минеральные компоненты – так называемую «камуфлированную пирокластику» [18].

Американские исследователи формации Грин-Ривер – крупнейшей горюче-сланцевой формации мира, пришли к выводу о том, что вулканический пепел сформировал основную массу пород формации [31]. Процессы извержения сопровождались массовой гибелью высших организмов, в частности скопления черепашьих фиксировали начало вулканических процессов.

Несмотря на быстрые трансформации вулканокластических частиц, свидетельства разгрузки пепловых облаков обнаруживаются как в современных, так и в древних толщах Русской платформы. Так, следы эффузивной деятельности в мезозое Русской плиты отмечались Ренгартен И. В. и Кузнецовой К. И. [25]. Пирокластический материал ими выявлен в нижне- и средневожских мергелях и горючих сланцах в виде остроугольных осколков вулканических стекол с плоскораковистым изломом и газовыми включениями и обломков свежих кристаллов пироксена, амфибола и биотита. Яночкиной З. А. и Букиной Т. Ф. [29] при изучении цеолитсодержащих средневожских горючих сланцев Заволжья установлена «камуфлированная пирокластика» – минеральная ассоциация (монтмориллонит, цеолиты, вулканическое стекло), косвенно свидетельствующая о влиянии на ход осадконакопления синхронных вулканических процессов [18]. Примечательно, что в

шлифах из вмещающих пород установлены рогульчатые включения вулканического стекла, остроугольные мелкие зерна кварца, преобразованные пепловые частицы и гейландит из группы цеолитов [2, 16].

После эолового переноса тефра, состоящая в основном из химически неустойчивого вулканического стекла и фемических силикатов, осаждается на земную или водную поверхность. Пепловые частицы обычно интенсивно замещаются вторичными глинистыми минералами, содержащими повышенное количество смешанослойной фазы гидрослюда-монтмориллонит. Для Западной Сибири прослой с примесью пеплового материала и признаки подводной эксгальвативной деятельности обнаружены в верхнеюрских отложениях баженовской свиты в Салымском, Красноленинском и других районах [10]. В составе глинистого цемента глинистых силицитов и высококремнистых аргиллитов с прослоями радиоляритов баженовской свиты в Салымском, Красноленинском, Шаимском и Северо-Сосьвинском районах широко распространены тонкодисперсные смешанослойные минералы монтмориллонит-гидрослюдистого состава, формирование которых связано с замещением реликтов пеплового материала.

На основе приведенных данных оценить соотношение твердого поверхностного стока и пеплового материала в верхнеюрских глинах не представляется возможным, однако огромные площади накопления достаточно однообразных чистых глин в мелководном бассейне заставляют с сомнением отнестись к классическим схемам механической дифференциации для объяснения условий накопления глинистых формаций в позднеюрских бассейнах. Фиксация пеплового материала во многих горючсланцевых формациях различного возраста заставляет предполагать, что и в нашем случае эндогенный фактор играл немало-

важную роль в формировании глинистых толщ.

Другим доказательством эндогенной природы глинистых сланцев является повышенное содержание многих микроэлементов. Для *Русской платформы* при переходе от глинистых пород к углеродистым сланцам одновременно с $C_{орг.}$ (5–27%) возрастает содержание многих химических элементов. Наиболее существенно увеличиваются концентрации тех элементов (S, Se, Ni, Ag, Mo, V, P), содержание которых в подстилающих кимериджских и нижневожских породах уже было повышенным. Среди них выделяются наиболее высокой степенью концентрирования S, Mo и Se. Содержание этих элементов в сланцах разных районов Русской платформы в 20–50 раз и более превышают кларковый уровень, а концентрации Mo в наиболее высокоуглеродистых разновидностях сланцев ($> 30\% C_{орг.}$) – в 100 раз и более. Эти величины более чем на порядок выше установленных во вмещающих известково-глинистых породах. В меньшей степени, но также заметно, в сланцах концентрируются Ni, Ag, V, P и в ряде случаев Cu. Содержание этих элементов иногда в 5–10 раз превышает кларковый уровень, что существенно выше геохимического «фона» для этих элементов во вмещающих известково-глинистых отложениях. Обособляется группа 19 химических элементов Zn, Co, Cr, As с относительно более низким уровнем концентрирования в горючих сланцах, но который, тем не менее, в 2–5 раз превышает среднее содержание этих элементов в глинистых породах. Во вмещающих глинистых осадках эти элементы не накапливались и, следовательно, существенно изменили свое поведение в обстановках с интенсивным накоплением морского ОВ.

По *баженовской свите* содержание Ni, Mo, Co понижается от глинисто-кремнистых пород к аргиллитам нормальных раз-

резов и далее к породам аномальных разрезов. При этом в глинисто-кремнистых породах содержание каждого из них превышает средние содержания в однотипных черных сланцах по мировым данным. Для никеля это превышение (336,7 г/т против 63 г/т) в 5,3 раза, для молибдена (264,5 г/т против 29 г/т) в 9,1 раз, для кобальта (30,3 г/т против 11 г/т) в 2,6 раза. В аргиллитах нормальных разрезов содержание никеля понизилось в 3,4 раза (до 97,9 г/т), молибдена в 5,3 раза (до 49,4 г/т), кобальта в 1,96 раз (до 15,47 г/т). В аргиллите алевритовом и глинисто-алевритовой породе аномального разреза по совокупности содержание молибдена относительно аргиллита нормального разреза уменьшилось уже в 36 раз (до 1,36 г/т), никеля в 2,25 раза (до 43,5 г/т), кобальта в 1,2 раза (до 12,7 г/т). Наиболее чувствителен к изменению состава пород (уменьшение содержаний органического углерода и пирита и условий формирования пороодообразования) молибден, наименее чувствителен кобальт. Глинисто-кремнистые черные сланцы баженовской свиты по содержанию всех трех рассматриваемых элементов являются металлоносными, чего нельзя сказать о содержании этих элементов в породах других типов [14, 27].

Плуман И.И. [23] рассмотрел содержание урана и тория в породах баженовской свиты. Содержание урана в битуминозных аргиллитах свиты с повышенным содержанием органического углерода и пирита составляет $1-7 \times 10^{-3} \%$, что значительно больше, чем в выше- и нижележащих песчаноглинистых породах региона. По направлению к краевым частям бассейна содержание урана в породах баженовской свиты уменьшается. В то же время концентрация тория в породах свиты почти не увеличивается по сравнению с его содержанием в юрско-меловых породах других свит бассейна, где оно варьирует от 5×10^{-4} до $2 \times 10^{-3} \%$. Отношение Th/U в породах ба-

женовской свиты не превышает единицы, тогда как в породах других свит разреза оно составляет 2–3 и более. Автор считает, что отложения баженовской свиты, сформированные в восстановительных условиях, сходны с осадками Черного моря, также образующимися в обстановке сероводородного заражения.

Хабаров В.В. с соавторами [27] связал содержания урана в баженовской свите с определенными типами пород. Наиболее высокие содержания урана (50–60 г/т) в Салымском нефтегазоносном районе, по данным этих авторов, характерны для сильно битуминозных глинистых пород с высоким (10–15%) содержанием органического углерода (тип I). В слабо битуминозных глинистых породах с содержанием органического вещества в 5–6% (тип II) содержания урана более низкие (20–45 г/т). Наконец, уплотненные, часто карбонатизированные породы (тип III) содержат 10–20 г/т урана.

Предполагается, что обогащение пород указанными элементами происходило за счет гидролиза алюмосиликатных пород доюрского основания в результате их проработки гидротермальными растворами, которые циркулировали в зонах глубинных разломов и по флюидоподводящим каналам высачивались на поверхности дна баженовского бассейна.

***Генезис позднеюрских сланцев:
«сапропелевая» или «глубинная» природа
органического вещества?***

Как отмечает Г.А. Беленицкая [3], ключевой и наиболее спорный в проблеме генезиса черных сланцев вопрос – причина внезапного накопления аномально высоких концентраций органического вещества. Наиболее популярна версия, согласно которой массовое накопление органического вещества объясняется повышенной «комфортностью» обстановки, обусловленной оптимальным сочетанием благоприятных

глобальных и региональных факторов (эвстатических, гидрологических, климатических и др.), которые определили вспышки продуктивности нормально-бассейновых биоценозов. Возникшее же в итоге перепроизводство биомассы считается причиной эвтрофикации водоемов, способствующей, в свою очередь, сохранению органического вещества в осадках.

В качестве источника углерода при формировании пород как волжских горючих сланцев, так и баженовской свиты рассматривается биогенное органическое вещество бассейна седиментации, продукция которого (и условия захоронения) являлась уникальной для соответствующих зон и соответствующих отрезков времени. Еще в 1934 г. Страховым Н. М. были заложены представления о едином генезисе волжских углеродистых сланцев на территории Русской платформы и установлены наиболее характерные их особенности – высокая насыщенность остатками бентосной фауны и специфический, обогащенный водородом, азотом и серой состав ОВ; предложена модель «подводных лугов», связывающая формирование сланцев с усиленным накоплением в осадках остатков биомассы бентосных водорослей и аквафильных высших растений в палеоводоеме с нормальной соленостью и нормальным газовым режимом. Остается неразрешенным вопрос об огромной продуктивности таких водоемов. Для его решения привлекались экологические аномалии, причиной их возникновения наиболее часто предполагалось опреснение палеоводоема, а следствием – явление массовой гибели («заморы») морских организмов или вспышки продуктивности атипичных водорослей.

В 1990–2000-е гг. были высказаны первые предположения о возможной связи обстановок накопления ОВ с надрегionalными факторами – эвстатическими колебаниями уровня моря [21]. Наиболее удов-

летворительно вспышки биопродуктивности объясняются с помощью модели поступления в водоем биофильных элементов во время быстрых и относительно непродолжительных трансгрессий, которым предшествовали регрессивные эпизоды [11]. Ключевыми условиями для реализации данной модели являются: а) пологий уклон дна эпиконтинентальных водоемов от берега в сторону моря, в результате чего уже при малоамплитудных колебаниях уровня происходила значительная миграция береговой линии; б) небольшие глубины (до 200 м) и, как следствие, чувствительность фациальной структуры к изменениям уровня моря; в) неровный рельеф дна с выраженными пологими депрессиями и поднятиями. Вследствие такого характера рельефа при регрессии на освободившихся от моря территориях возникала система озер, болот или полузамкнутых водоемов (крайне мелководных и хорошо прогреваемых). В условиях гумидного климата в них накапливались растительное и растворенное ОВ, биофильные элементы.

На стадии регрессии на освободившихся от моря территориях в условиях гумидного климата быстро формировались почвы, озеро-болотные ландшафты, где происходило накопление ОВ в твердом и растворимом виде, а также соединений биофильных элементов P, N, Fe и др. После того как регрессию сменяла трансгрессия, наступавшее море взаимодействовало с этими ландшафтами. При этом в море поступали биофильные элементы, что приводило к резкой вспышке биопродуктивности наиболее низкоорганизованных форм биоты – бактериопланктона, органикостенных динофлагеллят др., соответственно к накоплению обогащенных ОВ илов. Причем выносившееся из этих ландшафтов твердое ОВ растительного происхождения также принимало участие в формировании углеродистых осадков.

Такая схема обогащения органическим веществом глинистых отложений не вызвала бы возражений, если бы не развитие этих сходных процессов на огромной территории в относительно узкий отрезок геологического времени. «Субглобальный» характер явления заставляет рассмотреть другие аспекты генезиса этих отложений с упором на масштабные геодинамические процессы, характерные для текущего момента в истории Земли, которые создают резко дискомфортные условия, вызванные стрессовыми воздействиями интенсивных разгрузок восходящих флюидов. Известна модель С.Г. Неручева, согласно которой периодические поступления в биосферу избытка урана и других металлов вызывают цветение цианобактерий и формирование осадков, обогащенных органическим веществом и металлами. Беленицкая Г.А. отводит определяющую роль присутствию в составе флюидов углеводородов (УВ) – нефтей, газов, нефтяных вод, часто металлоносных [3]. В этой связи вполне логично выглядит трактовка, предложенная Б.М. Валяевым [8], где говорится, что аномалии и комплексы, обогащенные органическим веществом, не были материнскими по отношению к обычным залежам. Аномалии являются «ореолами вторжения» локализованных потоков глубинных углеводородных флюидов вторжения, сформировавших не только аномалии, но и сами залежи нетрадиционного типа.

Отдельным вопросом геохимии является аномально высокое содержание серы в органическом веществе волжских горючих сланцев, что в несколько раз выше, чем в сланцах других районов мира. По мнению Н.Л. Погребнова и Н.Б. Погребновой [24], повышенное содержание серы в органическом веществе объясняется тем, что практически на всей площади, обрамляющей с востока бассейн седиментации, в составе размываемых континентальных пород на-

ходились мощные пермские карбонатно-сульфатные отложения, обусловившие массовое поступление сульфатов в бассейн седиментации и формирование его аномального гидрохимического режима. Помимо этих сульфатных пород к другим источникам накопления серы следует отнести соляные купола и разломы, где происходил размыв гипсоносных и ангидритовых пород кепроков соляных куполов пермского возраста, прорвавших сланценосную толщу.

С нашей точки зрения, наиболее вероятным источником осернения органического вещества могла бы быть масштабная разгрузка сероводородсодержащих флюидов в бассейны седиментации, причем основной зоной, где проходила генерация сероводорода, являлись подсолевые отложения Прикаспийской впадины.

Внешний источник сероводорода предполагался для объяснения широкого распространения сульфидных минералов в юрских отложениях Ульяновско-Саратовского прогиба. Здесь, помимо аутигенных минералов фонового литогенеза, в породах разреза отмечаются области придонных палеовысачиваний сероводородных сипингов, ранее разгружавшихся в краевых частях Среднерусского палеоморя [22]. Признаками высачиваний являются локально распространенные в глинистых и терригенных отложениях стратиформно залегающие осадочно-диагенетические пиритовые конкреции, образующие поле рудной минерализации площадью до 5,0 км². В центральной части поля порода содержит от 30 до 60 штук сульфидных конкреций на каждый квадратный метр, по мере продвижения к периферии плотность сонахождения агрегатов постепенно уменьшается, вплоть до их полного исчезновения. В центральных частях пиритового поля в глинистых отложениях фиксируются конусовидные образования высотой до 30,0 см, которые в

виде останцев выступают над размытыми волнами абразионными террасами. Конусовидные останцы сложены частичками глинистых минералов исходной породы, скрепленных многочисленными пиритовыми агрегатами. В песчаниках наблюдаются менее выраженные зоны палеовысачиваний в виде небольших пиритовых конусов, вокруг которых фиксируются следы растекания сероводородсодержащих растворов. Пиритовые агрегаты, формирующиеся в различных геохимических обстановках литогенеза, дают возможность оценить особенности влияния окружающей среды на структурно-вещественные характеристики сульфидных новообразований.

Поступление сероводорода в бассейн седиментации, где он контактировал с растворенным кислородом, вело к образованию рассеянной элементарной серы, которая внедрялась в органическое вещество. В результате содержание серы в органическом веществе волжских горючих сланцев является аномальным даже при сравнении с другими горючими сланцами мира (табл.).

Другим доказательством такой схемы осернения ОВ горючих сланцев является расположение их основных месторождений в районе северного борта Прикаспийской впадины, где вертикальная миграция

сероводорода и углеводородов происходила в зоне выклинивания соленосных отложений кунгурского возраста (рис. 2).

Гидротермальным процессам, которые активируют органическое вещество горючих сланцевых толщ, придается решающее значение при формировании зон с подвижной нефтью. Для баженовской свиты процессы, сопровождающиеся развитием сульфатного и карбонатного минералообразования, а также увеличением продуктивности отложений, детально рассмотрены А. Д. Коробовым с соавторами [17].

Проблемы освоения

В последние десятилетия периодически возникают проекты и дискуссии о возможности использования углеводородного потенциала горючих сланцев. Реализованные проекты пока нельзя назвать успешными, так как не было получено убедительных доказательств их экономической эффективности в данных условиях. С нашей точки зрения, такое положение связано с нерешенностью ряда теоретических вопросов по условиям образования, составу керогена горючих сланцев, характеру связи органического вещества и минеральной матрицы пород.

Баженовская свита имеет в своем составе как слабопроницаемые материнские породы, в которых продолжаются процессы преобразования органического вещества в нефть, так и более проницаемые насыщенные пропластки. Данная особенность строения определяет наличие аномальных участков, в которых единая толща нефтематеринской породы расслаивается более проницаемыми песчано-алевритовыми слоями. Такие разрезы баженовской свиты обладают высоким доказанным потенциалом нефтеносности, и сегодня именно они обеспечивают основной объем добычи. Одним из успешных проектов стал Салымский проект – добыча нефти из баженовской свиты с применением многостадийного гидро-

Таблица

Элементный состав органического вещества волжских месторождений горючих сланцев

Месторождение	Состав керогена, wt%				
	С	Н	S	N	О
Савельевское	62,8	7,9	9,7	0,5	19,6
Перелюбское	68,1	9,2	11,0	2,5	10,3
Концебинское	65,0	8,2	8,4	1,7	15,2
Общий Сырт	67,0	8,0	7,7	1,7	12,4

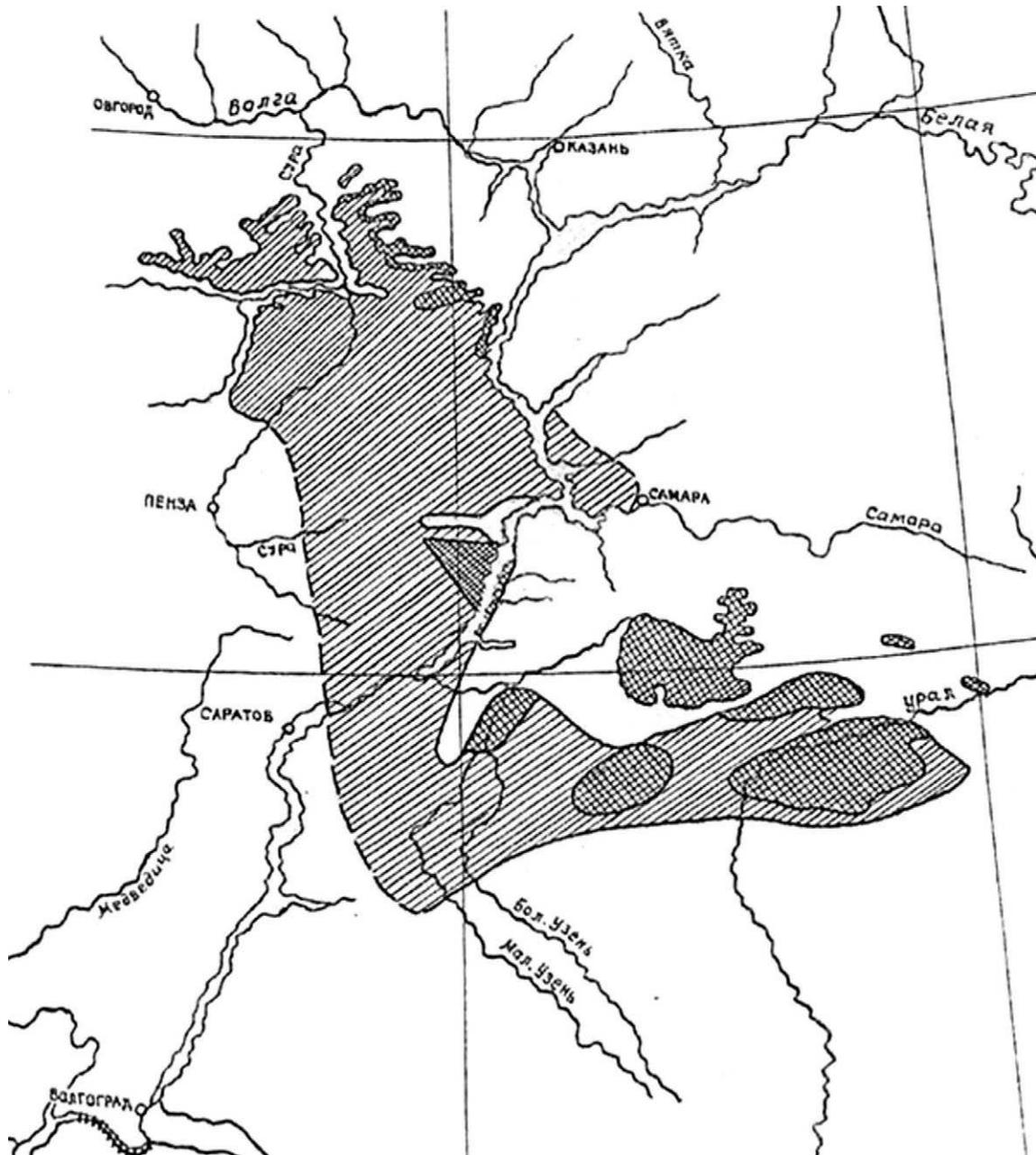


Рис. 2. Распространение волжских горючих сланцев и расположение основных месторождений (клеточная штриховка) в Среднем Поволжье

разрыва пласта (МГРП) и химического заводнения.

Большие надежды возлагаются на метод термогазового воздействия, который применяется компанией ООО «РИТЭК» на Средне-Назымском месторождении. При закачке водовоздушной смеси в трещиноватых пропластках продвигается зона генерации тепла, разогревающая окружающие

слои породы, при этом идет активный процесс извлечения легкой нефти из недренируемых зон, плюс извлечение нефти из керогена за счет термического крекинга и пиролиза. При этом увеличение водовоздушного отношения (ВВО) приводит к увеличению размера тепловой оторочки и увеличению глубины прогрева окружающих слоев нефтенасыщенной породы [1].

В целом оценки ресурсного потенциала баженовской свиты достаточно противоречивы. Это связано с низкой изученностью и отсутствием доказанных эффективных технологий добычи. Использование технологии МГРП для залежей баженовской свиты достаточно затруднительно из-за неоднородности нефтенасыщенных интервалов, больших глубин залегания, аномально высокого давления и высокой температуры. На текущий момент извлекаемые запасы баженовской свиты по категориям $ABC_1 + C_2$ сравнительно невелики и составляют около 530 млн т, основная часть которых приходится на низкопроницаемые коллекторы.

Опыт освоения неглубоко залегающих волжских горючих сланцев имеет более длительную историю. Горючий сланец расписывался как потенциальный источник нефти на срок более ста лет для стран по всему миру, но это направление так и не развилось из-за высокой стоимости процесса извлечения нефти из сланца и урона, наносимого естественным ресурсам.

Самые крупные компании, включая Shell, за свои средства проводят долгосрочные эксперименты, чтобы узнать, могут ли они добывать нефть из сланца, нагревая породу на месте через скважины, избегая таким образом экологических проблем, связанных с добычей. Представители компании Shell заявили, что они не будут принимать решений касательно коммерческой обоснованности промышленного использования горючего сланца до конца этого десятилетия.

В Европе самой продвинутой страной в использовании энергии горючих сланцев является Эстония, которой досталось все сланцевое хозяйство после распада СССР. Не меньшие надежды связывались с волжскими горючими сланцами, кото-

рые широко использовались в довоенное время.

Уникальный разведанный потенциал альтернативного углеводородного сырья, расположенного в Европейской части России, до настоящего времени не востребован по причине особенности геологических разрезов месторождений и качества сырья. Разрабатывать такие месторождения традиционным шахтным способом нерентабельно с экономической стороны и недопустимо с экологической. На каждую тонну добытого ископаемого нужно будет добывать 4–5 тонн пустой межсланцевой породы, разместить в отвалах, которые впоследствии будут выделять H_2S .

Специалисты Саратовской области разработали технологию бесшахтной добычи твердых полезных ископаемых на месторождениях любой категории сложности с различной величиной запасов, включая мелкие и мельчайшие, геологический разрез которых представлен тонкими и очень тонкими продуктивными пластами. Разработаны и методы переработки горючих сланцев, использования получаемых полезных продуктов. Таким образом, получение энергетического сырья, химических продуктов и комплексная переработка отходов на поверхности представляется как наиболее перспективный путь освоения месторождений горючих сланцев.

Величина запасов горючих сланцев, а их запасы оцениваются в 55 млрд т, качество и стоимость продуктов их переработки заставляют более серьезно подойти к решению вопросов их эффективного освоения. Нарботанный компаниями технологический, финансовый и научный потенциал по комплексной переработке горючих сланцев на поверхности позволит занять им лидирующее положение в решении проблемы освоения месторождений такого типа.

1. Новый отечественный способ разработки месторождений баженовской свиты (Ч. 1) / В. Ю. Алекперов, В. И. Грайфер, Н. М. Николаев и др. // Нефтяное хозяйство. – 2013. – № 12. – С. 100–105.
2. Ахлестина Е. Ф., Курлаев В. И. О цеолитонности пепловых отложений Саратовского и Волгоградского Поволжья // Труды конференции по вопросам геологии, физико-химических свойств и применения природных цеолитов. – Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА, 1985. – С. 41–442.
3. Беленицкая Г. А. Последствия нефтяных катастроф глазами седиментолога // Природа. – 2010. – № 2. – С. 25–34.
4. Бойко Н. И. Верхнеюрские горючие сланцы Северного Кавказа и условия их образования // Осадочные формации юга России и связанные с ними полезные ископаемые. – М., 2011. – С. 8–15.
5. Брэдучан Ю. В., Захаров В. А., Месежников М. С. Стратиграфия и условия образования битуминозных отложений верхней юры-неокома Европейской части СССР и Западной Сибири // Осадочная оболочка Земли в пространстве и времени. Стратиграфия и палеонтология: докл. сов. геологов на XXVIII сессии МГК / под ред. Б. С. Соколова. – М.: Наука, 1989. – С. 108–115.
6. Букина Т. Ф. Седиментогенез и ранний литогенез верхнеюрских сланценосных отложений центральной части волжского бассейна. – Саратов: изд-во Саратов. ун-та, 2013. – 128 с.
7. Бушнев Д. А., Льюров С. В. Органическая геохимия юрских отложений Сысольского сланценосного района (Республика Коми) // Геохимия. – 2002. – № 2. – С. 220–227.
8. Бушнев Д. А., Бурдельная Н. С. Сероорганические соединения верхнеюрской сланценосной толщи Сысольского района // Нефтехимия. – 2003. – Т. 43. – № 4. – С. 256–265.
9. Валяев. Б. М. Нетрадиционные ресурсы и скопления углеводородов: особенности процессов нефтегазоаккумуляции // Дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений (к 100-летию со дня рождения академика П. Н. Кропоткина). – М.: ГЕОС, 2011. – С. 390–403.
10. Ван А. В., Предтеченская Е. А., Злобина О. Н. Продукты вулканизма в юрских отложениях Приуральской части Западно-Сибирской плиты // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2011. – № 4. – С. 15–22.
11. Седиментология, геохимия и биота волжских углеродистых отложений северной части Среднерусского моря (Костромская область) / Ю. О. Гаврилов, Е. В. Щепетова, М. А. Рогов, Е. А. Щербинина // Литология и полезные ископаемые. – 2008. – № 4. – С. 396–424.
12. Гавшин В. М., Захаров В. А. «Баженовиты» на норвежском континентальном шельфе // Геология и геофизика. – 1991. – № 1. – С. 62–71.
13. Гинзбург А. И. Петрография органического вещества горючих сланцев // 8-й Международный конгресс по стратиграфии и геологии карбона. – М.: Недра, 1979. – Т. 4. – С. 102–108.
14. Корреляционные связи органического вещества с минеральными компонентами в баженовской свите / Ю. Н. Занин, А. Г. Замирайлова, Д. Ю. Давыдов, В. Н. Меленевский // Геология нефти и газа. – 1997. – № 1. – С. 23–25.
15. Захаров В. А. В защиту волжского яруса // Стратиграфия. Геологическая корреляция. – 2003. – № 6. – С. 60–69.
16. Илясов В. С., Староверов В. Н. Закономерности распределения глинистых минералов в сланценосной толще *Dorsoplanites Panderi* Коцебинского месторождения // Вестник ВГУ, сер. геология. – 2017. – № 2. – С. 26–29.

17. Развитие вторичного доломита, сопутствующих минералов и продуктивность залежей в битуминозных породах баженовской свиты (Западная Сибирь) / А. Д. Коробов, Е. Ф. Ахлестина, Р. И. Гордина и др. // Недра Поволжья и Прикаспия. – 2017. – Вып. 91. – С. 3–21.
18. Коссовская А. Г. Генетические типы цеолитов стратифицированных формаций // Литология и полезные ископаемые. – 1975. – № 2. – С. 23–44.
19. Нефтепроизводящие комплексы мезозойских отложений Южно-Тургайского НГБ / В. К. Крюков, С. Д. Мурсалимов, Ф. С. Рабкин, Г. П. Филиппев // Геология нефти и газа. – 1987. – № 4. – С. 43–49.
20. Вещественный состав и природа емкости глинисто-сапропелево-кремнистых нефтеносных отложений баженовской свиты (верхняя юра) Западной Сибири / Б. А. Лебедев, Т. В. Дорофеева, С. Г. Краснов и др. // Литология и полезные ископаемые. – 1979. – № 2. – С. 90–101.
21. Льюров С. В. Юрские отложения севера Русской плиты. – Екатеринбург, 1996. – 176 с.
22. Николаева В. М., Шиловский Щ. П., Королев Э. А. Морфологические особенности пиритовых конкреций среднеюрских отложений Среднерусского моря как отражение просачиваний сероводородных флюидов // Металлогения древних и современных океанов: Институт минералогии УрО РАН (Миасс). – 2014. – № 20. – С. 76–78.
23. Плуман И. И. Ураноносность черных аргиллитов волжского яруса Западно-Сибирской плиты как критерий геохимических условий осадконакопления // Геохимия. – 1971. – № 9. – С. 1138–1143.
24. Погребнов Н. Л., Погребнова Н. Б. Условия накопления серы в горючих сланцах Волжского бассейна // Вестник Южного научного центра РАН. – 2006. – Т. 2. – № 1. – С. 49–55.
25. Ренгартен И. В., Кузнецова К. И. Пирокластический материал в позднеюрских осадках Русской платформы // Докл. АН СССР. – 1967. – Т. 173. – № 6. – С. 1422–1425.
26. Ушатинский И. Н. Литология и перспективы нефтеносности юрско-неокомских битуминозных отложений Западной Сибири // Советская геология. – 1981. – № 2. – С. 11–22.
27. Уран, калий и торий в битуминозных породах баженовской свиты Западной Сибири / В. В. Хабаров, О. М. Нелепченко, Е. И. Волков, О. В. Боргашевич // Советская геология. – 1980. – № 10. – С. 94–105.
28. Стратиграфия нефтегазоносных бассейнов Сибири / Б. Н. Шурыгин, Б. Л. Никитенко, В. П. Девятков и др. // Юрская система. – Новосибирск: изд-во СО РАН, филиал “ГЕО”, 2000. – 481 с.
29. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. – Екатеринбург: УрО РАН, 2010. – 412 с.
30. Яночкина З. А., Букина Т. Ф. Цеолитовая минерализация в горючих сланцах Волжского бассейна // Труды конференции по вопросам геологии, физико-химических свойств и применения природных цеолитов. – Тбилиси: МЕЦНИЕРЕБА, 1985. – С. 45–48.
31. Brand L. Lacustrine Deposition In The Bridger Formation: Lake Cusiute Extended // The Mountain Geologist. – 2007. – V.44. – N2. – P.69–78.

