

УДК 553.83

## РАЗВЕДКА И РАЗРАБОТКА СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ НА ТЕРРИТОРИИ КИТАЯ: СОСТОЯНИЕ, ВЫЗОВЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Чж. Цзинь<sup>1,2,3</sup>, С. Лян<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Институт энергетики Пекинского университета, 100871, Пекин, Китай

<sup>2</sup>Ключевая национальная лаборатория механизмов обогащения сланцевой нефти и газа  
и их эффективной разработки, 100871, Пекин, Китай

<sup>3</sup>Институт по разведке и разработке нефти Синопек, 100083, Пекин, Китай

Представлена информация о современном состоянии разведки и разработки сланцевой нефти в озерных континентальных формациях в основных бассейнах на территории Китая, обобщены основные теоретические идеи, ключевые технологии, рассмотрены перспективы разведки и разработки сланцевой нефти континентальных формаций на территории Китая. Считается, что разведка и разработка скопленных сланцевой нефти в обогащенных органическим веществом типов I и II средней и высокой зрелости сланцевых формациях является ключевым направлением для доведения ее добычи в Китае до уровня 10 млн т/год. Это сыграет важную роль в перспективе стабильной добычи нефти Китая до 200 млн т/год. Методика добычи нефти в обогащенных органическим веществом сланцевых формациях средней и низкой зрелости должна быть разработана, это приведет к серьезным изменениям в добыче нефти и новым успехам в теории и технологии освоения сланцевых месторождений.

*Континентальная сланцевая нефть, поиски, разведка, разработка, Китай*

## EXPLORATION AND DEVELOPMENT OF SHALE OIL IN CHINA: STATE, CHALLENGES, AND PROSPECTS

Z. Jin, X. Liang

This article presents the latest state of exploration and development of shale oil of continental lacustrine formations in the main basins of China, summarizes the main theoretical considerations and key technologies for exploration and development, and suggests prospects for exploration and development of shale oil in China. It is believed that the exploration and development of oil in shale formations rich in organic matter of types I and II of medium and high maturity are key to the breakthrough of production of 10 million tons in China. This will play an important role in China's stable oil production at the level of 200 million tons per year in the future. The efficient development of medium- and low- maturity shale oil resources can be significantly improved and lead to serious changes in oil production only after new breakthroughs in the theory and technology of shale deposits.

*Continental shale oil, prospecting, exploration, development, China*

## ВВЕДЕНИЕ

Нефть и газ останутся основным источником первичной энергии в мире на длительное время. Согласно последним прогнозам Управления энергетической информации США (EIA), Международного энергетического агентства (IEA), ОПЕК, ИНГТ СО РАН и других организаций, в 2040 г. в мировом энергопотреблении по-прежнему будет доминировать ископаемое топливо, нефть и газ будут обеспечивать более 50 % производства первичной энергии.

Сланцевая нефтегазовая революция значительно увеличила уровень самообеспеченности нефтью и газом в США. Она изменила глобальную энергетическую карту и повлияла на энергетическую дипломатию различных стран. Добыча сланцевой нефти в США в 2019 г. была равна  $385 \times 10^6$  т, что составляло 65.2 % от объема добычи нефти в стране. Это позволило США превратиться из импортера в частичного экспортера энергии [Jin et al., 2019a; BP, 2020; Zou et al., 2020]. Прогнозируется, что в 2035 г. США смогут увеличить добычу традиционной нефти в три раза [Yang, Jin, 2019; EIA, 2020]. То, что сланцевая нефть является основным источником роста добычи нефти в США, оказывает глубокое влияние на фундаментальные научные исследования и технологические инновации в энергетике, а также влияет на состояние запасов и добычи нефти и газа в ряде стран [Кирихина и др., 2013; Прищепа и др., 2014; Лян и др., 2015; Ступакова и др., 2015; Конторович, Лившиц, 2017; Конторович и др., 2018a, 2018b].

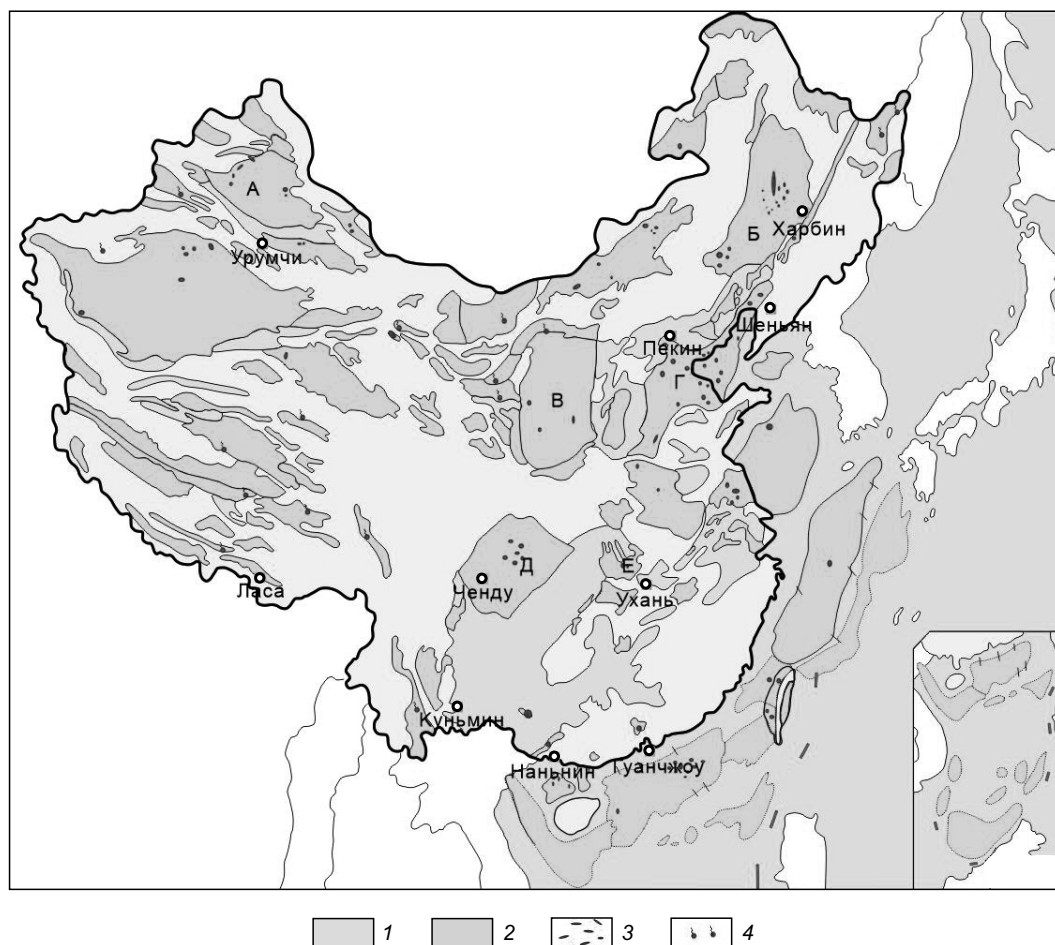
Исследования, выполненные Китайской инженерной академией, Национальным управлением по энергетике и несколькими крупными китайскими нефтяными компаниями, показывают, что в ближай-

шие годы трудно значительно увеличить добычу и запасы традиционных нефти и газа в бассейнах на территории Восточного Китая [Jin et al., 2018]. Вместе с тем разведка сланцевой нефти в этих бассейнах является важным направлением для увеличения запасов нефти и газа и их добычи в будущем. На территории Китая имеется много осадочных бассейнов с комплексами глинистых (сланцевых) толщ в озерных литофациях, которые занимают значительную площадь, характеризуются высоким содержанием органического вещества типов I и II средней и высокой зрелости, большой мощностью и содержат сланцевую нефть. Ресурсный потенциал сланцевой нефти в Китае после успехов в поисках и разведке газа в акваториальных бассейнах страны, которая имеет большое значение для открытия и освоения новых и стабилизации добычи нефти на старых нефтяных месторождениях на востоке и западе Китая [Jin, 2019; Jin et al., 2019, 2021, 2022; Zhao et al., 2019, 2020; Hu et al., 2020].

Наиболее интенсивно и эффективно фундаментальные и прикладные инженерно-технологические исследования в области образования нефти, методики поисков, разведки и разработки проводятся в настоящее время в США, Китае и России.

### КОНЦЕПЦИЯ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ

Сланцевая нефть (shale oil) относится к нефтяным ресурсам, содержащимся в глинистых (сланцевых) и карбонатно-глинистых богатых органическим веществом типов I и II нефтематеринских породах со сверхнизкой пористостью и проницаемостью [Гурари, 1961; Конторович и др., 1975; Добрынин, Мартынов, 1980; Зубков, Мормышев, 1987; Donovan et al., 2017; Jin et al., 2021] (рис. 1). Разработка нефти из таких пород требует использования горизонтальных скважин и методов гидроразрыва пласта, аналогичных разработке сланцевого газа [Donovan et al., 2017; Jin et al., 2019]. Эта концепция основана



**Рис. 1. Основные бассейны Китая, содержащие ресурсы сланцевой нефти.**

1 — неметаморфическая палеозойская зона; 2 — основные бассейны сланцевой нефти: А — Джунгар, Б — Сунляо, В — Ордос, Г — Бохайван, Д — Сычуань, Е — Цзяньхань; 3 — нефтегазовое месторождение; 4 — нефтегазовое проявление. На врезке — острова Южно-Китайского моря.

на согласованных теоретических представлениях, достигнутых многими экспертами на 2-й Международной конференции по разведке и разработке сланцевой нефти в 2019 г.

Понятие «сланцевая нефть» относится к скоплениям нефти в низкопоровых коллекторах высококачественных нефтепроизводящих формаций или вблизи них без крупномасштабной миграции на большие расстояния. Хотя отдельные эксперты и ученые в Китае в настоящее время по-разному определяют толщину и долю прослоев плотных карбонатных или песчано-алевритовых пород в сланцевых формациях [Du et al., 2019; Li et al., 2019; Song et al., 2020; GB/T 38718, 2020], следует ожидать, что по мере накопления опыта разведки, разработки и понимания строения залежей сланцевой нефти, эти различия постепенно будут преодолены.

Принято считать, что следует пересмотреть мнение о сложности и трудности добычи нефти в сланцах. Песчаник или карбонатный прослой, содержащиеся в сланцевой толще, по-прежнему являются важным объектом для разведки и разработки залежей нефти. Но такой тип разреза является лишь одним из перспективных для обнаружения скоплений нефти. Сами сланцы, особенно сланцы со слоистой структурой, также являются важным объектом, так как в них могут формироваться крупные скопления нефти [Jin et al., 2021, 2022].

### СОСТОЯНИЕ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ В США

Мир богат ресурсами сланцевой нефти. По оценке EIA [2015], суммарные мировые извлекаемые ресурсы сланцевой нефти составляют 57.1 млрд т, они распределены в более чем 170 сланцевых формациях, в 104 бассейнах 46 стран. США, Россия и Китай обладают самыми большими ресурсами сланцевой нефти в мире: 10.7, 10.2 и 4.4 млрд т соответственно, что составляет 19, 18 и 8 % от мировых ресурсов. Еще 10 стран (Аргентина, Ливия, Объединенные Арабские Эмираты, Чад, Австралия, Венесуэла, Мексика и др.) также обладают значительными ресурсами сланцевой нефти [Прищепа и др., 2014; Лян и др., 2015; Yang, Jin, 2019; Liang et al., 2020]. Следует заметить, что эти оценки следует, видимо, рассматривать как осторожные. Во всяком случае, российские специалисты [Нестеров и др., 1987; Конторович и др., 2018б, 2019] оценку извлекаемых ресурсов сланцевой нефти в 10 млрд т только в баженской свите рассматривают как минимальную.

Крупные достижения в технологиях разведки и разработки сланцевой нефти достигнуты в США, где сланцевая нефть стала основой роста добычи нефти. Основную массу сланцевой нефти на территории США добывают в основном из морских по условиям формирования сланцевых формаций в верхнем девонско-нижнекаменноугольном поясе Баккен (Bakken) в бассейне Уиллистон, меловом поясе Игл-Форд (Eagle Ford) в бассейне Мексиканского залива, пермских зонах (Bonespring, Wolfcamp и Sprabery) в Пермском бассейне, ордовикской зоне (Utica) в Аппалачском бассейне и др. [Jin et al., 2019; EIA, 2019].

Успешная разведка и экономически эффективное освоение сланцевой нефти США достигнуты в первую очередь в результате постоянного обновления и пересмотра базовых геологических знаний об этих формациях. В методическом плане решающим был отказ от традиционной модели поисков залежей нефти в структурных или тектонических ловушках, что позволило значительно расширить зоны для поисков нефти. Вследствие изменения подхода произошла революция в разведке и разработке сланцевой нефти во всех бассейнах [Jin et al., 2019]. В настоящее время добыча сланцевой нефти в Пермском бассейне составляет сотни млн т [Bai et al., 2020]. В бассейне Анадарко скважины, ориентированные на открытие крупных залежей сланцевой нефти и пробуренные на ранней стадии поисков сланцевой неф-

Таблица 1. Сравнение геологических характеристик разведанных формаций, содержащих сланцевую нефть в крупных бассейнах Китая

Район	Название бассейна	Тип бассейна	Формация	Литология	Благоприятный район, тыс. км <sup>2</sup>	Толщина, м	Основной тип керогена	$R_o$	ТОС
								%	
Восточный	Сунляо	Депрессионный	Циншанькоу	Озерные глинистые образования и аргиллиты	50—60	100—150	I	0.5—2.0	0.9—9.0
	Бохайван	Разломный	Шахецзе, Конг 2		50—100	30—1000	I	0.5—2.0	1.5—10.0
Западный	Ордос	Депрессионный	Чанг 7		100	10—100	I + II	0.7—1.5	2.0—20.0
	Джунгар	Разломный	Луцаогоу, Фэнчэн		30—40	30—200	I + II	0.6—1.6	1.2—8.9
Южный	Сычуань	Депрессионный	Да'анчжай		30	80—150	I + II	0.5—1.6	0.2—3.8

ти, не давали больших притоков, но более поздняя разведка дала высокие дебиты нефти из глубоких депрессий бассейна на глубине около 4500 м [Yu et al., 2015; Yuan et al., 2019].

Разведка и разработка сланцевой нефти в США прошли нелегкий и длинный путь [Прищепа и др., 2014]. В 1953 г. в формации Баккен бассейна Уиллистон было открыто нефтяное месторождение Антилопа, но из-за многолетней низкой добычи оно не вызывало особого внимания. В 1987 г. при разведке сланцевого газа была пробурена первая горизонтальная скважина, давшая нефть в верхней части формации Баккен. Дебит нефти в скважине был низкий и экономической эффективности ее бурение не обещало. В 2000 г. бурение горизонтальной скважины в плотных слоях средней формации Баккен увенчалось большим успехом [Jin et al., 2019; BP, 2020]. Средняя мощность этой толщи 15—20 м. В центре впадины формация Баккен представлена карбонатными породами, а на окраинах — обломочными. Здесь открыто первое в США месторождение сланцевой нефти Элм-Кули (Elm Coulee), расположенное в центральной части впадины на невысокой пологой антиклинали. В 2007 г., через 7 лет после открытия первого месторождения нефти годовой дебит скважин из пласта Баккен превысил  $110 \times 10^4$  т. Вслед за формацией Баккен разведка и разработка сланцевой нефти в США была развернута в бассейне Игл-Форд на юге и в Пермском бассейне в центральной части страны, добыча сланцевой нефти достигла  $385 \times 10^6$  т [Jin et al., 2019; BP, 2020]. Скважины с высокими дебитами сланцевой нефти в основном расположены в бассейнах Уиллистон, Пермском и в бассейне Мексиканского залива [Bai et al., 2020].

## СОСТОЯНИЕ РАЗВЕДКИ И РАЗРАБОТКИ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ НА ТЕРРИТОРИИ КИТАЯ

По оценке Института разведки и разработки нефти Синопек, извлекаемые ресурсы сланцевой нефти в основных бассейнах на территории Китая составляют 18.6 млрд т. Ресурсы сланцевой нефти сконцентрированы в нескольких крупных нефтеносных бассейнах, таких как Бохайвань, Сунляо, Ордос и Джунгар (см. рис. 1; табл. 1). Основные ресурсы сланцевой нефти в Китае аккумулированы в отложениях палеогена, мела, триаса и перми.

Разработка стратегии освоения ресурсов сланцевой нефти на территории Китая [Jin, 2019] показала, что главным направлением поисков должна быть сланцевая нефть в нефтепроизводящих формациях с органическим веществом средней и высокой зрелости (мезокатагенез).

В Китае широко распространены озерные по генезису сланцевые образования. Они характеризуются высоким содержанием органического вещества (ОВ) низкой зрелости (прото-, начало мезокатагенеза), большой мощностью, неглубоким залеганием, высоким содержанием глинистых минералов, низкой проницаемостью, большой изменчивостью по содержанию песчано-алевритовых пластов и пропластков. Поэтому поиски, разведка и разработка скоплений нефти в них сталкиваются с серьезными проблемами, такими как неясный масштаб ресурсов, различные критерии оценки перспективных районов и сложность прогнозирования распределения доступных ресурсов. Все это ограничивает разведку и крупномасштабную разработку сланцевой нефти на территории Китая.

**История разведки и разработки сланцевой нефти на территории Китая.** С 1960-х годов в Китае обнаружены ресурсы сланцевой нефти в бассейнах Сунляо, Бохайвань, Цайдама, Туха, Цзюси, Цзянхьян, Наньсян, Северное Цзянсу и Сычуан. Разведка и разработка континентальной сланцевой нефти в Китае прошли примерно три этапа.

**I. Первые находки сланцевой нефти в Китае (до 2010 г.)** В этот период при разведке и разработке традиционных месторождений нефти и газа в нефтегазоматеринских формациях бассейнов Сунляо, Бохайвань, Цзянхьян, Цзянсу и других были случайно обнаружены в трещиноватых сланцах скопления нефти и газа. Запасы и добыча нефти и газа в таких залежах были невелики, геологический потенциал и характеристики сланцевой нефти изучены слабо, оценка ее запасов выполнялась с трудом. Поэтому добыче сланцевой нефти должного внимания не уделялось.

### II. Исследования осадочных бассейнов сланцевой нефти в 2010—2014 гг.

На этом этапе под влиянием революции при поисках сланцевой нефти в морских высокоуглеродистых формациях в США китайские компании ПетроЧайна (PetroChina) и Синопек (Sinopec) выбрали несколько типичных бассейнов, пробурили ряд скважин на окраинах впадин и внедрили североамериканскую технологию нетрадиционного гидроразрыва пласта для реализации объемной интенсификации. В этот период на месторождениях Синьцзян, Чанцин, Дацин, Шэнли, Даган, Цзянхьян и других проводили работы по освоению ключевых инженерных технологий для разведки и разработки сланцевой нефти, таких как прогнозирование зон наиболее перспективных участков для нахождения залежей сланцевой нефти, бурение длинных участков горизонтальных скважин и многостадийный гидроразрыв пласта, а также активно проводили эксперименты по разработке нефти из коллекторов порового типа (пласты песчаников и алевритов) в сланцевых разрезах со средней и высокой степенью зрелости органического вещества. В результате чего были получены значительные результаты. В 2011 г. ПетроЧайна объявила об открытии месторождения сланцевой нефти Джимсар в Джунгарском бассейне. По-



сле повторного обследования старых скважин на месторождении Шенли Ойлфилд Сайнопек в нефтематеринских породах из 38 скважин были получены промышленные притоки нефти и газа.

Кроме того, были спроектированы и пробурены три горизонтальные скважины, но добыча нефти в них в 2013—2014 гг. оказалась неэффективной.

Размещение скважин для поисков сланцевой нефти на этом этапе выполнялось по традиционной антиклинальной идее поисков и разведки: скважины предпочтительно размещались в приподнятых зонах резервуаров, что определяло низкую зрелость органического вещества и низкое пластовое давление.

Кроме того, инженерная технология того времени оказалась не вполне удовлетворительной. Получилось, что дебит нефти в единичной скважине быстро снижался, стабилизировать добычу было сложно, сформировать эффективную добычу в больших масштабах было невозможно.

**III. Целевые фундаментальные и технологические исследования, оценка ресурсов, развитие работ на опытных полигонах, развертывание поисковых, разведочных работ и апробация технологий разработки сланцевой нефти в типовых осадочных бассейнах не территории Китая с 2015 г. по настоящее время.** На этом этапе были выполнены фундаментальные геологические и технологические проекты:

- Механизмы генерации и аккумуляции в залежи трудноизвлекаемой (сланцевой) нефти в континентальных озерных формациях в Китае.

- Механизмы образования и законы распределения ресурсов трудноизвлекаемой (сланцевой) нефти палеогеновых континентальных озерных формаций в Восточном Китае.

- Сравнительный анализ и оценка методов поисков, разведки и разработки сланцевой нефти в типовых бассейнах с континентальными озерными нефтепроизводящими и нефтесодержащими формациями на территории Китая.

По их результатам были сформированы новые представления об условиях генерации, аккумуляции, залегания и подвижности сланцевой нефти, выполнена оценка геологических ресурсов трудноизвлекаемой (сланцевой) нефти в континентальных озерных осадочных формациях Китая и проведены ключевые технологические исследования методики разработки скоплений.

Все полученные результаты были апробированы на конкретных бассейнах и месторождениях, что помогало компаниям ПетроЧайна и Синопек сосредоточить дальнейшие поиски и разведку сланцевой нефти континентальных озерных формаций в наиболее перспективных районах генерации нефти этого типа. Важное значение работы этого периода состоит в следующем:

1. Получены новые знания в области методики прогноза и геологической оценки и перспективных зон в озерных сланцевых бассейнах. Разработаны фундаментальные основы методики, поисков, разведки и разработки сланцевой нефти в континентальных формациях озерного типа, обоснована необходимость увеличения объемов поисковых и разведочных работ в таких формациях. Были уточнены представления о более высокой степени термической зрелости ( $R_o > 0.9$  %) перспективных участков и рекомендовано переместить разведочные скважины с высоких (антиклинальных, моноклинальных) структурных позиций в углеводородогенерирующие прогибы с высоkozрелым органическим веществом.

2. Установлено, что формирование озерных нефтеносных сланцевых формаций контролируется рядом геологических факторов:

- тектонической природой озерных осадочных бассейнов,
- палеогеографической обстановкой накопления осадков, концентрацией и типом органического вещества в них,

- степенью зрелости органического вещества в озерных нефтематеринских формациях,
- условиями формирования и типом резервуаров, в которых аккумулируется сланцевая нефть.

В зависимости от обстановок накопления осадков сланцевых формаций при выборе систем разработки следует выделять три различных типа резервуаров сланцевой нефти.

**Внутриформационный песчано-алевритосланцевый тип резервуара с пластами песчаников и алевролитов в обогащенной органическим веществом нефтепроизводящей и нефтесодержащей сланцевой (глинистой) формации,** при этом толщина сланцев составляет от 60 до 80 % общей толщины формации, толщина одиночного слоя тонкозернистых песчаников и алевролитов от 2 до 4 м.

**Внутриформационный песчанисто-алевритисто-сланцевый тип резервуара** в толстых пластах сланцев, которые переслаиваются с тонкими слоями мелкозернистых песчаников и алевролитов, при этом сланцы составляют от 80 до 95 % общей толщины, а толщина одного слоя тонкозернистых песчаников и алевролитов составляет от 0.2 до 1.5 м.

**Матричный сланцевый тип резервуара,** емкость резервуара образует поры в сланцах либо слоистую седиментационную пустотность — этот тип резервуаров встречается в толстых пластах богатых органическим веществом сланцев (матричный тип, пластовые сланцы). Сланцы составляют более 95 % толщина разреза. Среди них развиты свертонкие доломитовые (ракушечниковые известняки) слои, толщина которых составляет менее 0.01 м.

Выявлено несколько обстановок появления сланцевой нефти, зависящих от тектонической структуры и термической зрелости нефтематеринских отложений, что заложило основу для точного понимания и оценки факторов, указывающих на высокодебитную добычу сланцевой нефти.

Установлено, что матричный сланцевый тип резервуаров является наиболее перспективной литофацией сланцевой нефти, а богатые органическим веществом слоистые нефтенасыщенные сланцы (внутриформационный песчано-алевритосланцевый тип резервуара) могут стать первым объектом поисков сланцевой нефти.

Матричный сланцевый тип резервуара типичен и для морских высокоуглеродистых карбонатно-кремнисто-глинистых формаций. Наиболее ярким и хорошо изученным примером такой формации является баженовская свита Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции [Гурари, 1961; Новиков, Салманов, Тянь, 1970; Нестеров и др., 1987]. На ее примере хорошо изучена динамика генерации и эмиграции нефти из нефтепроизводящих пород и показан механизм формирования катагенетической «органической» пористости за счет химической деструкции (псевдофазового превращения) твердого керогена в жидкие и газообразные соединения (газы  $C_1$ — $C_4$ ,  $CO_2$ ,  $H_2S$ ,  $NH_3$ ,  $H_2O$ , углеводороды  $C_{5+}$ , смолы, асфальтены) [Конторович и др., 2018б, 2021]. При этом объем образовавшихся при пластовой температуре и давлении жидких и газообразных соединений формирует поровое пространство.

Матричный сланцевый тип резервуара при повышенной (главная зона нефтеобразования) зрелости органического вещества является наиболее перспективной литофацией, а богатые органическим веществом слоистые нефтенасыщенные сланцы первоочередным объектом поисков сланцевой нефти. В связи с этим *разработаны* новые технологии и новые методы:

1) технология оценки нефтенасыщенности керна методом замораживания и закрытого дробления-пиролиза в местах бурения скважин;

2) технология пиролитического анализа керна, содержащего сланцевую нефть, петрофизическая модель резервуара;

3) технология обработки сейсмической информации с расширением диапазона частот для тонкого ритмического слоя в сланцевых пластах (методика создания петрофизической модели резервуара с учетом сложного ритмического строения сланцевой толщи), программная платформа для оптимизации перспективных зон и геофизической идентификации и прогнозирования перспективных районов.

*Получены* описанные выше новые представления о строении резервуаров сланцевой нефти, которые указали направления построения технологии разработки сланцевой нефти в континентальных озерных формациях. Получено более глубокое понимание эффекта гидроразрыва пластов сланцевой нефти, выявлено, что синергия системы, особенно эффект образования трещин без проппанта, является ключом к улучшению эффекта интенсификации добычи сланцевой нефти.

*Сформировано* новое понимание цели дизайна ГРП по вскрытию наиболее глубоко залегающих трещин, выдвинута концепция дизайна по расширению эффективного объема стимуляции дальних скважин и созданию призабойных высокопроводящих каналов. На основе экспериментов доказано, что гидроразрыв пласта с закачкой  $CO_2$  в сланцевые коллекторы имеет значительные преимущества с точки зрения сжимаемости и сложности трещины. Ключевыми факторами являются улучшение производительности по переносу песка и снижению трения.

На основе описанного выше нового понимания процесса гидроразрыва разработаны новые технологии и новые методы, в том числе дискриминантный критерий образования сети ламинарных трещин в сланцах, количественная характеристика сети трещин в сланцах и метод моделирования миграции проппанта, технология гидроразрыва околоскважинной песчаной пробки с использованием высокотемпературной жидкости, технология гидроразрыва пласта сланцевой нефти и технология оптимизации схемы горизонтальной скважины.

*Получены* новые представления о вязкости сланцевой нефти, которые обеспечивают прогноз и увеличение эффективности добычи нефти из озерных сланцевых формаций с высокзрелым ОВ. Установлены миграционные характеристики пластовой нефти при нахождении в сланцевых коллекторах разных типов, закономерности течения флюидов в коллекторах, сформирована модель порово-трещиновой среды коллектора, подходящей для определения характеристик пор коллектора, естественных трещин и искусственных трещин в трех основных целевых областях. Предложена идея процесса улучшения текучести сланцевой нефти в сланцах со средней и низкой зрелостью органического вещества путем термического крекинга или закачки реагентов. Выяснено влияние сверхкритического  $CO_2$  на расширение пор во внутриформационных песчано-алевритосланцевых типах резервуара сланцев и ингибирование солевого тампонирующего.

На основе изложенных подходов разработаны новые технологии и методы, в том числе технология численного моделирования потока и ее программная платформа, связанные с резервуаром и стволом скважины в сланцевых резервуарах, метод количественной оценки пиролиза сланцев средней и низкой зрелости, метод термостойкой и сланцеустойчивой олигомеризации для снижения вязкости сланцевой

Таблица 2.

Оценочные ресурсы сланцевой нефти Китая

Район	Бассейн	Система	Площадь оценки, км <sup>2</sup>	Предварительная оценка ресурсов сланцевой нефти категории D <sub>2</sub> , млрд т			Предварительная оценка ресурсов сланцевой нефти (D <sub>1</sub> ), млрд т			
				Генера- ционный объем нефти	Потеря- нный объ- ем нефти	Остаточ- ный объ- ем нефти	Уровень доверительной вероятности по остаточ- ному объему нефти			Плотность ресурсов млн т/км <sup>2</sup>
							*2%	*5%	*10%	
Восточный	Сунляо	Палеогеновая	123196	144.68	50.55	94.137	1.883	4.707	9.414	382
	Бохайвань	Меловая	108714	150.607	67.246	83.361	1.667	4.168	8.336	383
Западный	Ордос	Триасовая	242085	223.495	138.7	84.795	1.696	4.240	8.480	175
	Джунгар	Пермская	134985	163.453	104.049	59.404	1.188	2.970	5.940	220
Южный	Сычуань	Юрская	121175	13.106	6.815	6.291	0.126	0.315	0.629	26

нефти, альтернативный впрыск вода + сверхкритический CO<sub>2</sub> в межслоевых сланцах для увеличения добычи нефти.

**Нынешнее состояние разведки и разработки месторождений сланцевой нефти в основных бассейнах Китая.** С точки зрения эффективности поисков, разведки и разработки скоплений нефти в континентальных озерных сланцах Китай добился замечательных результатов. К концу 2020 г. запасы сланцевой нефти в Китае составили 3.915 млрд т запасов, в том числе доказанных запасов 1,306 млрд т, пробурено 1213 горизонтальных скважин. В 2020 г. добыча сланцевой нефти в Китае составила 1.86 млн т, накопленная добыча нефти составила 5.936 млн т. В 2021 г. объем добычи сланцевой нефти в Китае составил 2.68 млн т, в том числе 1.86 млн т на месторождении Чанцин в бассейне Ордос, 420 тыс. т на месторождении Джимсар в бассейне Джунгар и 213 тыс. т на месторождении Туха, 95 тыс. т на месторождении Даган в бассейне Бохайвань, 47 тыс. т на месторождении Цзилинь и 15 тыс. т на месторождении Дацин в бассейне Сунляо. Оценка ресурсов сланцевой нефти Китая приведена в табл. 2.

### Бассейн Джунгар

Установлены перспективы среднепермской формации Лукаогу (P<sub>2</sub>l) в восточной части прогиба Джимсар, среднепермской формации Пингдицюань (P<sub>2</sub>p) в районе Вуцайвань-Шишугуо и нижнепермской формации Фэнчэн в прогибе Маху для поисков и разведки сланцевой нефти. Ресурсы перспективных зон формаций Лукаогу в Джимсар оценены в 1.58 млрд т (по российской категории D<sub>л</sub>), ресурсы перспективной формации Фэнчэн в прогибе Маху (рис. 2, А) составляют всего 825 млн т (D<sub>л</sub>), в южном районе ресурсы зон перспективных формаций Пингдицюань в Вуцайвань-Шишугуо равны 320 млн т (D<sub>л</sub>).

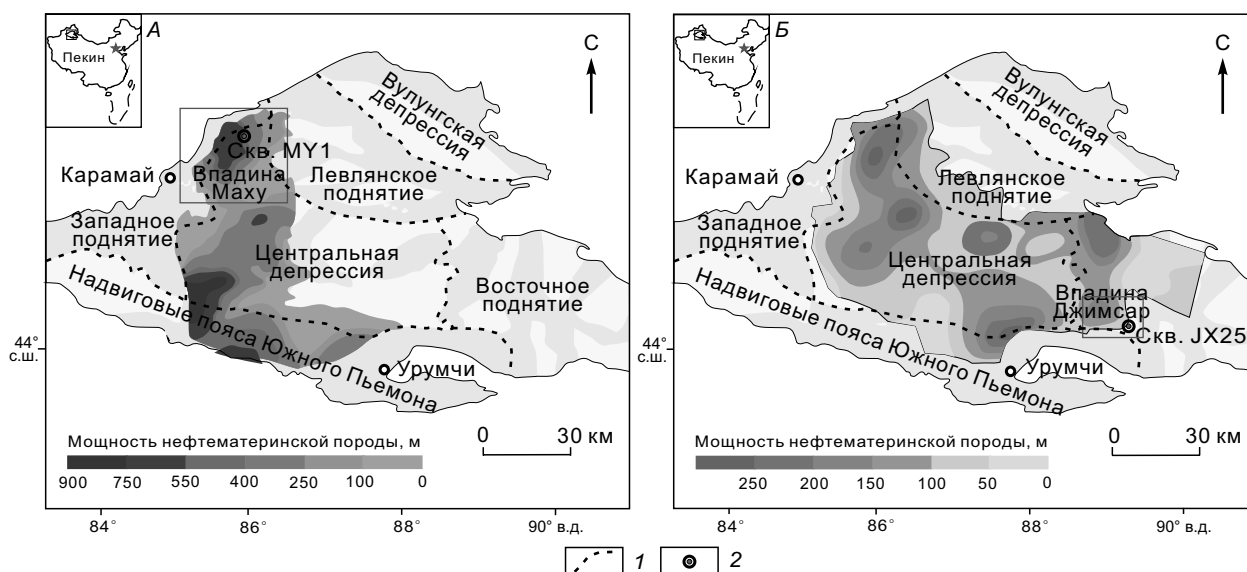
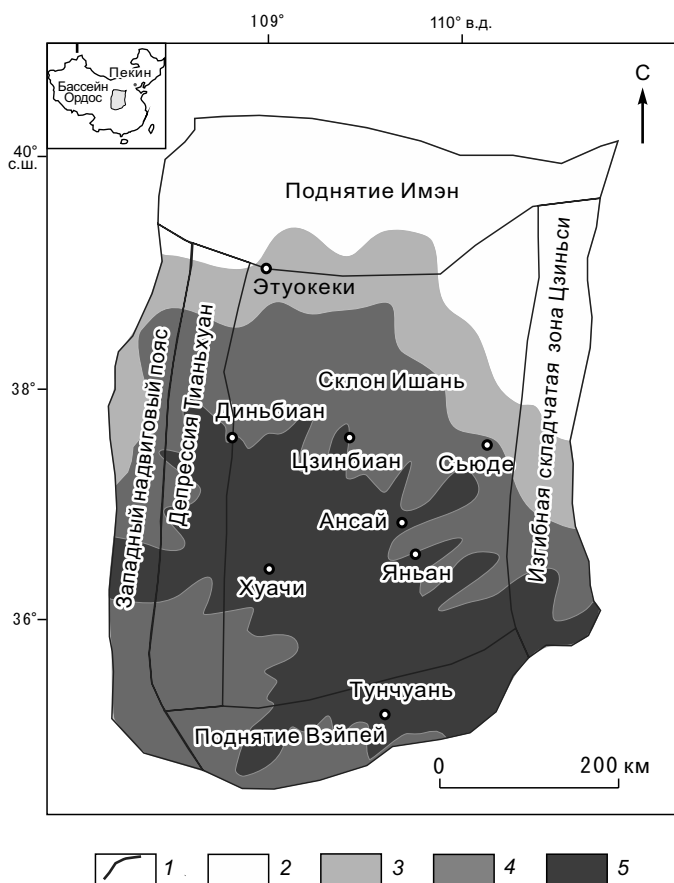


Рис. 2. Мощности нефтематеринских пород нижней (А) и средней (Б) перми в Джунгарской впадине.

1 — тектоническая граница, 2 — скважина.



**Рис. 3. Палеогеографическая карта верхнего триаса формации Яньчан бассейна Ордос.**

1 — тектоническая граница, 2 — аллювиальная речная равнина, 3 — дельтовая равнина, 4 — передняя часть дельты и мелководное озеро, 5 — глубокое озеро.

Формация Лукаогу ( $P_2I$ ) является наиболее изученным и признанным объектом для добычи сланцевой нефти, и в настоящее время она является одним из главных объектов разведки сланцевой нефти в Китае. Глубина залегания формации Лукаогу составляет 800—5200 м, мощность основной нефтематеринской породы 100—240 м (рис. 2, Б), содержание органического углерода превышает 3.5 %, потенциал образования углеводородов ( $S_1 + S_2$ ) в основном более 6.0 мг/г, и самая высокая температура второго максимума пиролиза  $T_{max}$  располагается между 428 и 459 °С, а  $R_o$  от 0.66 до 1.63 %. Коллектор представляет собой совокупность переходных отложений между доломитом и песчано-алевритовыми осадочными образованиями соленого озера. Литология формации  $P_2I$  представлена в основном аргиллитами, карбонатными породами и алевритовыми песчаниками с некоторым количеством мергелей и осадочных

туфов. В формации Лукаогу выделены верхний и нижний перспективные интервалы. Верхний перспективный интервал ( $P_2I_2$ ) имеет мощность около 41 м и развит в середине прогиба площадью 640 км<sup>2</sup>. Преобладающим литологическим компонентом верхнего интервала являются доломитовые алевролиты, за ними следуют гранулированные доломиты, алевролиты и микрокристаллический доломит. Средняя проницаемость коллектора  $0.014 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, а образцы с проницаемостью менее  $0.1 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> составляют 90.9 %. Ресурсы сланцевой нефти верхнего интервала ( $P_2I_2$ ) около 485 млн т ( $D_n$ ).

Нижний интервал ( $P_2I_1$ ) широко распространен по всей котловине площадью 1096 км<sup>2</sup>, причем в южной части котловины интервал относительно мощный. Преобладающим литологическим компонентом нижнего интервала являются алевритовые песчаники и доломитовые алевролиты, за которыми следуют микрокристаллические доломиты, песчаные и доломитовые аргиллиты. Средняя проницаемость коллектора  $0.009 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>, а образцы керна с проницаемостью менее  $0.1 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup> составляют 92 %. Ресурсы сланцевой нефти нижнего интервала ( $P_2I_1$ ) Лукаогу ~666 млн т ( $D_n$ ) [Huo et al., 2020].

По состоянию на декабрь 2020 г., геологические ресурсы нефти в формации Лукаогу в прогибе Джимусар оценены в 1.112 млрд т ( $D_n$ ), а доказанные запасы в 153 млн т ( $C_1, C_2$ ). До июня 2022 г. в прогибе пробурено 138 горизонтальных скважин, из них находится в разработке 101. В 2021 г. добыча сланцевой нефти из формации Лукаогу составила 424 тыс. т.

### Бассейн Ордос

В бассейне Ордос в позднем триасе во внутренней депрессии образовалось крупное озеро (см. рис. 3). Площадь озера 65 тыс. км<sup>2</sup>, глубина 60—120 м. В озере сформировался комплекс богатых органическим веществом глинистых осадков и мелкозернистых песков. По окраинам бассейна накапливались склоновые и аллювиальные грубозернистые отложения формации Яньчан.

Озерные осадки после погружения, уплотнения и катагенетических преобразований превратились в основную нефтепроизводящую породу и резервуар сланцевой нефти. Пачка Чанг 7 имеет толщину около 110 м и разделена на верхнюю (Чанг 7<sub>1</sub>), среднюю (Чанг 7<sub>2</sub>) и нижнюю (Чанг 7<sub>3</sub>) подпачки. В настоящее время основным интервалом разведки и разработки сланцевой нефти в бассейне Ордос являются богатые органическим веществом глинистые породы в верхней и средней частях пачки Чанг 7 с многочисленными маломощными прослоями алевритов и песчаников. В нижней части пачки преобладают глины.



Нефтематеринские породы пачки Чанг 7 разделены на два типа литофаций: черные сланцы и темные массивные аргиллиты. Мощность черных сланцев 15—30 м, темных аргиллитов 20—60 м, средняя мощность песчаников составляет 3.5 м (в целом <5 м), а среднее отношение песчаной фракции к глинистой 17.8 % (в целом <30 %). Тип ОВ нефтематеринских черных сланцев — озерные водоросли в основном с ОВ типа I или типа II. Содержание  $C_{орг}$  составляет от 6 до 26 %, в среднем 13.8 %. Органическое вещество в темных аргиллитах в основном относится к типу II, содержание органического углерода равно 2—6 %, а в среднем 3.75 %. Черные сланцы занимают площадь 43 тыс. км<sup>2</sup> со средней толщиной 16 м и максимальной — 60 м.

Темные аргиллиты занимают площадь 62 тыс. км<sup>2</sup> со средней толщиной 17 м и максимальной мощностью 124 м. Общий объем генерации углеводородов в высококачественных нефтематеринских породах составил около 200 млрд т, что создало серьезную базу для накопления значительных ресурсов сланцевой нефти [Fu et al., 2021]. Нефть пачки Чанг 7 находится главным образом во внутрiformационных песчано-алевритосланцевых и матричный сланцевых типах резервуаров. В первом типе резервуаров песчаники «зажаты» между богатыми ОВ глинистыми сланцевыми слоями. Природные резервуары сланцев образованы мелкозернистыми песчаниками и алевролитами. Глинистые сланцы и туфы также обладают определенной емкостью. Пористость сланцев обычно составляет менее 2 %, а проницаемость менее  $0.1 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. По данным электронной микроскопии, в глинистых образованиях имеется большое количество поровых каналов и межкристаллических пор микро- и наноразмеров. Размер пор песчаника 2—8 мкм, а размер поровых каналов 20—150 нм.

Глинистые сланцы и туфы также обладают определенной физической емкостью. Пористость сланцев обычно менее 2 %, а проницаемость менее  $0.1 \cdot 10^{-3}$  мкм<sup>2</sup>. Большое количество поровых каналов микро- и наноразмеров улучшает коллекторские свойства низкопроницаемых резервуаров: сканирующая электронная микроскопия и другие мультиметодические анализы показывают, что в дополнение к небольшому количеству крупных межзерновых и сформированных растворением пор, эффективный тип пор коллектора Чанг 7 образуют большое количество микро- и наномежкристаллических пор глинистых минералов. Радиус пор коллектора песчаника в основном равен 2—8 мкм, а горловина составляет 20—150 нм.

По сравнению со сланцами в других бассейнах нефтематеринские породы формации Чанг 7 имеют высокую нефтенасыщенность и низкий коэффициент аномальности пластового давления. Эксперименты показывают, что на ранних стадиях формирования залежей в сланцах нефть заполняет преимущественно наиболее крупные поры и нефтенасыщенность увеличивается быстро. На более поздних стадиях формирования залежей при постоянном высоком давлении нефть постепенно заполняет большое количество мелких пор, и нефтенасыщенность медленно увеличивается. После стадий быстрого и непрерывного медленного поступления углеводородов в поры их конечная нефтенасыщенность может превышать 70 %.

С 2018 г. CNPC Changqing Oilfield построила демонстрационные площадки в Huachi и Heshui в районе Лонгдун, усилила работы по добыче нефти из пачки Чанг 7 и открыла крупнейшее месторождение сланцевой нефти Цинчэн в Китае с запасами более 1 млрд т. На основе опыта и успехов в пилотной зоне в районе Лонгдун будет построен автономный район Лонгдун с добычей нефти 1 млн т/год. Добыча сланцевой нефти в этом районе в 2020 г. составила 931 тыс. т. На сегодняшний день в бассейне Ордос разведано 1.837 млрд т запасов сланцевой нефти категорий (A + B + C<sub>1</sub>, 1.479 млрд т в Лундуне и 358 млн т в северной части Шэньпей), в том числе 1.152 млрд т доказанных запасов (C<sub>1</sub>, 1.052 млрд т на месторождении Цинчэн), 56 млн т разведанных (A + B) и 629 млн т запасов категории C<sub>2</sub>.

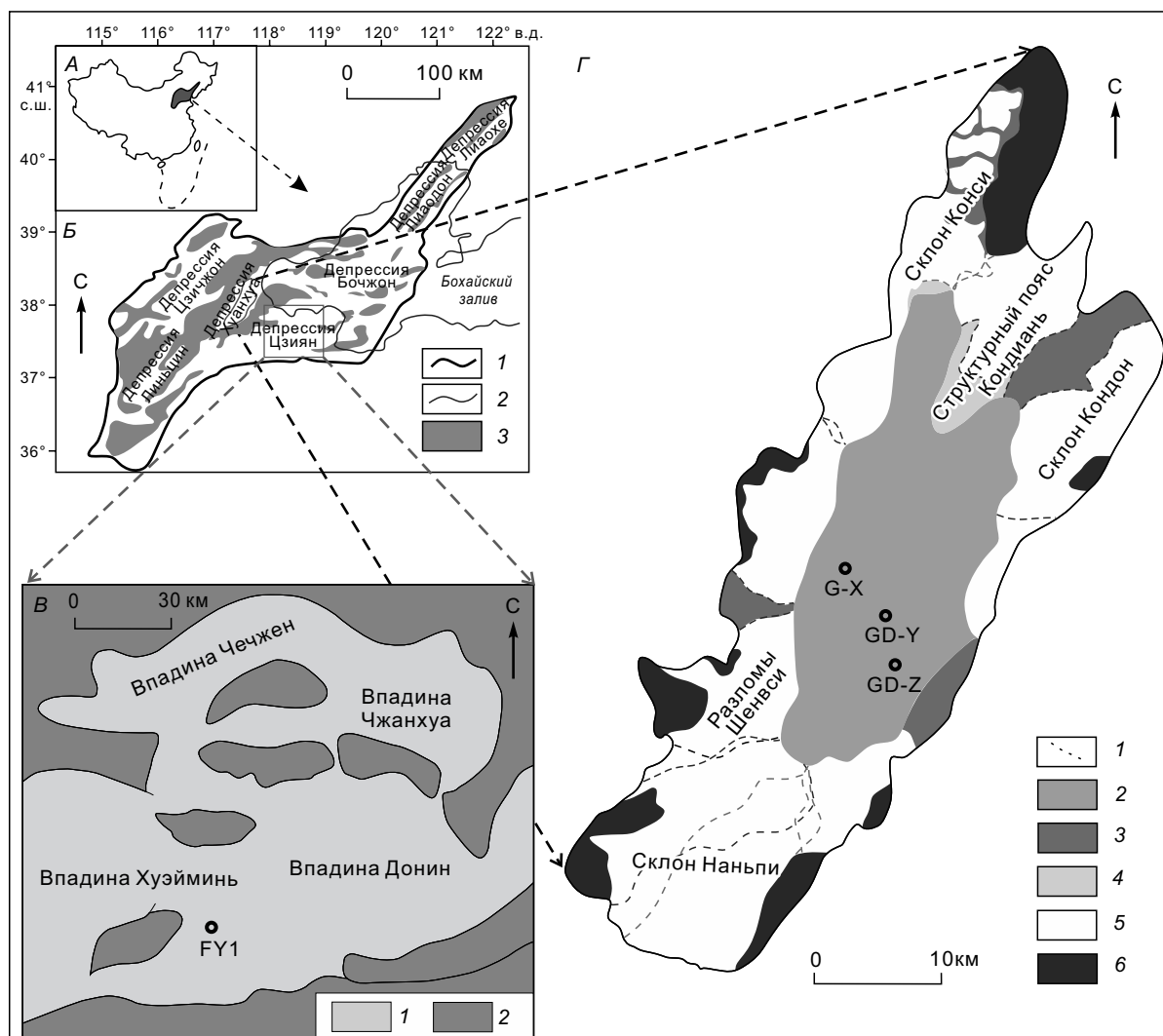
### Бассейн Бохайвань

*Депрессия Цзиян* является основным структурным элементом бассейна Бохайвань и типичным кайнозойским нефтеносным континентальным рифтовым бассейном на востоке Китая. Наличие сланцевой нефти установлено также во впадинах Дуньин, Чжаньхуа, Чечжэнь, Хуминь и других бассейна Бохайвань (рис. 4, В).

Сланцевая нефть выявлена в верхней пачке четвертого и нижней пачке третьего интервала формации Шахецзе (Ша), а также в первом интервале этой формации. Эти горизонты развиты в основном во впадинах Дуньин и Чжаньхуа.

Осадки формации Ша откладывались в соленом средней глубины и глубоком озере, сформировавшемся в приразломной впадине. Сланцы этой формации богаты органическим веществом, карбонатами. Площадь трех комплексов, богатых органическими веществами сланцев Ша<sub>4</sub>, Ша<sub>3</sub> и Ша<sub>1</sub>, превышает 6800 км<sup>2</sup>, эффективная мощность достигает 300—500 м.

Нефти этой формации являются продуктами как низких—средних, так и средних—высоких градиций катагенеза органического вещества нефтематеринских пород.



**Рис. 4. А — расположение бассейна Бохайвань; Б — бассейн Бохайвань; В — депрессия Цзяньчжун; Г — депрессия Хуанхуа.**

Б: 1 — граница бассейна, 2 — береговая линия, 3 — поднятие. В: 1 — впадина, 2 — поднятие. Г: 1 — граница дельты, 2 — глубокое озеро, 3 — мелководное озеро, 4 — подводная часть, 5 — передняя часть дельты, 6 — дельтовая равнина.

Сланцевая нефть депрессии Цзяньчжун установлена в матричном сланцевом, внутриформационном песчано-алевритосланцевом и трещиноватом типах резервуаров.

Ресурсы сланцевой нефти весьма значительны. Сланцевые слои в интервалах Ша<sub>4</sub> и Ша<sub>3</sub> содержат более 50 % карбонатов, они имеют тонкослоистую текстуру, несколько систем естественных трещин и обладают высокой фильтрационной способностью. Описанные сланцы, богатые ОВ, имеют среднюю и низкую степень термической зрелости, поровое пространство в них представлено межкристаллическими порами, плотность нефти высокая; пластовое давление высокое, коэффициент аномальности пластового давления обычно составляет 1.2—2.0, природная энергия пласта достаточно высокая, и ежедневная добыча сланцевой нефти сохраняет высокий уровень длительное время [Liu, 2022].

Высокоуглеродистые слои от верхней части Ша<sub>4</sub> до нижней части Ша<sub>3</sub> являются наиболее перспективными интервалами для добычи сланцевой нефти. Толщи Ша<sub>4</sub> и Ша<sub>3</sub> неоднородны. Они содержат высокие концентрации хрупких, в том числе карбонатных минералов. В них развито большое количество неорганических пор и сеть трещин в высокоуглеродистых слоистых глинистых известняках. Литологический состав пород толщ Ша<sub>4</sub> и Ша<sub>3</sub> благоприятен для формирования сети трещин, что может значительно увеличить объем трещин при гидроразрыве. Это делает объект перспективным для поисков, разведки и разработки сланцевой нефти.

В 2018 г. компания Sinopec Shengli Oilfield создала проектную группу для содействия междисциплинарной интеграции геологии и технологий разработки сланцевой нефти и начала новый этап апробации и совершенствования методики разведки и разработки сланцевой нефти.

В 2020 г. в формации Шахецзе опробовано 15 вертикальных наклонных скважин с накопленной добычей нефти 13.12 тыс. т. Максимальная суточная добыча нефти скв. Fanyeping 1 составила 171 т, а накопленная добыча нефти — 12.8 тыс. т. В скважине установлен рекорд суточной добычи для одной скважины сланцевой нефти в Китае. Это событие является важным стратегическим прорывом в технологии разведки и разработки сланцевой нефти на нефтяном месторождении Шэнли. По оценке, выполненной в 2022 г., прогнозные ресурсы сланцевой нефти в депрессии Цзиян на месторождении Шэнли составляют 462 млн т на площади перспективных зон 1155 км<sup>2</sup> ( $D_n$ ).

*Впадина Цандун в депрессии Хуанхуа.* Впадина Цандун расположена в южной части депрессии Хуанхуа. Она является одним из самых богатых нефтью и газом прогибов в бассейне Бохайвань с площадью 1500 км<sup>2</sup>. Наиболее перспективным горизонтом во впадине является формация. Конгдиань (Kongdian), в которой разрабатываются три пачки. Среди них вторая снизу пачка формировалась в условиях относительно закрытого озерного бассейна, а в центре палеоозерной котловины разрабатывается набор самостоятельных генерирующих и аккумулирующих нефть пачек. Нефтеносный пласт залегает на глубине 3200—3600 м.

Нефтематеринские породы второй пачки Конг 2 палеогена в основном сланцевые с мощностью 200—400 м. Типы I—II органического вещества составляют 71.8 % в общей массе изученных образцов. Содержание органического углерода обычно около 2 %. Более 50 % образцов керна содержат ~3 %  $C_{орг}$ , а образцы керна с потенциалом образования углеводородов более 20 мг/г составляют 57 %. Это показывает, что породы пачки Конг<sub>2</sub> являются высококачественными нефтематеринскими породами. Степень катагенетической преобразованности ОВ умеренная с  $R_o^v$  от 0.6 до 1.1 %. Она отвечает главной фазе нефтеобразования. Коллекторы представлены в основном тонкозернистыми осадочными породами, в том числе алевролитами и карбонатными с пористостью от 5 до 10 %. Они переслаиваются с нефтематеринскими породами, образуя набор сланцевых резервуаров, которые встречаются в стратиграфических системах, богатых органическим веществом [Zhao et al., 2019].

Вторая пачка Конг<sub>2</sub> во впадине Цандун нефтеносна на большой площади, но степень обогащения пород органическим веществом в ней сильно различается. В соответствии с мощностью резервуара, литологией, содержанием органического вещества и степенью зрелости выше- и нижезалегающих нефтематеринских пород, можно выделить три типа участков в перспективной зоне.

Участки типа I являются наиболее перспективными, в них  $R_o^v$  больше 0.5 % и содержание  $C_{орг}$  больше 1 % в нефтесодержащих слоях. Породы участков типа I, представленные толстослоистыми полевошпатово-кварцевыми сланцами и пластинчатыми мигматитами распространены в зонах Гуандун Сяоцзи-Вангуантун и Фэнхуадянь-Шэньцзяпу на площади 140 км<sup>2</sup>.

На участках типа II  $R_o^v$  также больше 0.5 % и значение концентрации  $C_{орг}$  больше 0.5 %. Нефтесодержащие слои литологически на этих участках представлены преимущественно пластинчатыми мигматитами и толстослоистыми доломитами. Развита они в основном в районе восточной части Гуандун Любу и юге Цанчжоу. Площадь участков типа II 90 км<sup>2</sup>.

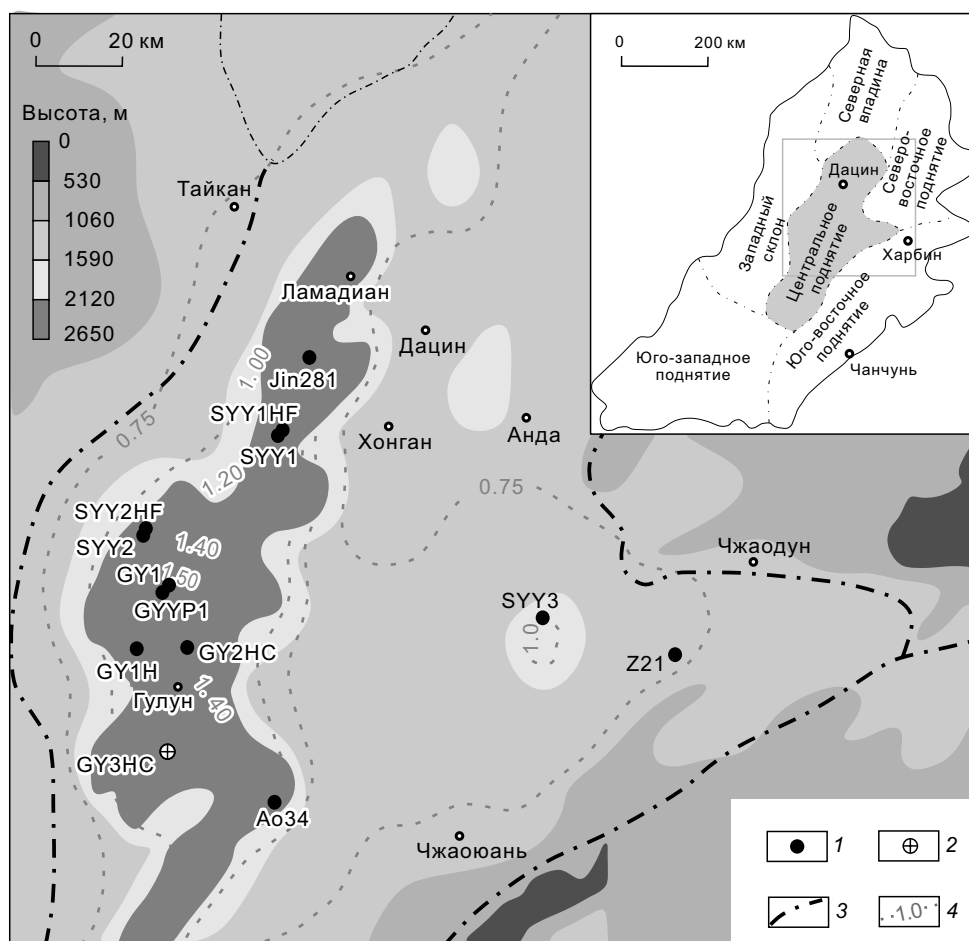
В районах участков типа III в разрезе преобладают доломитовые аргиллиты и сланцы с низкой степенью зрелости органического вещества. Литофации сформированы межслоевыми доломитовыми аргиллитами со средним и высоким содержанием органического вещества и мощными межслоевыми толстослоистыми аргиллитами с высоким содержанием органического вещества.  $C_{орг}$  меняется от 2 до 3 %.  $R_o^v$  менее 0.5 %. Площадь участков типа III около 50 км<sup>2</sup>. В основном они локализованы на юго-востоке региона.

В 2018 г. компания CNPC Dagang Oilfield завершила комплексную разведку сланцевой нефти в депрессии Хуанхуа. Две оценочные скважины (Guandong 1701H и Guandong 1702H) были пробурены в районе Гуандун. Обе скважины имеют относительно стабильные дебиты, обеспечивают экономически эффективную добычу из второй пачки Kongdian (Конг<sub>2</sub>). Ресурсы сланцевой нефти во впадине Хуанхуа оценены в 824 млн т ( $D_1$ ).

### Бассейн Сунляо

Нижние интервалы нижнемеловых отложений Циншанькоу (Цин<sub>1</sub> и Цин<sub>2</sub>) в бассейне Сунляо являются нефтематеринскими породами и содержат значительные ресурсы сланцевой нефти. Нижнемеловая формация Циншанькоу в северной части бассейна сформировалась в крупном соленом озере. Она образована темными глинистыми сланцами, богатыми органическим веществом. Зрелость органического вещества относительно высокая, в прогибе Цицзя-Гулунг она меняется от 1.20 до 1.67  $R_o^v$ .

Сланцевая нефть в прогибе Гулунг сформирована органическим веществом типов I и II, имеет низкую плотность и вязкость. В период накопления осадков Цин<sub>1</sub> и Цин<sub>2</sub> в озере произрастали планк-



**Рис. 5. Ключевые разведочные скважины на сланцевую нефть в формации Циншанькоу, бассейн Сунляо, Северо-Восточный Китай (модифицировано, по [Sun, 2020]).**

1 — промысловая нефтяная скважина, 2 — бурение скважины в нефтяном пласте, 3 — граница тектоническая I порядка, 4 —  $R_o^v$  %. На врезке — область исследования.

тонные водоросли, органическое вещество состояло в основном из слоистых водорослей, среда осадконакопления была анаэробной, ОВ представлено типом I с высоким водородным индексом 600—800 мг/г, потенциал нефтеобразования велик. Содержание  $C_{орг}$  в слоях Цин<sub>1</sub> и Цин<sub>2</sub> в зонах фаций средней глубины и глубокого озера относительно высокое — 1.8—4.5 %. В нижней пачке Цин<sub>1</sub> сланцы содержат более 8 мг/г свободных углеводородов. В верхней части пачки Цин<sub>1</sub> и в пачке Цин<sub>2</sub> содержание свободных углеводородов превышает 6 мг/г. Коэффициент аномальности пластового давления на участке Цицзя-Гулунг составляет 1.20, самое высокое значение этого показателя достигает 1.58. Результаты испытаний скважин показывают, что плотность поверхностной нефти в этом районе, как правило, не ниже 0.84 г/см<sup>3</sup>, вязкость — менее 0.8 мПа·с, среднее содержание насыщенных углеводородов 84.2 %, ароматических углеводородов 9.7 %, содержание смол меняется от 8.0 до 18.6 %, содержание асфальтенов до 0.4 %.

В формации Циншанькоу в зависимости от изменения обстановок накопления осадков выделяют те же три типа резервуаров, которые были описаны выше:

*А) внутриформационный песчано-алевритосланцевый тип* резервуара с пластами песчаников и алевролитов (2—4 м) в обогащенной органическим веществом сланцевой (глинистой) формации (60—80 % от толщины формации),

*В) внутриформационный песчанисто-алевритисто-сланцевый тип* резервуара с тонкими слоями и прослоями мелкозернистых песчаников и алевролитов (от 0.2 до 1.5 м) в обогащенной органическим веществом сланцевой (глинистой) формации (80—95 % от толщины формации),

*С) сланцевый (матричный) тип резервуара*, емкость резервуара образуют поры в сланцах либо слоистая седиментационная пустотность — этот тип резервуаров встречается в толстых пластах богатых органическим веществом сланцев. Сланцы составляют более 95 % толщины разреза в этом типе резервуара.



В формации Циншанькоу нефть сохранилась в основном в органических порах и микротрещинах резервуара сланцевого (матричного) типа. В глинистой части пород формации поры растворения и межкристаллические составляют более 80 %. Среднее содержание глинистых минералов в сланцах 35,6 %. Сланцы находятся на стадии мезокатагенеза, их глинистая составляющая характеризуется высокой степенью преобразованности. Значительная часть монтмориллонита превратилась в иллит, что увеличивает жесткость и хрупкость сланца. Кристаллы иллита в сланцах ориентированы и распределены в соответствии с катагенетическим уплотнением, благодаря чему порода легко расслаивается и растрескивается по плоскостям наслоения, что повышает ее сжимаемость.

Резервуары сланцевого типа представляются первоочередными объектами для освоения [Sun, 2020; Sun et al., 2021].

В 2021 г. изученная поисково-разведочным бурением на сланцевую нефть площадь составила 1413 км<sup>2</sup>, а геологические запасы нефти на ней — 1,268 млрд т (А + В + С<sub>1</sub>). В это время нефть в бассейне Сунляо добывали из 43 вертикальных скважин.

В августе 2021 г. в контрольных разведочных скважинах Guyeouping 1, Yingye 1H и Guye 2HC (рис. 5) на нефтяном месторождении Дацинь были получены устойчивые притоки нефти с дебитами более 30 м<sup>3</sup>/сут. На скважине Guyeouping 1 добыча нефти продолжалась более 500 дней, было добыто более 6 тыс. т нефти и почти 10 тыс. т с учетом газа в нефтяном эквиваленте, что стало крупным достижением в добыче сланцевой нефти из континентальных озерных сланцев в бассейне Сунляо.

### **Проблемы в разведке и разработке сланцевой нефти КНР**

С 2018 г. в основных осадочных бассейнах на территории Китая достигнуты значительные успехи в поиске и разведке залежей сланцевой нефти. Тем не менее существуют очевидные различия между отдельными бассейнами в их геологических характеристиках, типе коллекторов, физических свойствах флюидов, механических свойствах сланцевых пластов в озерных бассейнах. Самая большая проблема, стоящая перед разведкой и разработкой сланцевой нефти, — это низкие дебиты в одной скважине и низкая экономическая эффективность добычи. В условиях низких цен на нефть крупномасштабная разработка сланцевой нефти столкнулась со следующими проблемами.

**1. Эффективность освоения ресурсов сланцевой нефти.** В настоящее время освоение сланцевой нефти в Китае экономически неэффективно. Пока нет единого мнения о том, можно ли эффективно разрабатывать ресурсы сланцевой нефти в больших масштабах и каков ее ресурсный потенциал. Нехватка фундаментальных исследований на государственном уровне в определенной степени ограничивает развитие добычи сланцевой нефти в стране.

**2. Геолого-инженерные технологии для эффективной разработки.** Зрелость нефтематеринских пород, с которыми связаны ресурсы сланцевой нефти Китая, в основном средняя и низкая. Эти породы генерировали 60—70 % всех ресурсов. Из-за низкой зрелости ОВ его нефтегазовый потенциал не мог быть реализован полностью. По этой причине нефть имеет высокую вязкость, высокое содержание парафина. Эффективной разработки такой сланцевой нефти за счет технологии, принятой в США, добиться трудно.

В то же время сланцевая нефть, образовавшаяся при достижении нефтематеринским органическим веществом высоких градаций зрелости, залегает в сланцевых матричных резервуарах. Для разработки нефти в таких резервуарах можно использовать американскую технологию многостадийного ГРП для горизонтальных скважин, но ее необходимо трансформировать с учетом характеристик озерных континентальных коллекторов сланцевой нефти на территории Китая.

**3. Поддержка государства.** Китай пока еще не выдвинул соответствующую государственную политику, поощряющую разработку ресурсов сланцевой нефти. Текущее законодательство по управлению правами на добычу полезных ископаемых не в полной мере подходит для разработки сланцевой нефти, в нем отсутствуют необходимые налоговые льготы и политика национальных субсидий.

**4. Научные кадры и обеспечение оборудованием.** Наблюдается общая нехватка оборудования для экспериментов по добыче и специалистов — исследователей по геологии, разведке и разработке сланцевой нефти как на предприятиях, так и в научно-исследовательских институтах и университетах.

## **ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ДОБЫЧИ СЛАНЦЕВОЙ НЕФТИ В КИТАЕ**

### **Цели и путь развития добычи сланцевой нефти**

**Принцип ориентации национальной политики и приоритета науки и техники.** Научно-технический прогресс является ключом к эффективной разработке сланцевой нефти, который следует, по возможности быстро планировать и реализовывать. Нужно руководствоваться курсом самостоятельных инноваций и открытого сотрудничества. Перенимая важнейшие результаты фундаментальных исследований и выдающиеся технологические результаты в области разработки сланцевой нефти в Северной

Америке, Китае и России, необходимо сосредоточить усилия и решить ключевые проблемы, с которыми столкнулись нефтяные компании на ранних стадиях поисков, разведки и разработки сланцевой нефти в Китае и в России.

Рекомендуется:

а) проводить теоретические и технические исследования, углублять фундаментальные и усилить комплексные исследования по интеграции разведки и разработки сланцевой нефти;

б) эффективно мобилизовать силы университетов и крупных государственных компаний и институтов для участия в инновационных исследованиях по изучению геологии нефтематеринских формаций, условиям генерации и аккумуляции нефти в них и, что особенно важно — исследованию и совершенствованию технологий разработки сланцевой нефти.

**Принцип исследований от простого к сложному.** Обычно в сочетании теоретических, технических исследований и стендовых экспериментов по сланцевой нефти выделяется зона «трех максимумов» (высокое содержание  $C_{орг}$ , высокая степень зрелости керогена, высокая энергия пласта) как максимально перспективная, и на этой основе оцениваются геологические и извлекаемые запасы. Рекомендуется изучать и создавать новые технологии (настоящую технологию *in-situ* (TIS) и модифицированную технологию *in-situ* (MIS)) «облагораживания» сланцевой нефти с низкой и средней степенью зрелости ОВ, и на государственном уровне создать экспериментальные полигоны для эксплуатации таких типов сланцевой нефти.

### **Меры по развитию технологий разведки и разработки сланцевой нефти**

**Нужно усилить исследования по основным теоретическим проблемам и ключевым технологиям** для разведки и разработки сланцевой нефти с учетом особенностей геологии континентальной озерной сланцевой нефти на территории Китая и передовых теорий и опыта США, а также России. Для достижения этой цели необходимо:

а) включить проведение фундаментальных исследований и разработку ключевых технологий в Национальный план крупных фундаментальных исследований Китая и план Ключевых исследовательских проектов Национального фонда естественных наук Китая;

б) Министерству науки и технологий Китая оказывать постоянную и последовательную поддержку проектов этого направления и включать ряд перспективных технологических исследований в план Трансформационных технологий Китая.

**Ускорить создание лабораторий и подготовку научных кадров.** Рекомендуется Национальной комиссии Китая по развитию и реформе оказывать поддержку исследованиям и разработкам основного оборудования, такого как оборудование для крупномасштабного гидроразрыва, вращательного управляемого бурения и инструменты для подземного нагрева пластов. За счет сочетания исследований и практики активизировать и ускорить создание команды специалистов. Ускорить строительство ключевых национальных лабораторий и инженерных центров и со временем создать национальную лабораторию по разведке и разработке сланцевой нефти.

**Продвигать ключевые демонстрационные проекты по разведке и разработке сланцевой нефти:** строительство ключевых экспериментальных полигонов и первые испытания формации Луцао-гоу в бассейне Джунгар, палеогена в бассейне Бохайвань, триасовых отложений в бассейне Ордос, меловых отложений в бассейне Сунляо и др.

**Улучшить политику государственной поддержки,** включая продвижение рыночных реформ в области разведки и разработки сланцевой нефти, создание системы фискальной политики и системы прав собственности на активы для поощрения разведки и эксплуатации сланцевой нефти, усиление политики «снижения сборов и налогов» и усиление финансовой политики, поддерживать усилия по продвижению разведки, разработки, использованию сланцевой нефти и соответствующих технологических инноваций.

**Укрепление международного сотрудничества и обменов.** Сланцевая нефть средней и низкой зрелости является основным ресурсом в Китае, а также основным ресурсом в Волго-Уральской провинции России [Прищепа и др., 2014]. В Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции в баженовской свите — уникальном источнике и резервуаре сланцевой нефти выявлен весь спектр геологических проявлений сланцевой нефти от низкого и среднего до самого высокого уровня катагенеза (апокатагенеза) [Конторович и др., 20186].

Сотрудничество и совместные исследования геологов, геофизиков и нефтяников наших стран в проведении технологических исследований по разведке и разработке сланцевой нефти может значительно сократить такие исследования и реализацию коммерческой эксплуатации.

### **ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ВЫВОДЫ**

Нужно изменить традиционное представление о том, что добыча нефти из сланцев является сложной (нетрадиционной) и признать, что сами сланцы, особенно сланцы с пластами и пропластками песча-

но-алевритовых пород, являются важными перспективными комплексами и могут содержать крупные скопления нефти [Гурари, 1961; Jin et al., 2021, 2022; Jin, 2022]. Основными объектами поисков и разведки сланцевой нефти в Китае будут являться палеогеновые отложения в Бохайваньском бассейне, меловые отложения — в бассейне Сунляо, юрские отложения — в Сычуанском, триасовые отложения — в Ордосском и пермские отложения в Джунгарском бассейнах. По литологическим и текстурным характеристикам резервуаров сланцевой нефти их можно разделить на три типа (см. текст выше). По степени зрелости нефтематеринских пород их, в свою очередь, можно разделить на две категории: со средним—высоким и низким—средним уровнями катагенетической преобразованности органического вещества.

Сланцевые формации со средним и высоким уровнями зрелости материнских пород являются главными объектами для добычи сланцевой нефти в Китае в количестве 10 млн т/год, что должно сыграть важную роль в доведении стабильной добычи нефти в Китае в будущем до уровня 200 млн т/год.

Для сланцевой нефти со средним и высоким уровнями зрелости материнских пород технические методы разработаны в таких направлениях, как оценка выбора благоприятных интервалов и зон, горизонтальное бурение, поэтапные гидроразрывы пласта и оптимизация дебитов скважин. Все эти технологии уже нашли промышленное применение и в Китае.

Сланцевые формации с низким и средним уровнями зрелости материнских пород также обладают огромным потенциалом и широко развиты в бассейнах Сунляо, Бохайвань, Ордос, Джунгар и других. Это важный резерв для замещения энергетических ресурсов в будущем. Для сланцевых формаций с низким уровнем зрелости материнских пород теоретические исследования по их разработке в Китае только начаты. После того, как будут получены новые важные результаты в теории и технологиях по этим типам нефтеносных сланцев, эффективность их разработки может быть значительно повышена, что приведет к серьезным изменениям в добыче нефти и газа. Создание промышленных технологий для этих процессов ожидается к 2030 г.

Авторы признательны за финансовую поддержку Фонду естественных наук Китая (42090020 и 42090025), нефтяным компаниям CNPC и SINOPEC, поддержавших исследовательский проект по сланцевой нефти в 2018 г., академику РАН А.Э. Конторовичу, члену-корреспонденту РАН Л.М. Бурштейну, профессору Ли Сяндун, профессору Д.К. Нургалиеву, доценту А.А. Ефимову и инженеру Э.Ф. Бурхановой за литературную редакцию текста улучшение качества русского языка, анонимным рецензентам за ценные рекомендации по совершенствованию работы.

## ЛИТЕРАТУРА

**Гурари Ф.Г.** О поисках нефти и газа в мезозое Западно-Сибирской низменности // Материалы по геологии, гидрогеологии, геофизике и полезным ископаемым Западной Сибири // Тр. СНИИГГИМС. Л., Гостоптехиздат, 1961, вып. 17, с. 15—31.

**Добрынин В.М., Мартынов В.Г.** Модель и основные параметры пластового резервуара баженовской свиты Салымского месторождения // Нефтеносность баженовской свиты Западной Сибири / Ред. Н.А. Крылов. М., ИГиРГИ, 1980, с. 26—47.

**Зубков М.Ю., Мормышев В.В.** Вещественный состав и условия образования пород баженовской свиты Салымского месторождения // Литология и полезные ископаемые, 1987, № 2, с. 73—80.

**Кирюхина Т.А., Фадеева Н.П., Ступакова А.В., Полудеткина Е.Н., Сауткин Р.С.** Доманиковые отложения Тимано-Печорского и Волго-Уральского бассейнов // Геология нефти и газа, 2013, № 3, с. 76—87.

**Конторович А.Э., Лившиц В.Р.** Новые методы оценки, особенности структуры и пути освоения прогнозных ресурсов нефти зрелых нефтегазоносных провинций (на примере Волго-Уральской провинции) // Геология и геофизика, 2017, т. 58 (12), с. 1835—1852.

**Конторович А.Э., Нестеров И.И., Салманов Ф.К., Сурков В.С., Трофимук А.А., Эрвье Ю.Г.** Геология нефти и газа Западной Сибири. М., Недра, 1975, 679 с.

**Конторович А.Э., Пономарева Е.В., Бурштейн Л.М., Глинских В.Н., Ким Н.С., Костырева Е.А., Павлова М.А., Родченко А.П., Ян П.А.** Распределение органического вещества в породах баженовского горизонта (Западная Сибирь) // Геология и геофизика, 2018а, т. 59 (3), с. 357—371.

**Конторович А.Э., Родякин С.В., Бурштейн Л.М., Костырева Е.А., Рыжкова С.В., Ян П.А.** Пористость и нефтенасыщенность пород баженовской свиты // Геология нефти и газа, 2018б, № 5, с. 61—73.

**Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р., Рыжкова С.В.** Главные направления развития нефтяного комплекса России в первой половине XXI века // Вестник РАН, 2019, т. 89, № 11, с. 1095—1104.

**Конторович А.Э., Бурштейн Л.М., Лившиц В.Р.** Теория нафтидогенеза: количественная модель эволюции аквагенного органического вещества в катагенезе // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (8), с. 1026—1047.

- Лян С., Галушин Г.А., Филиппов В.П.** Условия формирования доманикитов юго-востока Русской платформы // *Георесурсы*, 3(62) 2015, т. 2, с. 54—63, doi: <http://dx.doi.org/10.18599/grs.62.3.22>.
- Нестеров И.И., Ушатинский И.Н., Малыхин А.Я., Ставицкий Б.П., Пьянков Б.Н.** Нефтегазосность глинистых пород Западной Сибири. М., Недра, 1987, 256 с.
- Новиков Г.Р., Салманов Ф.К., Тянь А.В.** Перспективы открытия крупных залежей нефти в трещиноватых аргиллитах баженовской свиты // Научно-технический сборник «Нефть и газ Тюмени», 1970, № 7, с. 1—3.
- Прищепа О.М., Аверьянова О.Ю., Ильинский А.А.** Нефть и газ низкопроницаемых сланцевых толщ — резерв сырьевой базы углеводородов России. СПб, ВНИГРИ, 2014, 323 с.
- Ступакова А.В., Фадеева Н.П., Калмыков Г.А., Богомолов А.Х., Кирюхина Т.А., Коробова Н.И., Шарданова Т.А., Суслова А.А., Сауткин Р.С., Полудеткина Е.Н., Козлова Е.В., Митронов Д.В., Коркоц Ф.В.** Поисковые критерии нефти и газа в доманиковых отложениях Волго-Уральского бассейна // *Георесурсы*, 2015, № 2 (61), с. 77—86.
- Bai G., Qiu H., Deng Z., Wang W., Chen J.** Distribution and main controls for shale oil resources in USA // *Pet. Geol. Exp.*, 2020, v. 42 (4), p. 524—532.
- BP.** Statistical review of world energy. London, BP Distribution Services, 2020.
- Donovan A., Evenick J., Banfield L., McInnis N., Hill W.** An organofacies-based mudstone classification for unconventional tight rock and source rock plays // SPE/AAPG/SEG Unconventional Resources Technology Conference. Austin, TX, 2017.
- Du J., Hu S., Pang Z., Lin S., Hou L., Zhu R.** The types, potentials and prospects of continental shale oil in China // *China Pet. Explor.*, 2019, v. 24 (5), p. 560—568.
- EIA.** World shale resource assessments. U. S. Energy Information Administration, 2015, <https://www.eia.gov/analysis/studies/worldshalegas>.
- EIA.** Drilling productivity report. U. S. Energy Information Administration, 2019, <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/>.
- EIA.** Drilling productivity report: For key tight oil and shale gas regions. Washington, D.C., EIA Independent Statistics and Analysis, 2020, <https://www.eia.gov/petroleum/drilling/>.
- Fu J., Liu X., Li S., Guo Q., Zhou X., Yang W.** Discovery and resource potential of shale oil of Chang 7 member, Triassic Yanchang Formation, Ordos Basin // *China Pet. Explor.*, 2021, v. 26 (5), p. 1—11.
- GB/T 38718-2020.** Shale oil geological evaluation method. Beijing, PetroChina Exploration and Development Research Institute, State Administration for Market Regulation, 2020, <https://www.chinesestandard.net/PDF/English.aspx/GBT38718-2020>.
- Hu S., Zhao W., Hou L., Yang Z., Zhu R., Wu S., Bai B., Jin X.** Development potential and technical strategy of continental shale oil in China // *Pet. Explor. Dev.*, 2020, v. 47 (4), p. 877—887.
- Huo J., Zhi D., Zheng M., Tang Y., Wang X., Chang Q., Guo X., Ding J., He W., Bao H., Gao Y.** Characteristics and main controls of shale oil reservoirs in Lucaogou Formation, Jimsar Sag, Junggar Basin // *Pet. Geol. Exp.*, 2020, v. 42 (4), p. 506—512.
- Jin Z.** Research on the development strategy of China's shale oil resources. Beijing, Pet. Ind. Press, 2022, 202 p.
- Jin Z., Cai X., Liu J., Yu Z., Zhe C.** The recent exploration progress and resource development strategy of China Petroleum and Chemical Corporation // *China Pet. Explor.*, 2018, v. 23 (1), p. 14—25.
- Jin Z., Bai Z., Gao B., Li M.** Has China ushered in the shale oil and gas revolution? // *Oil Gas Geol.*, 2019a, v. 40 (3), p. 451—458.
- Jin Z., Gao D., Jia C., et al.** Research on China's shale oil development strategy. Beijing, Faculty of Chinese Academy of Sciences, 2019b.
- Jin Z., Zhu R., Liang X., Shen Y.** Several issues worthy of attention in current lacustrine shale oil exploration and development // *Pet. Explor. Dev.*, 2021, v. 48 (6), p. 1471—1484.
- Jin Z., Liang X., Bai Z.** Exploration breakthrough and its significance of Gulong lacustrine shale oil in the Songliao Basin, Northeastern China // *Energy Geosci.*, 2022, v. 3 (2), p. 120—125.
- Li M., Ma X., Jiang Q., Li Z., Pang X., Zhang C.** Enlightenment from formation conditions and enrichment characteristics of marine shale oil in North America // *Pet. Geol. Recovery Effic.*, 2019, v. 26 (1), p. 13—28.
- Liang X., Jin Z., Philippov V.P., Obryadchikov O.S., Zhong D., Liu Q., Uspensky B., Morozov V.** Sedimentary characteristics and evolution of Domanik facies from the Devonian–Carboniferous regression in the southern Volga-Ural Basin // *Mar. Pet. Geol.*, 2020, v. 119, p. 104438.
- Liu H.** Exploration practice and prospect of shale oil in Jiyang Depression // *China Pet. Explor.*, 2022, v. 27 (1), pp. 73—87.



- Song M., Liu H., Wang Y., Liu Y.** Enrichment rules and exploration practices of Paleogene shale oil in Jiyang Depression, Bohai Bay Basin, China // *Pet. Explor. Dev.*, 2020, v. 47 (2), p. 225—235.
- Sun L.** Gulong shale oil // *Daqing Pet. Geol. Dev.*, 2020, v. 39 (3), p. 1—7.
- Sun L., Liu H., He W., Li G., Zhang S., Zhu R., Jin X., Meng S., Jiang H.** An analysis of major scientific problems and research paths of Gulong shale oil in Daqing Oilfield, NE China // *Pet. Explor. Dev.*, 2021, v. 48 (3), p. 527—540.
- Yang L., Jin Z.** Global shale oil development and prospects // *China Pet. Explor.*, 2019, v. 24 (5), p. 553—559.
- Yu B., Sun N.** The distribution of global undiscovered hydrocarbon resources and enlightenment // *China Min. Mag.*, 2015, v. 24 (S1), p. 22—27.
- Yuan Y., Hu W., Chen S., Wang G.** The main controlling factors and evaluation ideas of ultra-deep oil and gas preservation // *Mar. Origin Pet. Geol.*, 2019, v. 24 (4), p. 47—56.
- Zhao W., Hu S., Hou L., Yang T., Li X., Guo B., Yang Z.** Types and resource potential of continental shale oil in China and its boundary with tight oil // *Pet. Explor. Dev.*, 2019a, v. 47 (1), p. 1—10.
- Zhao W., Zhu R., Hu S., Hou L., Wu S.** Accumulation contribution differences between lacustrine organic-rich shales and mudstones and their significance in shale oil evaluation // *Pet. Explor. Dev.*, 2020, v. 47 (6), p. 1160—1171.
- Zhao X., Zhou L., Pu X., Jin F., Shi Z., Xiao D., Han W., Jiang W., Zhang W., Wang H.** Favorable formation conditions and enrichment characteristics of lacustrine facies shale oil in faulted lake basin: A case study of Member 2 of Kongdian Formation in Cangdong Sag, Bohai Bay Basin // *Acta Pet. Sin.*, 2019b, v. 40 (9), p. 1013—1029.
- Zou C., Pan S., Hao Q.** On the connotation, challenge and significance of China's "energy independence" strategy // *Pet. Explor. Dev.*, 2020, v. 47 (2), p. 449—462.