

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА
ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

На правах рукописи



Ян Я

**Условия формирования, коллекторские свойства песчаников
в базальных отложениях нижнего эоцена юго-восточной
части впадины Цзиян, Бохайвань, КНР**

СПЕЦИАЛЬНОСТЬ: 1.6.11. Геология, поиски, разведка и эксплуатация нефтяных и
газовых месторождений

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени

кандидата геолого-минералогических наук

Научный руководитель:

доктор геолого-минералогических наук,
профессор Конюхов Александр Иванович

Москва, 2022

Оглавление

Введение	4
Глава 1. Геолого-геофизическая изученность	8
Глава 2. Геологическое строение региона	12
2.1 Стратиграфия отложений	12
2.2 Тектоническое строение региона	22
2.3 Нефтегазоносность	31
2.4 История геологического развития	32
Глава 3. Литологическая характеристика пород	39
3.1 Терригенные грубообломочные, песчаные и алевритовые породы	39
3.2 Глинистые породы	48
3.3 Эвапориты	51
Глава 4. Литолого-фациальные комплексы базальных отложений и обстановки их аккумуляции	54
4.1 Обстановки осадконакопления	54
4.2 Основные литолого-фациальные комплексы	55
4.3 Особенности пространственного распространения различных литолого-фациальных комплексов	76
4.4 Литолого-фациальное районирование	77
4.5 Модель седиментации	82
Глава 5. Постседиментационные преобразования песчаных коллекторов базальных отложений	86

5.1 Постседиментационные процессы	86
5.2 Стадийность вторичных преобразований	93
5.3 Влияние постседиментационных процессов на формирование коллекторских свойств песчаных тел	98
Глава 6. Оценка коллекторских свойств песчаников базальных отложений	103
6.1 Типы песчаных тел	103
6.2 Пустотные пространства песчаных коллекторов	105
6.3 Фильтрационно-емкостные свойства песчаных коллекторов	106
6.4 Факторы, влияющие на коллекторские свойства песчаных пород	110
6.5 Прогноз пространственного распределения коллекторов	113
Заключение	118
Список использованной литературы	120

Введение

Актуальность работы. Изучение литологического состава, фильтрационно-емкостных свойств, особенностей седиментогенеза и постседиментационных процессов, характерных для нижнеэоценовых отложений впадины Цзиян, является актуальной проблемой, так как определение генезиса песчаных пород, выявление закономерностей их распространения и оценка способности этих пород вмещать углеводороды позволят уточнить перспективы открытия новых залежей в пределах области исследований. Впадина Цзиян – одна из самых богатых углеводородами впадин в Китае, доказанные геологические запасы которой составляют 4,26 млрд тонн. В пределах этой впадины расположено второе по величине нефтяное месторождение Китая - месторождение Шэнли. Юго-восточная часть впадины Цзиян является наиболее богатой углеводородными ресурсами. Из-за сложности проведения разведочных работ изучение глубокопогруженных потенциальных коллекторов нижнеэоценовых базальных отложений свит Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4 шло крайне медленными темпами. В связи с постоянной интенсификацией геологоразведочных работ в регионе исследований и растущей потребностью в углеводородных ресурсах крайне необходимым является проведение поисково-разведочных работ на нефть и газ в юго-восточной части впадины Цзиян.

Цель работы заключалась в выявлении закономерностей формирования песчаных коллекторов базальных отложений и оценке их фильтрационно-емкостных свойств (ФЕС) путем изучения седиментационных процессов и постседиментационных преобразований с последующим выделением благоприятных районов для поисков и разведки нефти и газа в пределах юго-восточной части впадины Цзиян и соседних впадин бассейна Бохайвань.

Задачи, которые решались в процессе выполнения работы:

1. Макро- и микроскопическое изучение литологических характеристик пород, в том числе состава, типа цемента, контактных отношений частиц, порового пространства и т.д.
2. Генетическая типизация базальных отложений нижнего эоцена.
3. Реконструкция условий формирования нижнеэоценовых отложений и выполнение литофациального районирования территории исследований.

4. Анализ результатов петрофизических исследований кернa, выявление зависимости фильтрационно-емкостных характеристик пород от условий их накопления.

5. Изучение вторичных преобразований песчаных пород и их стадийность, анализ влияния постседиментационных преобразований на ФЕС песчаных пород.

6. Прогноз распространения песчаных коллекторов различного качества и определение перспективных направлений разведки нефти и газа в регионе исследований.

Защищаемые положения:

1. Накопление нижнеэоценовых песчаных отложений юго-восточной части впадины Цзиян происходило в условиях пологого склона озерного бассейна в виде пролювиальных конусов выноса, фан-дельт и песчаных баров, в которых различия условий седиментации транслируются в изменении гранулометрии, сортировке и минеральном составе обломочного материала. Грубообломочные несортированные породы пролювиальных конусов выноса развиты по периферии склона и имеют граувакковый состав; фан-дельты, выдвигавшиеся в сторону озерного мелководья, сложены среднесортированными граувакковыми аркозами; в составе песчаных баров, формировавшихся параллельно береговой линии озера под воздействием волн, преобладают аркозы с хорошей сортировкой обломочного материала.

2. Решающее влияние на цементацию песчаного материала, морфологию пустотного пространства и, соответственно, качество нижнеэоценовых коллекторов оказал карбонатный материал, накапливающийся в удаленных от побережья участках озера, где обитал многочисленный бентос, в том числе организмы с карбонатным скелетом, являющиеся основным источником вещества для карбонатного цемента. Активная цементация происходила в основном в нижних и в верхних частях пластов песчаников, которые контактировали с карбонатно-глинистыми прослоями. В середине песчаных пластов, как правило, исходные ФЕС сохраняются, при этом поровое пространство песчаников малых мощностей (меньше 10 метров) практически полностью подвергается процессам вторичной цементации.

3. Емкостной потенциал нижнеэоценовых отложений определяется их седиментационными характеристиками, а его вариации отвечают изменениям условий накопления обломочного материала. По сочетанию оценочных параметров качества

коллекторов наилучшими свойствами обладают песчаники фронтальных частей фан-дельт, наихудшими – гравелито-песчаники пролювиальных конусов выноса.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

Для нижнеэоценовых отложений юго-восточной части впадины Цзиян разработана авторская модель седиментации базальных отложений, иллюстрирующая смену обстановок осадконакопления во времени и пространстве.

Выявлено и проиллюстрировано влияние аридного климата на облик изученных отложений, характеризующийся пестрой окраской с преобладанием красного цвета, и реконструированы условия образования нижнеэоценовых эвапоритов.

Установлены закономерности изменения ФЕС песчаных коллекторов с учетом влияния седиментационных и постседиментационных процессов, определена роль этих процессов в формировании емкостного потенциала изучаемых пород, обоснованы механизмы образования в песчаниках вторичной пористости.

Комплексный анализ особенностей накопления нижнеэоценовых отложений и оценка их постседиментационных преобразований позволили осуществить типизацию песчаных коллекторов, послужившую основой для выделения в юго-восточной части впадины Цзиян наиболее перспективных для разведки залежей нефти и газа областей.

Практическая значимость. Установленные закономерности формирования песчаных коллекторов, а также прогноз их распространения на изучаемой территории способствуют выявлению новых объектов для поискового бурения и оптимизации геологоразведочных работ. Кроме того, использование полученных результатов обеспечит более достоверный подсчет запасов УВ в нижнеэоценовом комплексе юго-восточной части впадины Цзиян. Методические приемы, применяемые в работе, могут быть использованы для прогноза структур и свойств песчаных коллекторов в других нефтегазоносных областях.

Фактический материал и методы исследования. Работа выполнена по материалам собственных исследований автора, проведенных в лаборатории коллекторов китайского нефтяного университета. Для решения поставленных задач использовался комплекс методов исследования пород, включающий макроскопическое (керна по 20 скважинам) и микроскопическое описание осадочных отложений (более 300 шлифов), их минералогическое и петрофизическое изучение. Автором лично проинтерпретированы

данные ГИС по 73 скважинам, проанализированы региональные сейсмические профили и данные петрофизических параметров (пористость и проницаемость пород) коллекции образцов (свыше 200 шт.).

Степень достоверности результатов. Достоверность и обоснованность представленных в работе результатов обеспечивается обширным фактическим материалом, применением общепринятых методик, использованием современного программного обеспечения и лабораторного оборудования. Выводы базируются на установленных теоретических положениях и фактах и согласуются с опубликованными данными других исследователей.

Структура и объём работы. Диссертационная работа общим объемом 125 страниц состоит из введения, 6 глав и заключения, включает 43 рисунка, 4 таблицы, список литературы содержит 66 наименований.

Благодарности. Автор сердечно благодарен своему научному руководителю профессору, д.г.-м.н. Конюхову А.И. и заведующей кафедрой геологии и геохимии горючих ископаемых МГУ, д.г.-м.н. Ступаковой А.В. за постоянную помощь в работе над диссертацией, а также Балагурову М.Д. за научные консультации, поддержку и всестороннюю помощь при написании работы, Колесниковой Т.О. за помощь с русским языком и всему коллективу кафедры геологии и геохимии горючих ископаемых Геологического факультета МГУ за поддержку, оказанную при написании данной работы. Автор также благодарит Гэ Синмин, доцента Китайского нефтяного университета, за его поддержку и помощь в обработке и интерпретации данных.

Глава 1. Геолого-геофизическая изученность

Геологические и геофизические исследования в бассейне Бохайвань (рис. 1) начались в 1955 году. В 1961 году в скважине Хуа-8 были получены первые промышленные притоки нефти, что ознаменовало новый этап разведки нефти и газа во впадине Цзиян. В истории изучения впадины Цзиян можно выделить несколько этапов. 1961-1963 годы были начальным этапом разведки. В этот период из палеогеновых отложений яруса Шахэдие были получены притоки нефти до 100 тонн в сутки.

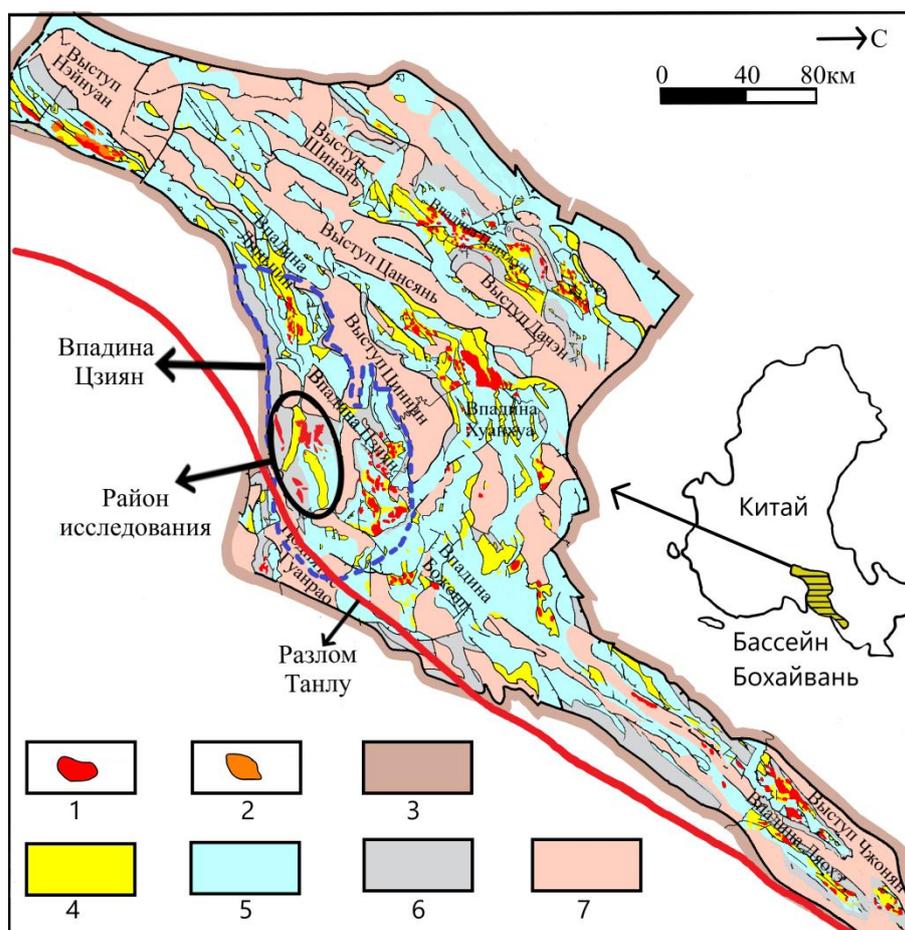


Рисунок 1. Схема тектонического строения бассейна Бохайвань (У. Сао, 2013)

Условные обозначения: 1 – нефтяные залежи; 2 – газовые залежи; 3 – поднятие;

4 – тектонические единицы второго порядка; 5 – впадина; 6 – пологий склон;

7 – выступ

1964-1980 годы были этапом развития, в течение которого основные работы были направлены на разведку месторождений в антиклинальных структурах. Были открыты

нефтяные и газовые месторождения, такие как Шэнто, Дунсин, Юнан, Шианхэ, Хаодиа, Биннан, Линпан и Гудао, добыча нефти достигла около 20 миллионов тонн в год, в это же время было открыто нефтяное месторождение Шэнли во впадине Цзиян, которое стало вторым по величине в ресурсной базе Китая.

1980-1988 годы характеризуются ускоренным развитием в связи с возникновением новых методов и технологий разведки, проведена комплексная разведка различных типов зон нефтегазонакопления, все это способствовало открытию месторождения Гудун. В 1986 году годовая добыча нефти достигла своего пика во всей предшествующей истории разработки, достигнув 30 миллионов тонн. В этот период исследования были сосредоточены в основном на палеогеновых и неогеновых отложениях, особенно на поиске и разведке литологически и стратиграфических экранированных залежей нефти и газа. Чжоу Чжили, Льв Чжэнмоу (1984, 1987) проанализировали литологические характеристики палеогеновых и неогеновых отложений и подробно описали окаменелости во впадине Цзиян с помощью изучения кернового материала. Чжоу Гуанцзя и Янь Ханьцзе (1984, 1985) провели детальное исследование геохимических характеристик нефти, добытой в районе исследований, изучили ее состав и свойства. Хун Цюаньхуа, Ляо Юншэн (1983, 1981) занимались изучением нефтегазоматеринских пород и определением их генерационного потенциала.

В 1987 году годовая добыча нефти достигла нового пика, превысив 30 млн.тонн, с 1989 года по настоящее время добыча углеводородов показывает стабильное развитие. Циан Кай, Шияй Дэфу (1989, 2001) изучили тектонические характеристики впадины Цзиян, определили условия формирования залежей нефти и газа и проанализировали потенциал разведки углеводородов. К концу 2006 г. было пробурено более 5900 скважин, степень разведанности была относительно высокой, хотя условия становились все более сложными, в связи с чем изученность области оставалась крайне неравномерной. 90% обнаруженных залежей нефти и газа оказались приуроченными к отложениям третичной системы (Сао и др., 2011). Геологическое строение и нефтегазоносность бассейна Бохайвань рассматривались в работах советских и российских геологов. В разные годы эти вопросы затрагивались в работах Высоцкого и др. (1981), Лимонова и Бурлина (1985), Геодекяна и др. (1988), Милановского (1991), Варнавского и др. (2002), Кирилловой,

Белашова и Жарова (2005), Конюхова (2007) и других авторов (Кузнецов и др., 2020). Являясь очень перспективным районом в пределах бассейна Бохайвань, впадина Цзиян всегда привлекала внимание российских геологов. А.И. Конюхов и Чэнь Сяоцзюнь изучили литологию и условия формирования палеогеновых отложений впадины Дунин. Кузнецов В. Г. и Лю Шици проанализировали литологию и условия образования средне-верхнеолигоценых отложений впадины Чхэнбэй.

В юго-восточной части впадины Цзиян распространены базальные толщи континентальных и озерных отложений, сложенных песчаниками с прослоями и пачками глин и окрашенных в красный, бурый и другие пестрые цвета, получившие название красноцветной формации, в составе которой выделяются свиты Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4. В последние годы, углубленное изучение этих свит показало их хороший разведочный потенциал. Совокупные доказанные запасы составляют около 3×10^8 т. Успешное бурение скважины Ван-94 привело к получению промышленного высокодебитного потока нефти, что положило начало исследовательскому буму, касающемуся свит Кондянь и нижней части Шахэдие-4 (Liu, Nan, 2012).

Ранние исследования впадины Цзиян в основном были сосредоточены на верхней части Шахэдие и Дунин. Из-за больших глубин залегания подробное изучение свиты Кондянь и нижней части Шахэдие-4 стало возможным лишь в 2007 году, и к настоящему времени данные отложения вскрыты более чем 580 разведочными скважинами.

С опорой на результаты предыдущих исследований в ходе выполнения данной работы были изучены керн по 20 скважинам, шлифы по 15 скважинам (более 300 шт.), скважинные геофизические данные для 73 скважин (рис. 2), а также материалы 2D и 3D сейсморазведки. Полученные результаты согласуются с установленными теоретическими положениями и фактами, а также с опубликованными данными других исследователей, что в итоге позволяет говорить о повышении степени геолого-геофизической изученности района исследований.

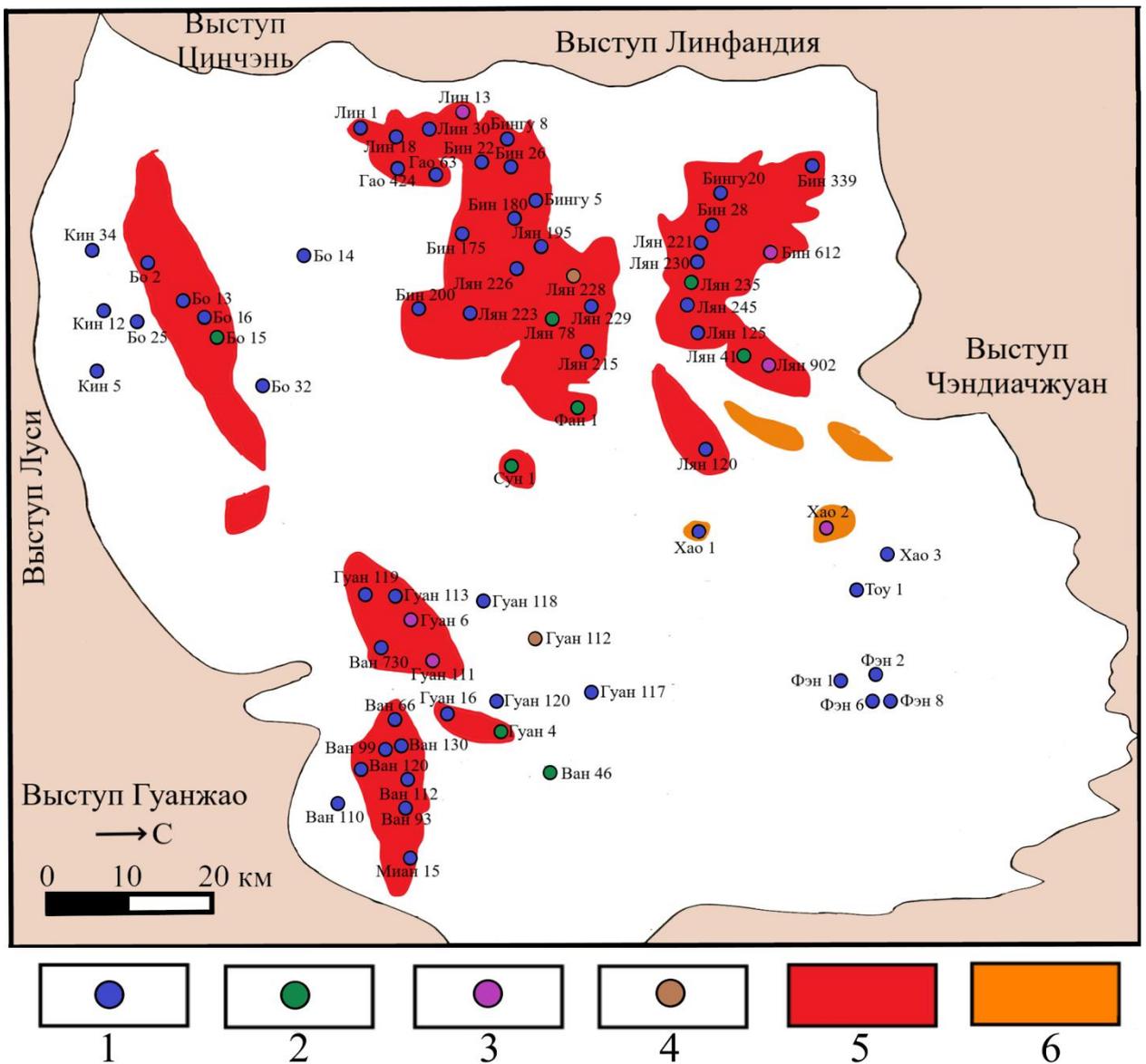


Рисунок 2. Карта фактического материала

Условные обозначения: Имеющийся фактический материал по скважинам: 1 – комплекс ГИС и каменный материал; 2 – керн; 3 – шифы; 4 – керн и шифы;

Открытые месторождения: 5 – нефтяные; 6 – газовые

Глава 2. Геологическое строение региона

2.1 Стратиграфия отложений

Стратификация отложений проведена в результате изучения каротажных, сейсмических данных и данных керна многочисленных скважин, пробуренных во впадине Цзиян. Выделяются архей-нижнепротерозойский фундамент и палеозой-кайнозойский чехол, разделенные угловым несогласием. В разрезе отсутствуют отложения среднего и верхнего протерозоя, палеозойские отложения от верхнеордовикских до нижнекаменноугольных, а также отложения триасовой системы. Кайнозойская система представлена в полном объеме, палеоген-неогеновые отложения являются основными толщами заполнения бассейна Бохайвань (Li, Wang, 2002).

Архей и нижний протерозой

Фундамент представлен породами архея и нижнего протерозоя мощностью более 800 м. В составе преобладают серые и красные гранитные гнейсы, сильно метаморфизованные.

Палеозойская группа

Группа представлена породами нижнего и верхнего палеозоя. В составе нижнего палеозоя выделяются отложения кембрия, нижнего и среднего ордовика. Верхний палеозой представлен породами среднего и верхнего карбона и нижней перми. Кембрий и нижележащий архей находятся в контакте углового несогласия.

Кембрийская система

В составе кембрийской системы выделяются 3 отдела: нижний, средний и верхний. Кембрийские отложения с угловым несогласием перекрывают фундамент.

Нижний отдел представлен переслаиванием пурпурных сланцев, известняков и доломитов. В нижней части присутствует коричнево-серый кремнистый или кремнистый скрытокристаллический доломит. Мощность более 200 м. Отложения накапливались в мелководных морских и приливно-отливных обстановках.

Средний отдел представлен карбонатными породами, в верхней части преобладают серо-фиолетовые, темно-пурпурно-красные сланцы и алевроитовые сланцы с вкраплениями

оолитовых известняков, в нижней части развиты мощные известняки. Наблюдается косая слоистость, палеоосадочная обстановка представлена в основном высокоэнергетическими отмелями. Толщина отложений колеблется в пределах 200-400 м.

Отложения позднекембрийского возраста представлены известняками серо-зелеными глинистыми полосчатыми, с вкраплениями серо-зеленых сланцев, с оолитовыми известняками в нижней части. Мощность отложений в основном 50-200 м.

Ордовикская система

Разрез сложен в основном доломитами и известняками, выделяются 2 отдела: нижний и верхний.

В нижнем отделе выделяются серые кристаллические доломиты с зеленоватыми известняками и глинистыми доломитами. Это основные нефтематеринские отложения в Сюншане, Ихэчжуане. Их мощность составляет 240 м. В отложениях часто встречаются трещины. Древняя форма рельефа представляла собой высокоэнергетическую приливную зону и низкоэнергетическое мелководье.

Верхний отдел сложен в основном темно-серыми и коричневато-серыми известняками с небольшим количеством глинистых и доломитовых известняков. Отложения подверглись эрозии, в процессе чего образовались трещиноватость и вторичные полости. Мощность отложений от 350 до 800 м.

Каменноугольная система

Каменноугольная система выделяется в объеме нижнего и верхнего отделов. .

Мощность нижнего отдела 40-60 м, представлены красновато-бурыми, серыми глиноземистыми аргиллитами, в нижней части в основном серо-белые бокситы, в средней зоне распределены кремневые конкреции. Отдел находится в параллельном несогласном контакте с нижележащими породами.

В верхнем отделе преобладает переслаивание темно-серых углистых глинистых пород с темно-серыми алевролитами и мелкозернистыми песчаниками. В толще присутствуют пласты углей, видна явная ритмическая структура. Средняя и верхняя части содержат 2-3 м темно-серого известняка, содержащего окаменелости головастиков. Отложения накапливались в обстановках чередования суши и моря с устойчивым распространением.

Мощные серые кварцево-полевошпатовые песчаники в нижней части ограничивают контакт с подстилающей толщей.

Пермская система

В составе пермской системы, представленной переслаиванием серых аргиллитов и белых песчаников, выделяются нижний и верхний отделы. Мощности пермских отложений более 700 м.

Нижний отдел представлен темно-серыми, серо-черными аргиллитами, углистыми аргиллитами с прослоями песчаников и сланцев. В нижней части развиты мощные средне-крупнозернистые полевошпатовые кварцевые песчаники с прослоями темно-серых органогенных известняков и угольных пластов. В верхней части преобладают пестрые бокситы, к низу окраска становится более темной.

Верхний отдел сложен в основном переслаиванием песчаников и глинистых пород. В верхней части преобладают пурпурно-красные, коричнево-красно-серо-зеленые аргиллиты с прослоями буро-красных, серо-фиолетовых полевошпатовых кварцевых песчаников, на дне развиты мощные высокоомные песчаники. Литологический состав средней и верхней частей аналогичен, за исключением того, что размер зерен песчаников становится более крупным, а мощность прослоев увеличивается вверх по разрезу. Нижняя часть представлена серо-фиолетовыми, серо-зелеными аргиллитами с примесью желтых среднезернистых кварцевых песчаников, в кровле присутствуют оолитовые бокситы.

Мезозойская группа

Во впадине Цзиян широко распространены юрские и меловые отложения, отсутствуют отложения триаса (рис. 3).

Юрская система

Нижняя часть представлена серыми песчаниками и фиолетовыми аргиллитами с прослоями черных углистых аргиллитов, местами видны угольные пласты, мощность 400 м. Средняя часть представлена переслаиванием пурпурных аргиллитов и серых доломитистых аргиллитов и песчаниками, мощность около 350 м. В верхней части юрской системы залегают серые, серо-зеленые аргиллиты и песчаные аргиллиты с прослоями

песчаников, гравийных песчаников, мощность в пределах 0-200 м.

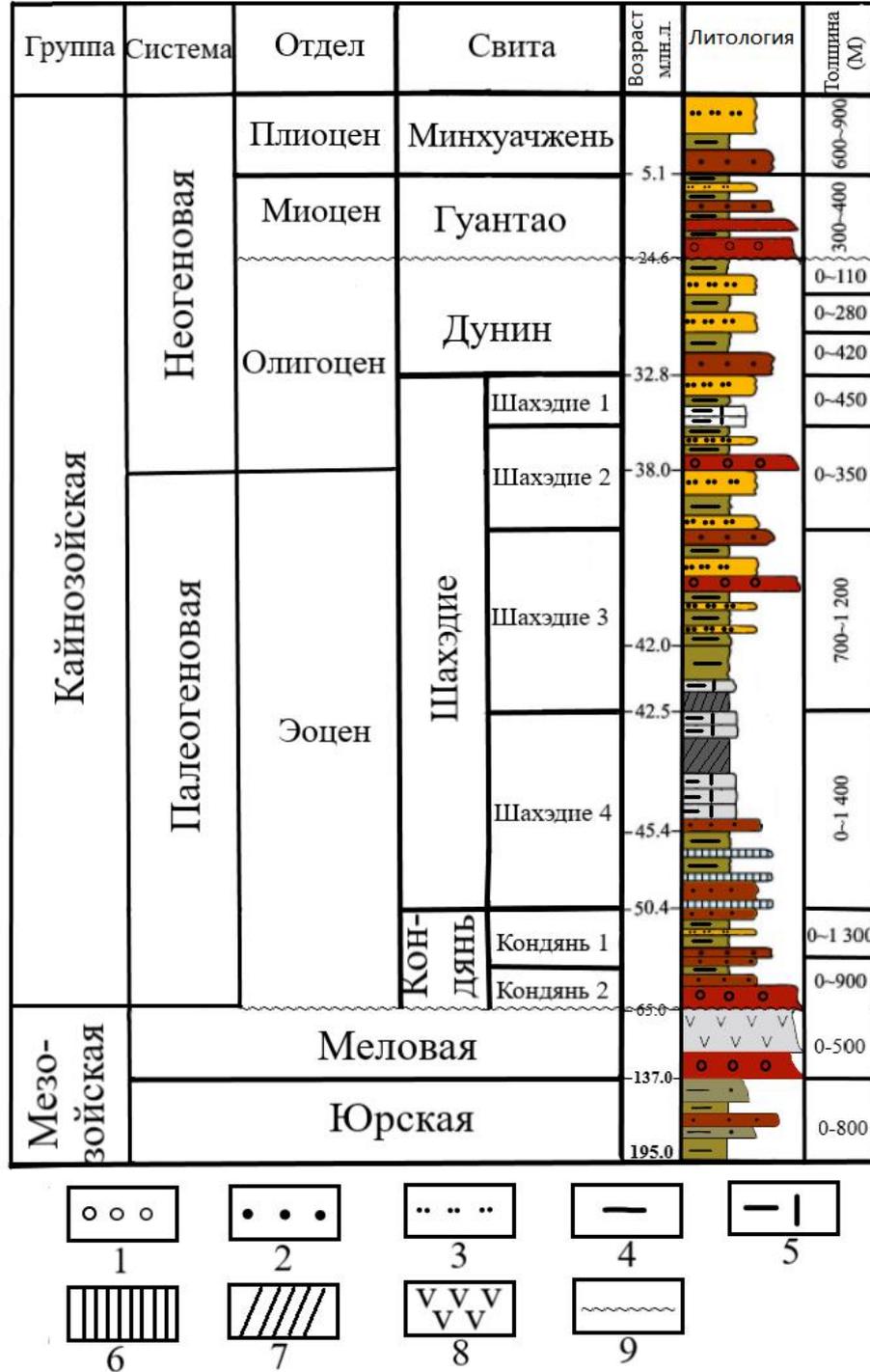


Рисунок 3. Литолого-стратиграфический разрез мезозойских и кайнозойских отложений (J. Wang, 2009)

Условные обозначения: 1 – гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевалиты; 4 – глинистые породы; 5 – известково-глинистые породы; 6 – ангидриты; 7 – гипсы; 8 – габбро; 9 – поверхности несогласия

Меловая система

Нижняя часть представлена кислыми эруптивными породами, такими как андезит, базальт. Верхняя часть представлена переслаиванием лиловых и коричнево-красных глинистых пород, пурпурно-красных песчаников и гравийных песчаников. Состав песчаников представлен ортофирами и туфами. Полифировая структура калиевых полевых шпатов с мелкими порами. Меловые толщи имеют толщину от 700 до 1000 м.

Кайнозойская группа

Кайнозойские образования представлены палеогеновыми и неогеновыми породами. Кайнозойские отложения залегают с региональным и угловым несогласием, мощность достигает 7000 м. В разрезе кайнозойских отложений выделяются ярусы Кондянь, Шахэдие, Дунин, Гуантао и Минхуачжэнь.

Палеогеновая система

Палеогеновые отложения во впадине Цзиян имеют широкое распространение, их мощность постепенно уменьшается с севера на юг. Глубина залегания до 3000 м. В разрезе палеогена выделяются три яруса, снизу вверх: Кондянь, Шахэдие, Дунин.

Ярус Кондянь. Ярус Кондянь (палеоцен-ранний эоцен) включает Кондянь-1 и Кондянь-2, которые различаются по литологическому составу.

Кондянь-2 локально распространен в районе исследования, представлен в основном серыми и темно-серыми аргиллитами. Встречаются серо-пурпурные аргиллиты, смешанные со светло-серыми гравелистыми песчаниками, алевролитами, горючими сланцами и углистыми аргиллитами. Мощность отложений в пределах 75-600 м.

Кондянь-1 представляет собой переслаивание коричнево-красных песчаников и пурпурно-красных аргиллитов с небольшим количеством серых аргиллитов, в нижней части видны углистые аргиллиты. В центральной и северной части впадины в пределах этого яруса встречается небольшое количество серо-белых ангидритовых аргиллитов и глинистых гипсовых пород. Мощность отложений варьирует от 100 до 600 м во впадине.

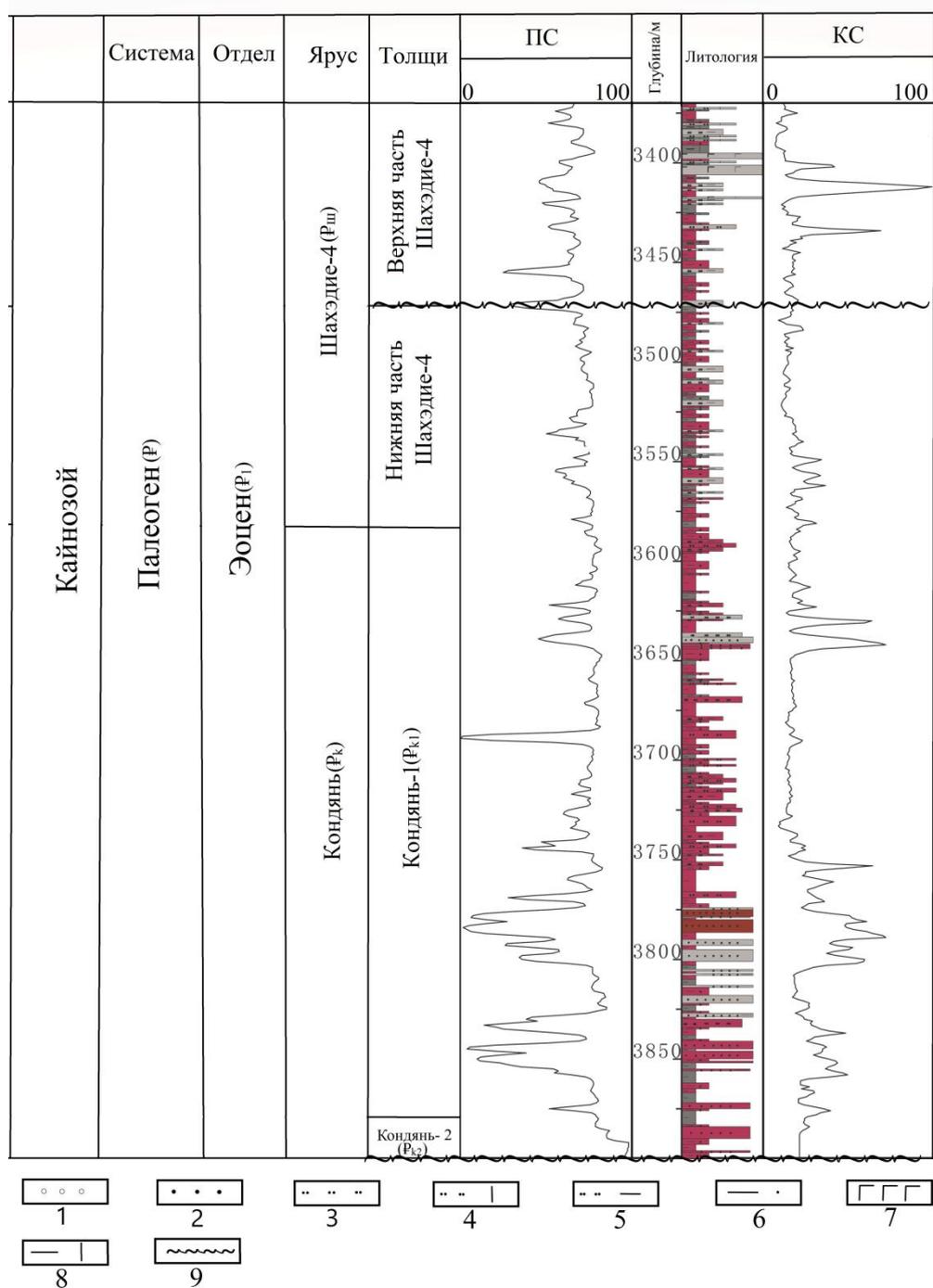


Рисунок 4. Литолого-стратиграфический разрез свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (ширина литологической колонки иллюстрирует размер зерна породы: чем шире, тем больше размер зерна)

Условные обозначения: 1 – гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты; 4 – известковые алевролиты; 5 – глинистые алевролиты; 6 – песчаные глинистые породы; 7 – базальты; 8 – известковистые глинистые породы; 9 – поверхности несогласия

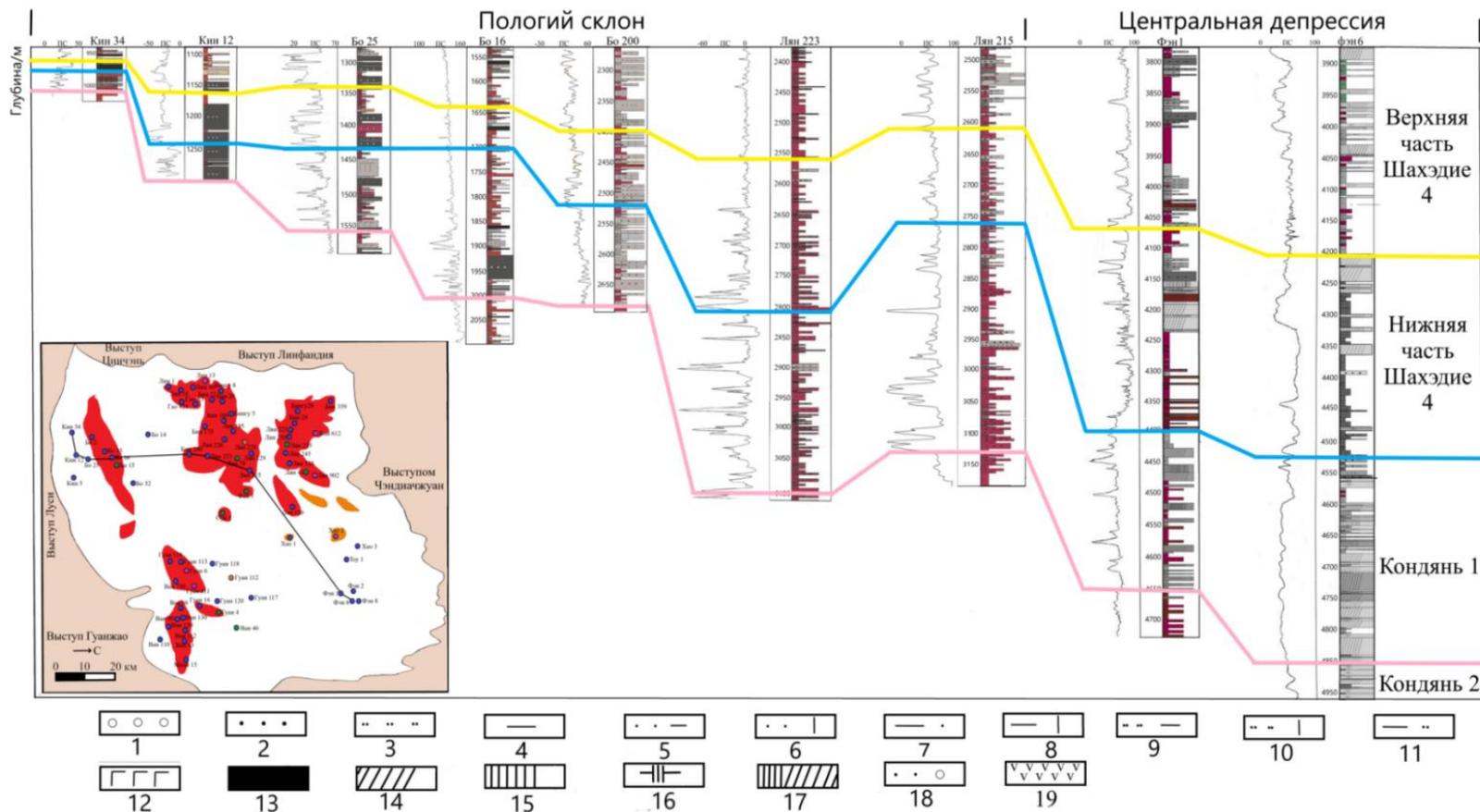


Рисунок 5. Схема корреляции свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4

Условные обозначения: 1 – гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевролиты; 4 – глинистые породы; 5 – глинистые песчаники; 6 – известковые песчаники; 7 – песчано-глинистые породы; 8 – известково-глинистые породы; 9 – глинистые алевролиты; 10 – известковые алевролиты; 11 – алевролитово-глинистые породы; 12 – базальты; 13 – уголь; 14 – ангидриты; 15 – гипсы; 16 – глинистые породы с содержанием эвапоритов; 17 – эвапориты; 18 – песчаники с примесью гравия; 19 – габбро

Литологические характеристики яруса Кондянь отличаются от характеристик нижней Шахэдие-4, что также явно прослеживается по различиям поведения каротажных кривых. В ярусе Кондянь больше обломочных пород, чем глинистых пород, а кривые кажущего сопротивления (КС) и потенциала собственной поляризации (ПС) имеют более высокие амплитуды. В отложениях Шахэдие-4 преобладают глинистые породы, распространение более крупнозернистых обломочных пород значительно меньше. Значения КС и ПС значительно ниже по сравнению с ярусом Кондянь (рис. 4).

Ярус Шахэдие. Ярус Шахэдие имеет относительно высокую степень изученности и огромную мощность, его можно разделить на свиты Шахэдие-4, Шахэдие-3, Шахэдие-2 и Шахэдие-1

Шахэдие-4 разделена на нижнюю, среднюю и верхнюю части.

Нижняя часть Шахэдие-4 представлена переслаиванием красных, серых и пестроцветных глинистых пород, серых, светло-коричневых песчаников, доломитовых песчаников, известковых песчаников и светло-серых гипсоносных глинистых пород, содержащих большое количество кристаллов гипсов и ангидритов. Отложения Шахэдие-4 залегают на отложениях Кондянь с угловым несогласием. Мощность около 300-400 м.

Основными горизонтами данного исследования являются ярус Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (рис. 5). Данные стратиграфические единицы характеризуются различными особенностями в разных областях бассейна. Нижняя и верхняя части кривых ПС в скважинах 34, 12 и 25, расположенных на краю бассейна, часто характеризуются резкими изменениями. Значения ПС здесь больше, чем в аналогичных по возрасту отложениях других областей района исследований. Внезапное изменение поведения кривых иллюстрирует изменение состава, вызванное уменьшением объемов сносимого материала, большая амплитуда кривой указывает на то, что порода характеризуется крупным размером зерен и хорошей проницаемостью. В скважинах Лян-223 и Гао-215 можно увидеть пикообразные кривые большой амплитуды, указывающие на размерность зерен породы от средней до крупной и на высокую проницаемость. Ближе к центру бассейна находится большая площадь развития эвапоритов, характеризующаяся отсутствием воды и высокой плотностью, значительных изменений в поведении кривых по сравнению с вмещающими породами. Породы изученных свит представлены в

основном обломочными породами разной зернистости, часто с прослоями аргиллитов и эвапоритов. Встречаются циклиты, внутри которых зернистость породы уменьшается вверх по разрезу, и снизу вверх видна градация песчаники-алевролиты-аргиллиты.

В состав средней части Шахэдие-4 входят переслаивающиеся серо-черные глинистые породы и серо-белые соленосные породы, мощность отдельных слоев около 3-30 м, общая толщина составляет 300-450 м. Встречаются полигалиты и серо-желтые мирабилиты.

В верхней части Шахэдие-4 преобладают темные глинистые породы, горючие сланцы, известковые аргиллиты и мергели с прослоями песчаников и алевролитов, аргиллиты твердые и плотные, с явной горизонтальной слоистостью. Данные толщи служат важной нефтематеринской породой во впадине Цзиян. Большое количество песчаников, распределенных локально, может быть выделено в качестве хороших коллекторов. Суммарная мощность отложений достигает 270-350 м.

Шахэдие-3 в основном сложена темными песчаниками и глинистыми породами, в разрезах впадины преобладают серые, темно-серые глинистые породы с прослоями песчаников, горючих сланцев и углистых аргиллитов. В составе толщи выделяются: нижняя часть, средняя часть и верхняя часть Шахэдие-3.

Нижняя часть представлена темно-серыми, буро-коричневыми глинистыми породами, известковистыми глинистыми породами и горючими сланцами с небольшим количеством алевролитов и светло-серых разномыслистых песчаников. Мощность колеблется от 300 до 450 м. Отложения нижней части Шахэдие-3 являются основными нефтематеринскими толщами в данном районе. В некоторых местах можно увидеть битумы. В средней и верхней части преобладают песчаники, и они являются важными нефтяными коллекторами. Центральная часть впадины в основном сложена турбидитами, представляющими собой подводные русловые песчаные тела, к которым приурочены литологически экранированные залежи. Мощность отложений в средней и верхней частях варьирует в пределах 300-550 м.

В составе *Шахэдие-2* выделяются две толщи: нижняя и верхняя. Нижняя часть Шахэдие-2 представляет собой серо-зеленые, серые глинистые породы с прослоями песчаников и гравийных песчаников с мощностью в пределах 100-400 м. Мелкие песчаники содержат горючие сланцы и обугленные фрагменты ископаемых растений. В

состав верхней части Шахэдие-2 входят серо-зеленые, пурпурно-красные глинистые породы и серые песчаники с прослоями известковистых песчаников, алевролитов и галечных песчаников. Толща находится в несогласном контакте с подстилающими отложениями. Мощность нижней части Шахэдие-2 около 30-310 м.

Шахэдие-1 залегает на подстилающих отложениях согласно, в основном состоит из серых, темно-серых, серо-коричневых глинистых пород, темных аргиллитов и горючих сланцев, с тонким слоем карбонатных пород. Данная толща может быть выделена в качестве региональной покрывки, и в то же время, нефтематеринской породы. Мощность отложений около 100-400 м.

Ярус Дунин. Отложения ярусов Дунин и Шахэдие накапливались непрерывно, но во время Дунин площадь озера постепенно уменьшалась. Отложения яруса представлены в основном чередованием слоев песчаников неравномерной толщины, галечных песчаников и серо-зеленых, пурпурно-красных глинистых пород. Размерность зерен пород постепенно уменьшается от края впадины к ее центральной: песчаные отложения сменяются глинистыми. В разрезе толщи выделяются две свиты: Дунин-1 и Дунин-2.

В основании разреза Дунин-2 наблюдается переслаивание мелкозернистых серо-белых песчаников и серых глинистых пород, содержащих окаменелости остракод. С юга на север прослой глинистых пород становятся толще и темнее по цвету. На возвышениях данные отложения отсутствуют, встречаются пласты, выклинивающиеся вверх по восстанию на периферии впадины. Свита Дунин-1 представлена серыми, серо-зелеными и коричнево-красными аргиллитами с небольшим количеством алевролитов и тонких мергелей, содержащих окаменелости остракод. Свиты Дунин-1 и -2 имеют примерно одинаковую мощность, в интервале 150-300 м.

Неогеновая система

В неогеновой системе выделяются 2 яруса: Гуантао и Миньхуачжэнь.

Ярус Гуантао. Породы Гуантао залегают с региональных несогласием на подстилающих отложениях. В составе яруса Гуантао выделяют 2 части: нижняя и верхняя.

Нижняя часть яруса Гуантао представлена серыми, серо-белыми массивными конгломератами, галечными песчаниками и песчаниками с прослоями серых, серо-зеленых,

пурпурно-красных глинистых и песчанистых глинистых пород. Мощность около 80-500 м. Размер частиц пород в разрезе уменьшается снизу вверх. Отложения залегают на отложениях яруса Дунин с угловым несогласием. В отдельных районах присутствуют вулканогенные породы.

Верхняя часть в основном представлена переслаиванием серо-зеленых глинистых пород и серо-белых песчаников, мощность этих отложений изменяется в пределах 70-600 м. Генетически отложения связаны с деятельностью рек.

Ярус миньхуачжэнь. Отложения яруса Минхуачжэнь имеют речной генезис. Они представляют собой коричнево-желтые алевролиты с небольшим количеством тонкослойных морских отложений. Свита делится на верхнюю и нижнюю части, причем породы в верхней части имеют более крупную размерность зерен. Мощность яруса Минхуачжэнь варьирует от 650 до 1300 м, за исключением депрессии Вибэй, где мощность составляет от 100 до 250 м. Ярус Минхуачжэнь находится в региональном несогласии с четвертичным периодом в кровле.

Четвертичная система

Четвертичная система представляет собой ярус Пинюань, состоящий из пестрых лессов, песчаных аргиллитов и рыхлых глутенитов, мощностью около 250-350 м.

2.2 Тектоническое строение региона

2.2.1 Тектоническое строение бассейна Бохайвань

Бассейн Бохайвань представляет собой мезозойско-кайнозойский рифтогенный бассейн на Северо-Китайской платформе, который сформировался на основе индосинийского движения и движения Яншань в мезозое (Высоцкий и др., 1981). Причиной его образования является задуговое расширение и опускание, вызванное субдукцией Тихоокеанской плиты к Азиатскому континенту (Хуе и др., 2008). Бассейн Бохайвань вытянут в широтном направлении на 700 км, ширина составляет 410 км, общая площадь $20 \times 10^4 \text{ км}^2$, включая сушу и океан. В пределах бассейна Бохайвань выделяется 6 впадин: Цзичжун, Хуанхуа, Линьцин, Цзиян, Божонг, Ляохэ, и четыре поднятия: Цансянь, Сехэн, Чэннин и Нэйхуан (см. рис. 1), среди которых только впадина Божон является

самостоятельной структурной единицей, полностью расположенной в пределах акватории Бохайского моря (Peng и др., 2003). Бассейн Бохайвань граничит с поднятиями Яньшань на северо-западе, поднятиями горы Тайхан на западе, примыкает к поднятию Цзяолиао на востоке и Луси на юго-западе. Зона разлома Танлу представляет собой гигантскую зону дизъюнктивных нарушений в восточном Китае, ее формирование и эволюция напрямую контролируют формирование и отмирание впадин в бассейне Бохайвань (Лимонов и Бурлин, 1988).

2.2.2 Тектоническое строение юго-восточной части впадины Цзиян

Впадина Цзиян расположена на юго-востоке бассейна Бохайвань и представляет собой рифтовую впадину, образованную поднятием верхней мантии в позднем меловом периоде. Общая площадь впадины около 25000 квадратных километров (Конюхов, Чэнь, 2007). Она представляет собой классический полуграбен с крутым северным и пологим южным крылом. Впадина Цзиян содержит множество мелких впадин, в том числе впадины Дунин, Хуэйминь, Чечжэнь и Чжаньхуа. Объектом данных исследований является пояс пологих склонов с большим количеством базальных красноцветных отложений на юго-востоке впадины Цзиян (рис. 6), который окружен областями кайнозойских выступами, в том числе выступом Линфандиа и Цинчэнь на западе, выступом Чэндячжуан на севере, выступом Гуанжао на юго-востоке и выступом Луси на юге.

Пологий склон

Полого-склоновый пояс относится к моноклиальному поясу, который соединяет континентальную рифтогенную впадину с поднятием. В соответствии с развитием и распределением разломов и пластов пологий склон юго-восточной части впадины Цзиян можно разделить на зоны ступенчатых сбросов, трансгрессивные структуры, моноклиальные структурные пояса.

Зоны ступенчатых сбросов в основном развиты в поясе поворота депрессии и пологих склонов и изрезаны большим количеством почти параллельных второстепенных разломов образующих ступени. Трансгрессивная зона расположена на периферии склона, развито множество поверхностей денудации. Моноклиальный структурный пояс расположен

между зонами ступенчатых сбросов и трансгрессивных структур, с небольшим количеством маленьких разломов. Трещины распространяются на короткие расстояния, и отложения ими не контролируются. Моноклиальный структурный пояс в основном распространен в районе Чэньцзячжуан в середине склона. Структуры погребенных гор в основном расположены на склонах поднятия Гуантао.

Зона пологого склона, контролируемая тектоническим напряжением и граничными разломами, образует структурные носы, простирающиеся с севера на юг, которые играют положительную роль в формировании ловушек и накоплении углеводородов в этом районе. С запада на восток выделяются структурные носы Цзиньцзя-Фаньцзя, Сунхуа-Цаоцяо, Ванцзяган и Бамианнэ. Седловина между носообразными структурными поясами представляет собой депрессию. Среди всех четырех структур Цзиньцзя-Фаньцзя на западе относительно пологая и развита на мезозойском палеотектоническом фоне. Для остальных, расположенных на востоке разлома Шисун, характерна более ярко-выраженная носообразная структура. Носообразный структурный пояс Сунхуа-Цаоцяо разделяет пологий склон на западную и восточную части, тектонические особенности которых определяют разницу в обстановках осадконакопления (Lv и др., 2008).

Депрессия

Центральная депрессия юго-восточной части впадины Цзиян является основной областью осадконакопления третичного периода, она пересекает крупный пояс разломов, который протягивается на 80 км в СВ направлении, её ширина не превышает 50км. Центральная депрессия распадается на несколько небольших впадин, заполненных в основном тонкозернистыми осадками эоцена и олигоцена, в том числе глинами, обогащенными ОВ, и горючими сланцами. В результате длительного периода разведки и эксплуатации стало очевидным, что к центральному поясу разломов приурочена значительная часть запасов нефти, открытых в юго-восточной части впадины Цзиян, где в коллекторах с хорошей проницаемостью сосредоточено много небольших залежей.

Основные системы разломов

Впадина Цзиян испытала несколько периодов тектонических активизации, в ходе которых формации были разрезаны и преобразованы, в результате чего был сформирован современный структурный вид области (Цзинь, 2006). Разломы являются одной из основных сил, формирующих структурный вид впадины Цзиян. Результаты сейсмической интерпретации показывают, что в юго-восточной части впадины существует множество разломов, пронизывающих отложения ярусов Кондянь и нижнего Шахэдие-4, разделенных на три группы: северо-западные, северо-восточные и субширотные. Разлом Ченнань – это основной разлом, контролирующий бассейн; разлом Линнань, Биннан, Гаоцин-Пиннань, Шицун и Босин - второстепенные разломы, которые достигают фундамента и разделяют впадины и поднятия в пределах бассейна; разлом Чунбэй и другие 16 третьестепенных разломов влияют на развитие местных тектонических поясов (таб. 1); кроме того, около 200 маленьких разломов секвенируют комплекс Кондянь - нижняя часть Шахэдие-4.

1) Основной разлом, контролирующей юго-восточную часть впадины Цзиян.

Разлом Ченнань (рис. 7) является основным разломом на юго-востоке впадины. Он разделяется на восточную часть с северо-западно-западным направлением и западную часть с северо-восток-восточным направлением. Восточная часть унаследована от мезозойской системы разломов. Западная часть начала проявлять активность в начале кайнозоя. Ченнанский разлом имеет длину около 56 км с востока на запад и около 7 км в ширину с севера на юг. Его площадь составляет 365 км². Углы падения поверхности 33-66°, по форме сечения разлом является листрическим. В веке Кондянь активность западной части была ниже, чем восточной. В начале периода накопления Шахэдие-4 активность западной части возросла, вблизи разломов образовались подводные конусы выноса. Во время накопления Шахэдие-4-2 скорость разломной активности все еще была высокой, а в четвертичную эпоху снижалась и исчезла.

2) Второстепенные разломы, достигающие фундамента

А. Разлом Шицун

Тектоническая активность Шицунского разлома оказывает важное влияние на формирование и эволюцию южного пологого склона. Общее простирание Шицунского

разлома северо-западное, направление падения юго-западное, углы падения поверхности 30-45°. Форма разреза лопатовидная, весь разлом распространяется относительно полого. Его общая протяженность составляет около 43,2 км. Большое влияние на формирование и эволюцию структуры грабена Сунхуа оказывает разветвление северного сегмента разлома.

Шицунский разлом был активен с мезозоя, и средняя скорость его активности в период осадконакопления базальных красноцветных отложений составляет около 12 м/млн.лет, затем скорость разломной активности постепенно снижалась, движения полностью прекратились в конце неогена.

Б. Гаоцин-Пиннань

Разлом Гаоцин-Пиннань расположен на северо-западной части района исследования. Его длина составляет около 60 км, это многолетний унаследованный разлом фундамента на западе района Босин, который контролирует формирование и эволюцию поднятия Цинчэн. Во время отложения базальных красноцветных отложений разлом Гаоцин-Пиннань всегда был активен, но в разной степени и в различных местах. Он контролировал отложение базальных красноцветов. Свиты Кондянь и нижняя часть Шахэди-4 отлагались на выступах разломов Гаоцин-Пиннань.

В. Разлом Бинань

Разлом Бинань расположен в юго-восточной части поднятия Бинсян. Направление падения разлома юго-юго-восточные, углы падения поверхности 35-45°, форма лопатообразная. Общее простирание разлома северо-восточное, протяженность около 40 км. Разлом Бинань уже был активен в период осадконакопления базальных красноцветных отложений, и скорость его активности составляла около 40 м/млн.лет, активность разлома прекратилась во время века Дунин.

Г. Разлом Босин

Активность разлома Босин началась в период осадконакопления красноцветных отложений со скоростью около 15 м/млн лет, что свидетельствует о синседиментационном разломе. Форма сечения пластинчатая. В период образования свиты Кондянь интенсивность разломной деятельности была высокой, а затем скорость разломной активности уменьшилась и полностью прекратилась в неогене.

Таблица 1

Основные разломы и их характеристики в базальных отложениях юго-восточной части впадины Цзиян

Тип разлом	Наименование разлом		Протяженность (км)	Простираение	Направление падения	Углы падения поверхности(°)	Форма сечения
Основной разлом, контролирующий впадину	Ченнан	Запад	56	СВВ	ЮЮВ	10-20	Листрический
		Восток	41,8	СЗЗ	ЮЮЗ	33-66	Листрический
Второстепенные разломы, уходящие в фундамент	Шицун		43,2	СЗ	ЮЗ	30-45	Листрический
	Бинань		40	СВВ	ЮЮВ	35-45	Листрический
	Гаоцин		32	ССВ	ЮВВ	30-60	Листрический
	Пиннань		20	СВ	ЮВ	40-60	Листрический
	Босин		24,4	СВВ	ССЗ	40-60	Блочный
	Линнань		30	СВВ	ЮЮВ	30-50	Листрический/ плоская

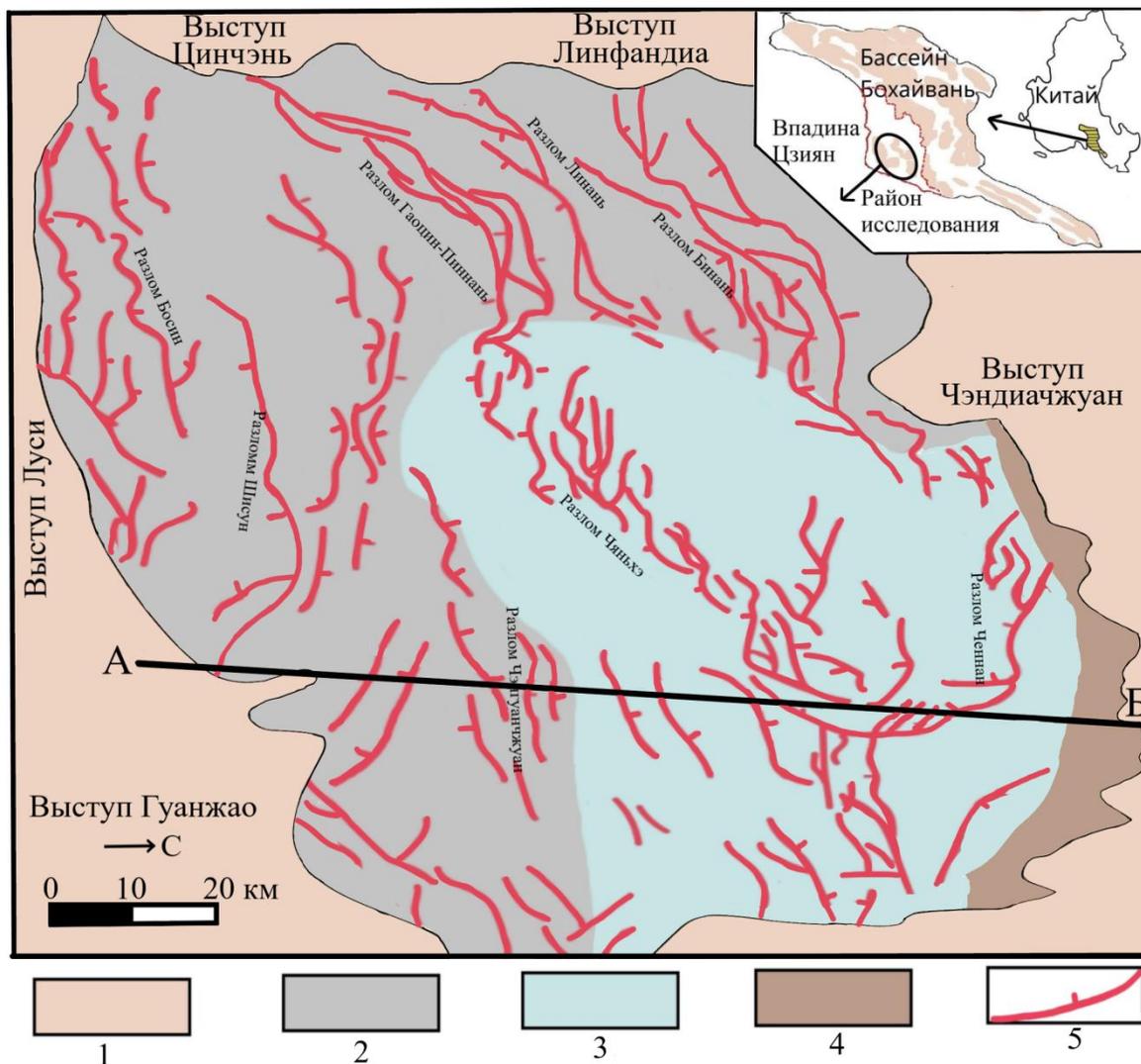


Рисунок 6. Схема тектонического строения юго-восточной части впадины Цзиян
(У. Сао, 2013, с дополнениями и изменениями)

Условные обозначения: 1 – выступ; 2 – пологий склон; 3 – депрессия; 4 – крутой склон;
5 – тектонические нарушения

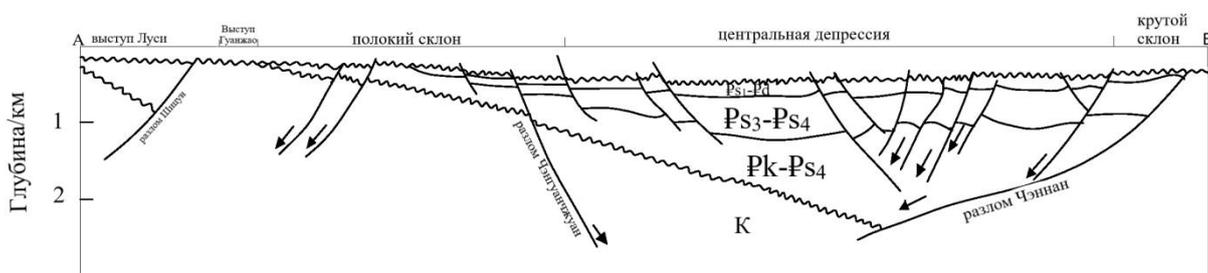


Рисунок 7. Геологический разрез юго-восточной части впадины Цзиян с Ю на С
(У. Сао, 2013)

Д. Разлом Линнань

Разлом Линнань расположен на востоке структуры Линфаньцзя и является краевым разломом Лизеженского подпрогиба. Простирается северо-восток-восточное. Общая протяженность разлома Линнань составляет около 30 км, а форма разреза в основном лопатообразная или плоская. Кровля свиты Кондянь в подошве Линнаньского разлома срезана, а мощность свиты значительно больше, чем в висячем крыле, что указывает на то, что разлом образовался после накопления отложений Кондянь и нижней части Шахэдие-4 (Yuan, 2006).

На основании вышеприведенного анализа нетрудно обнаружить, что система нарушений, контролирующая бассейн во время образования отложений ярусов Кондянь и нижнего Шахэдие-4, представляет собой трансформированное наследие ранее существовавших мезозойских разломов северо-западного простирания. Кайнозойские разломы северо-восточно-восточного простирания контролировали образование структурных единиц в бассейне. Под воздействием системы разломов до и во время накопления базальных красноцветных отложений образовались основные системы управления бассейном, после этого изменения тектонических движений в основном сокращали и реформировали первые две системы.

Поверхности несогласия

Зона пологого склона расположена на южной окраине впадины Цзиян, и тектоническая активность здесь была выражена более явно, что вызвало множественные перерывы в осадконакоплении и развитие денудационных несогласий (Dong и др., 2017). Палеогеновые отложения откладывались в бассейне после движения Яньшань, между мезозоем и кайнозоем наблюдается региональное несогласие. На поздней стадии область была приподнята в результате гималайского движения, что привело к крупномасштабной денудации. Последующее общее опускание способствовало отложению неогеновых толщ, встречаются региональные несогласия на границе миоцена и олигоцена (см. рис. 3). Региональные тектонические движения в палеогене сформировали большое количество локальных несогласий. Базальные красноцветные отложения, изученные в этой работе, в основном относятся к нижнему эоцену, а именно к ярусам Кондянь и нижней части

Шахэдие-4, в которых есть две поверхности несогласия: поверхность несогласия между кайнозойскими и мезозойскими отложениями и поверхность несогласия между нижней и верхней частью Шахэдие-4 (см. рис. 4).

1) Мезозой - кайнозойское несогласие.

Данная поверхность несогласия представляет собой региональное угловое несогласие, отложения ниже поверхности несогласия в основном мезозойские, палеозойские отложения можно увидеть на некоторых участках окраины впадины (Jiang и др., 2011). Верхнепалеогеновые толщи залегают на поверхности несогласия в трансгрессивном виде. Данное несогласие свидетельствует о начале нового рифтового этапа в эволюции бассейна. Поверхность углового несогласия распространена по всей впадине, в пределах склонового пояса имеет большой угол наклона. В зоне поднятий палеогеновые толщи залегают на погребенной горе.

Район исследования испытал длительное выветривание докайнозойских отложений, что благоприятно для формирования кор выветривания. Многолетнее выветривание сделало поверхность несогласия между палеозойскими и кайнозойскими отложениями неравномерным, подстилающими породами могут являться верхнепалеозойские, мезозойские обломочные породы, магматические породы, архейские гнейсы и нижнепалеозойские карбонатные породы. Гнейсы и карбонатные породы в основном развиты на структурных поднятиях, а переслаивание песчаников и глинистых пород часто развито в депрессионных областях.

Свиты Кондянь и нижняя часть Шахэдие-4, несогласно залегающие на подстилающих разновострастных породах в основном представлены песчаниками, аргиллитами и конгломератами. Слой выветрелых аргиллитов и непроницаемых пород, образовавшийся на поверхности несогласия, могут являться хорошими флюидоупорами для резервуаров нефти и газа. Проницаемый выветрившийся слой может быть связан с другими проницаемыми осадочными породами и использоваться в качестве миграционных каналов (Сао и др., 2022).

2) Несогласие между нижней и верхней частями Шахэдие-4.

В период отложения нижней части Шахэдие-4 во впадине Цзиян климат был аридным, в центральной части впадины образовалось большое количество гипсово-

солевых отложений, отложения на периферии впадины находились над поверхностью воды и были разрушены (Jing, 2005). Во второй половине Шахэдие-4 произошло образование мощной толщи пород, во впадине в целом преобладали озерные обстановки. На большинстве участков депрессионно-склоновой зоны верхняя и нижняя толщи находятся в параллельном несогласном контакте, а на краю впадины можно увидеть денудационное несогласие.

2.3 Нефтегазоносность

Сложное тектоническое строение и наличие большого количество резервуаров и нескольких интервалов материнских пород в юго-восточной части впадины Цзиян способствовали формированию множества типов залежей. Впадина Цзиян представляет собой нефтегазоносный бассейн, в котором преобладает кайнозойская нижнетретичная генерация нефти. Коллекторские толщи в основном приурочены к отложениям ярусов Кондянь, Шахэдие и Дунин. Нефтематеринские породы в основном распространены в отложениях Кондянь-2, верхней части Шахэдие-4 и Шахэдие-2 (Cheng и др., 2004). Нефтематеринские породы, распространенные в Кондянь-2, в основном представляют собой гипсоносные глинистые породы с высоким содержанием органического вещества и высокой степенью зрелости, их распространение локально. Верхняя часть Шахэдие-4 и Шахэдие-2 сложены глинистыми породами и горючими сланцами, эти отложения характеризуются широкой областью распространения (Li и др., 2017). Породы-коллекторы в основном представлены обломочными породами и карбонатами. В пределах области исследований также присутствуют две группы региональных флюидоупоров: темные озерные и пойменные глинистые породы в Шахэдие-1, характеризующиеся большой мощностью, равномерным распространением, сплошностью и хорошей герметизацией. В верхних частях Шахэдие-4 и Шахэдие-3 в основном развиты локальные тектонические покрышки (Li и др., 2013).

Многочисленные тектонические процессы обусловили сложное геологическое строение впадины Цзиян, что привело к формированию разнообразных типов залежей нефти и газа. На юго-востоке впадины Цзиян преобладают структурные, тектонические и литологические ловушки, стратиграфические ловушки также присутствуют, но в

небольшом количестве.

Залежи в основном представляют собой антиклинальные и тектонически-экранированные. Например, нефтегазовое месторождение Гудао масштабом 3.9×10^8 т образовано в антиклинали Гудао, а доказанные запасы залежей, приуроченных к центральной зоне разлома Дунин, составляют 3×10^8 т тонны (Lv и др., 2008). Залежи, приуроченные к литологическим ловушкам, в основном наблюдаются обычно в выклинивающихся песчаных, а также в вулканогенно-осадочных толщах, развитых в районах с сильной третичной вулканической активностью, таких как Юхуанмяо, Луоцзя, Биннань и других (Li и др., 2016). В целом, в пределах юго-восточной части впадины Цзиян преобладают тектонически-экранированные, затем литологические и, наконец, стратиграфически-экранированные залежи углеводородов (Zhang и др., 2003).

Углеводороды, образованные свитами Шахэдие-3 и 4, могут мигрировать в пределах этих толщ или же в вышележащие пласты. Доказанные запасы нефти и газа толщ Шахэдие-2 и 3 около 8×10^8 т. (Song и др., 2021). Благодаря непрерывным углубленным исследованиям в последние годы, большие запасы нефти и газа также были обнаружены в отложениях свит Шахэдие-4 и Кондянь-1, которые являются значимыми нефтегазоносными толщами с доказанными запасами 3×10^8 т. (Luo и др., 2020). Основными генерирующими углеводороды толщами являются нижележащие отложения свиты Кондянь-2 и вышележащие толщи верхней части Шахэдие-4.

2.4 История геологического развития

2.4.1 История геологического развития Бассейн Бохайвань

От протерозоя до кайнозоя бассейн Бохайвань пережил три геологических исторических этапа: формирование домезозойского фундамента платформы, формирование мезозойской рифтовой структуры, период кайнозойского прогибания (Chen и др., 2003).

1) Период формирования домезозойского фундамента платформы

В среднем и позднем протерозое вдоль южной окраины Внутренней Монголии и южного борта Чжанцзякоу, где сформировались отложения с преобладанием карбонатов мощностью 9400 м, образовалась зона опускания северо-северо-восточного простирания,

называемая геосинклиналь Яньшань.

В раннем палеозое Северо-Китайская платформа воздымалась, уже в раннем кембрии произошло погружение, которое продолжалось вплоть до середины ордовика. Карбонаты мощностью 1000-1500 м отлагались в мелководных морях юга Внутренней Монголии и восточного Шаньдунского древнего континента с небольшим количеством глинистых пород и гипсов.

К концу ордовика каледонское движение вызвало поднятие Северо-Китайской платформы, что привело к длительному выветриванию и денудации. В пермское время чередование континентальных и морских условий привело к образованию толщи переслаивания общей мощностью 300-1500 м, содержащей угольные пласты (Нои и др., 2010).

2) Период формирования мезозойской рифтовой структуры

Герцинское движение в перми вновь вызвало поднятие Северо-Китайской платформы, образовав большое количество горных областей, а в результате индосинского движения было образовано большое количество складок, антиклиналей и синклиналей, крупных разломов вокруг и внутри бассейна, произошло формирование прототипа бассейна Бохайвань (Нои и др., 2001).

3) Период кайнозойского прогибания

В течение кайнозойского периода в бассейне было несколько фаз рифтогенеза и прогибания. Первая фаза сопровождалась накоплением свиты Кондянь в эоцене: в процессе рифтогенеза была сформирована серия разломов северо-восточного и северо-западного простирания, в бассейне отлагались обломочные породы, вулканиты, глинистые породы и гипсы. Вторая фаза ознаменовала период осадконакопления Шахэдие-3 и -4. В связи с многократными возобновлениями рифтогенной деятельности количество депрессий увеличивалось, они соединялись между собой, области распространения отложений расширялись. Из-за сильного растяжения под действием главных разломов, произошла крупномасштабная трансгрессия, сформировавшая крупную глубокую озерную котловину, в пределах которой отлагались глубоководные фации темных глинистых пород. Третий этап рифтогенеза начался в период накопления отложений ярусов Шахэдие-2, -3 и Дунин, произошла еще одна крупномасштабная трансгрессия,

сформировалась современная тектоническая структура бассейна Бохайвань (Guo и др., 2006).

2.4.2 Процесс структурной эволюции юго-восточной части впадины Цзиян

Впадина Цзиян является важным компонентом группы разломных бассейнов. Поскольку юго-восточная часть впадины близка к зоне разлома Танлу, трансформация сдвигового режима оказывает важное влияние на структуру бассейна. Процесс формирования и развития юго-восточной части впадины Цзиян делится на два этапа: рифтинг и синеклизный этап (Ye и др., 2006).

Период рифтинга

Впадина Цзиян выдержала влияние яньшаньских, каледонских, герцинских, индосинских и других тектонических движений. Во время индосинского движения возникли палеозойские складчатые структуры, образовавшие серию надвиговых структурных поясов северо-западного простирания.

Во время Яньшаньского движения, из-за левостороннего сдвигового перемещения зоны разлома Танлу, реверсивное движение структуры северо-северо-западного простирания усилилось, образуя серию мезозойских полуграбеновых бассейнов с северо-западным простиранием и в то же время формируя разломы с С-Ю простиранием (Gao, 2011).

Юрско-меловой период был начальным периодом формирования разломов, в котором область исследований испытала значительные преобразования структурного плана под влиянием чередования отрицательных и положительных инверсий, характеризовавшихся сильной разломной активностью, извержением магмы и быстрым отложением толщ заполнения. Сильная тектоническая активность второго и третьего эпизодов движения Яншань и отрицательная инверсия разломов заложили прототипную форму юго-восточной части впадины Цзиян, создав условия для развития крупномасштабной разломной впадины в раннем третичном периоде. Юго-восточной части впадины Цзиян в значительной степени унаследовала тектоническую структуру Яньшань (Wu и др., 2004).

Период рифтинга является основным этапом развития района исследования, он характеризовался непрерывной активностью первичных и вторичных основных разломов,

непрерывным погружением основной части бассейна, глубоководными обстановками осадконакопления и внедрением многочисленных интрузий. Его можно разделить на четыре эпохальных периода, соответствующих ярусам Кондянь, Шахэдие-4, Шахэдие-3-2, Шахэдие-1 и Дунин. После каждого периода расширения в бассейне происходил короткий период регионального подъема, в результате чего часть осадочных толщ обнажалась. Центр погружения постепенно перемещается с юга на север. Период рифтинга является наиболее важным периодом для формирования нефтематеринских пород (НМП), коллекторов и флюидоупоров.

1) Начальный этап рифтинга.

Во время накопления свиты Кондянь бассейн Бохайвань находился в переходной стадии от Яньшаньских тектонических движений к Гималайским. В течение периода Кондянь бассейн Бохайвань унаследовал характеристики мезозойского тектонического поля напряжений, проявившегося в том, погружением Тихоокеанской плиты под Евразийскую с северо-западного направления, были вызваны левосторонние сдвиговые перемещения в зоне разлома Танлу. Юго-восточная часть впадины Цзиян простиралась с северо-востока на юго-запад. Произошло формирование большого количества разломов с северо-северо-западными или северо-западными простираниями. Центр прогибания сместился с юга на север и площадь распространения осадков увеличилась.

2) Период развития рифтинга.

В осадочный период Шахэдие-4, после тектонических преобразований в начальной стадии рифтинга, индийская плита начала погружаться в северном направлении, весь бассейн был затронут правосторонним сдвиговым перемещением в результате активизации разлома Танлу, образуя серию систем разломов северо-восточно-восточного простирания. По сравнению с периодом Кондянь, отложения характеризовались наложенным контролем разломов с северо-западным и северо-восточным простиранием, активность расширения разломов с северо-западным простиранием была еще более ослаблена. Юго-восточная часть впадины контролировалась разломом северо-западного простирания и была разделена на две большие осадочные области разломом Шицун-Пинган. В районе исследования может быть много разломов с северо-западным простиранием, которые прекратили активность в этот период или ранее. Разлом северо-

восточного простираения стал основным контролирующим. Максимальная мощность отложений, сформированных в этот период, составляет более 1500 м (Yuan и др., 2006).

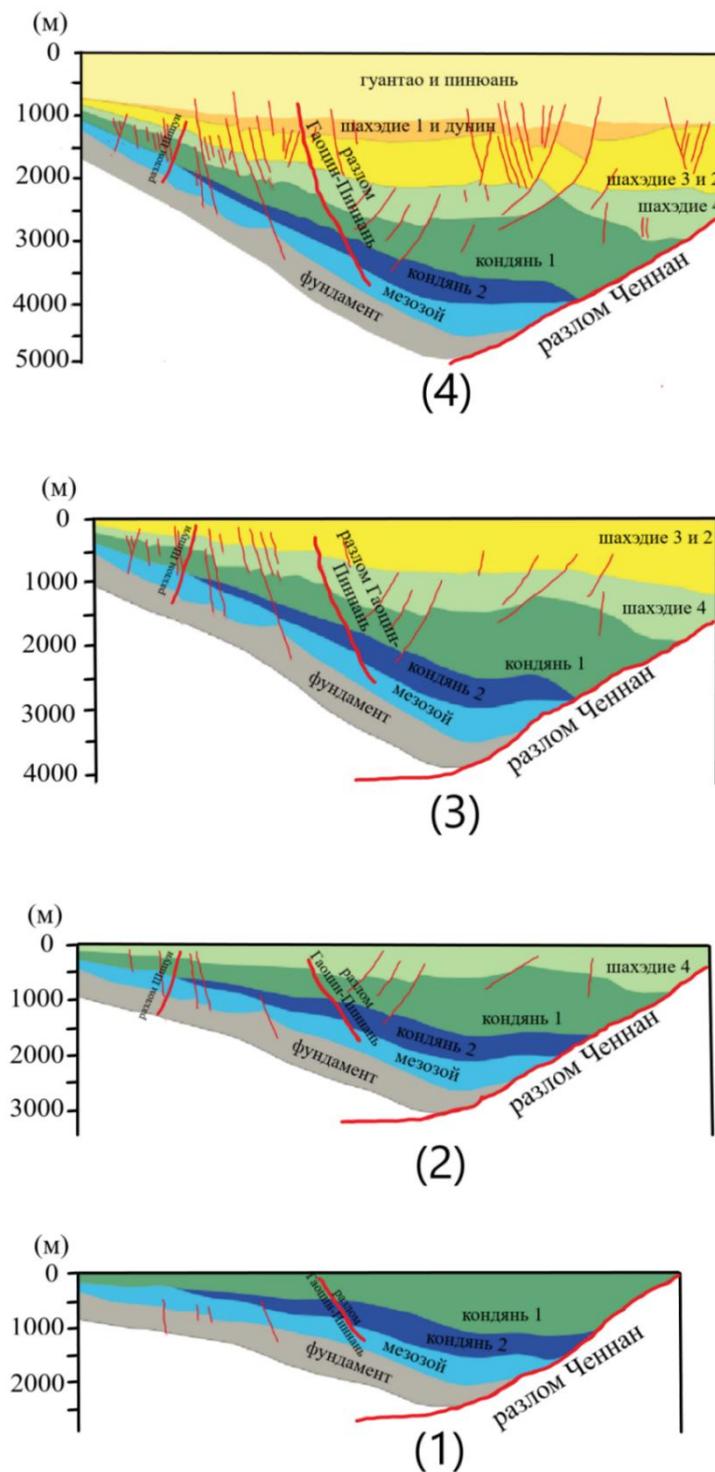


Рисунок 8. Профиль кайнозойской тектонической эволюции в юго-восточной части впадины Цзиян: 1) до формирования Шахэдие-4; 2) до формирования Шахэдие-3 и 2; 3) до формирования Шахэдие-1 и Дунинь; 4) в настоящее время (X. Yuan, 2013)

3) Период максимальной активности рифтинга.

Во время накопления Шахэдие-3 и -2 образовалось большое количество разломов северо-восточного простирания и несколько разломов северо-западного или субширотного простирания. Из анализа шкалы и свойств активности разломов, предполагается, что их возникновение и развитие зависят от скручивающей активности разломов северо-восточного тренда. Наклонная деятельность разлома северо-восточного простирания в районе исследования привела к пластическому выгибанию вверх гипсово-солевого пласта в нижней части Шахэдие-4. В течение этого периода активность разломов была очень высокой, и разломы разного масштаба, разных направлений и разных свойств были активны одновременно, что указывает на разностороннее растяжение и прогибание.

4) Период затухания рифтинга.

В период формирования отложений верхней части Шахэдие-2 – Дунин произошло затухание активности большей части разлома Шицун, с сохранением слабой активности в юго-восточной части; те же тенденции предполагаются для разлома Ченнань. Устойчивое развитие получили нарушения северо-восточного простирания. На более поздних стадиях развития районе исследования, а также во время образования толщ яруса Гуантао и Минхуачжэнь, трещины и магматическая деятельность были значительно ослаблены, в бассейне установились преимущественно мелководные обстановки осадконакопления (Ni и др., 2011).

Синеклизный этап

Синеклизный этап является более поздней стадией развития района исследования. Разломная активность и магматическая деятельность явно ослаблены. Общее погружение бассейна характеризуется в основном мелководными отложениями. На ранней стадии формирования формации Гуантао активность разломов северо-восточно-восточного простирания была значительной, в то же время разломная активность северо-северо-западного простирания была слабой. Поднятие Гуанжао еще не было погребено, на склонах холмов были развиты небольшие пролювиальные конусы выноса. Из-за влияния палеотопографических колебаний перед отложением свиты Гуантао и деятельности

современных разломов мощность толщи местами сильно варьирует, но в целом толща постепенно утолщается с юга на север.

Активность разломов еще больше ослабла с конца отложения Гуантао до четвертичного периода, на юге она вообще исчезает к верхней части свиты Гуантао, на севере прекращают активность разломы в верхней части свиты Минхуачжэнь. В этот период было сформировано большое количество крупноплощадных и малоамплитудных взбросовых, носовых и блоковых структур, появилось множество мелких разломов в результате силы тяжести, в этот период также окончательно сформировались различные типы ловушек, заложившиеся на более ранних стадиях (рис. 8).

Глава 3. Литологическая характеристика пород

Анализ кернового материала, полученного в результате бурения за последние годы, показал, что в юго-восточной части впадины Цзиян развиты различные типы пород базальных красноцветных отложений в интервале от нижней части Шахэдие-4 до Кондянь-1 (ранний эоцен), такие как терригенные грубообломочные обломочные породы, песчаники, алевролиты, глинистые породы и эвапориты, кроме того, в краевой части впадины развиты базальты и диабазы. Среди них наиболее часто встречающимися являются терригенные обломочные породы.

3.1 Терригенные грубообломочные, песчаные и алевритовые породы

В процессе эволюции палеогенового бассейна Бохайвань, в юго-восточной части впадины Цзиян сформировались терригенные обломочные породы различного генезиса. Во время образования отложений интервала от Кондянь-1 до нижней части Шахэдие-4 (ранний эоцен) в области исследований господствовал аридный климат, что способствовало широкому распространению красноцветных отложений. По размерности зерен, данные отложения можно разделить на конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты и смешанные, промежуточные типы.

Конгломераты и гравелиты распространены в краевой части впадины, в основном это мелкие галечники. В составе конгломератов и гравелитов преобладают угловатые и окатанные обломки, которые в основном представлены известняками, доломитами, метаморфическими и магматическими породами, окраска преимущественно коричневатокрасная. Цемент в основном представлен глинистым материалом, встречаются базальный, поровый и контактный типы цементов, наиболее распространенным является базальный. Толщина одного слоя обычно от 1-2 до 5 м.

Конгломераты и гравелиты в районе исследования в основном являются пролювиальными и оползневыми отложениями, обломки плохосортированы, сцементированы глинистым и алевритовым материалом (рис. 9).

Размер зерен гравелитов изменяется в пределах 1-10 мм, в среднем 2 мм, контакты обычно точечные и линейные. В гравелитах преобладает массивная ритмичная слоистость с плохой сортировкой, низкой минеральной зрелостью и видимыми поверхностями

размытия.

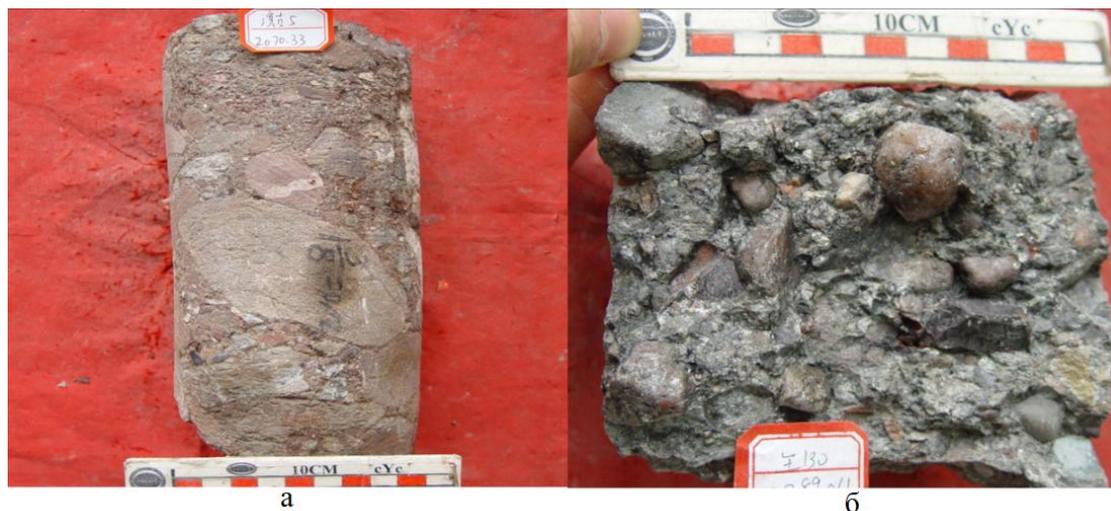


Рисунок 9. а) Массивный гравелит, скв.Бинзу-5, $R_{ш}$, глубина: 2070,33 м; б) Массивный гравелит, скв.Ван-130, R_k , глубина: 2289,04 м

Конгломераты и гравелиты в районе исследования характеризуются плохой сортировкой и высоким содержанием цемента, что не способствует сопротивлению уплотнению и реконструкции на этапах диагенеза и катагенеза, в связи с чем коллекторские свойства данных отложений не очень хорошие.

Песчаники преобладают в разрезах нижнеэоценовых отложений, выделяемых в составе свит Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4, и широко распространены в районе исследования. Размерность кластического материала в песчаниках, окрашенных в красный, коричнево-красный, пурпурно-красный, пестрый, серый и серо-коричневый цвета, варьирует от 0,1 до 2 мм (максимально 4 мм). Большая часть зерен и обломков имеют окатанную, слегка вытянутую и угловатую форму. В составе песчаных пород преобладают кварц и полевые шпаты, хотя в некоторых горизонтах и пачках значительная роль принадлежит обломкам пород.

Как указывалось выше, преобладающим типом песчаников юго-восточной части впадины Цзиян, отложенных в течение интервала времени Кондянь-1 - нижняя часть Шахэдие-4, являются аркозы, за которыми следуют кварц-полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые граувакки. Проведенные нами исследования показали, что песчаники в базальных отложениях нижнего эоцена отличаются более высоким

содержанием кварца и низким обломков пород (рис. 10). Содержание зерен кварца варьирует от 10,1 до 61,7% (среднее 45,1%), тогда как количество полевых шпатов меняется в пределах 12,7-46,9% (среднее 35,7%), а обломков пород – от 1,2 до 68,3% (среднее 19,2%). Обломки пород в основном представлены метаморфическими образованиями, за которыми следуют магматические, карбонатные и другие породы.

В таблице 2 показано, что состав песчаников изучаемых толщ довольно различен:

Нижняя часть Шахэдие-4. Песчаники в основном представлены граувакковыми аркозами, за которыми следуют кварц-полевошпатовые и полевошпатово-кварцевые граувакки. Содержание кварца варьирует от 10,1 до 59,2% (среднее 24,8%), содержание полевых шпатов меняется в пределах 12,7-38,9% (среднее 30,5%), обломки пород составляют от 8,1 до 68,3% (среднее 44,7%), обломки в основном представлены метаморфическими породами, в меньшей степени – осадочными, редко – магматическими, встречаются слюдистые включения. Значения минералогической зрелости низкие – порядка 0,11-1,04 (среднее 0,42%).

Верхняя часть Кондянь-1. Песчаники в основном аркозовые, присутствует небольшое количество кварц-полевошпатовых граувакк. Содержание кварца варьирует от 37,1 до 60,2% (среднее 50,2%), содержание полевых шпатов меняется в пределах 24,8-38,3% (среднее 32,7%), обломки пород составляют от 1,2 до 32,0% (среднее 17,1%). Обломки преимущественно метаморфические, за ними по частоте встречаемости следуют обломки осадочных и магматических пород. Минералогическая зрелость песчаников высокая – 0,66-3,55 (среднее 1,52)

Средняя часть Кондянь-1. Песчаники в основном аркозовые, другие минералы встречаются редко. Содержание кварца от 36,1 до 61,7% (среднее 49,2%), содержание полевых шпатов – 13,7-46,2% (среднее 32,5%), обломки пород составляют от 2,1-27,2% (среднее 18,3%), обломки пород представлены в основном магматическими и метаморфическими породами с небольшим количеством осадочных. Толщи с высоким содержанием магматических пород распределены зонально. Степень зрелости меньше, чем у песчаников верхней части Кондянь-1 – 0,54-2,3 (среднее 1,27).

Нижняя часть Кондянь-1. Песчаники в основном аркозовые, других примесей очень мало. Содержание кварца изменяется от 25,0 до 58,6% (среднее 43,2%), содержание

полевых шпатов меняется в пределах 12,7-46,9% (среднее 36,7%), обломки пород составляют 8,8-47,2% (среднее 20,1%), обломки пород преимущественно метаморфические, реже встречаются осадочные и магматические. Минералогическая зрелость песчаников также хуже, чем в верхней части Кондянь-1 и составляет порядка 0,33-1,82 (среднее 0,96).

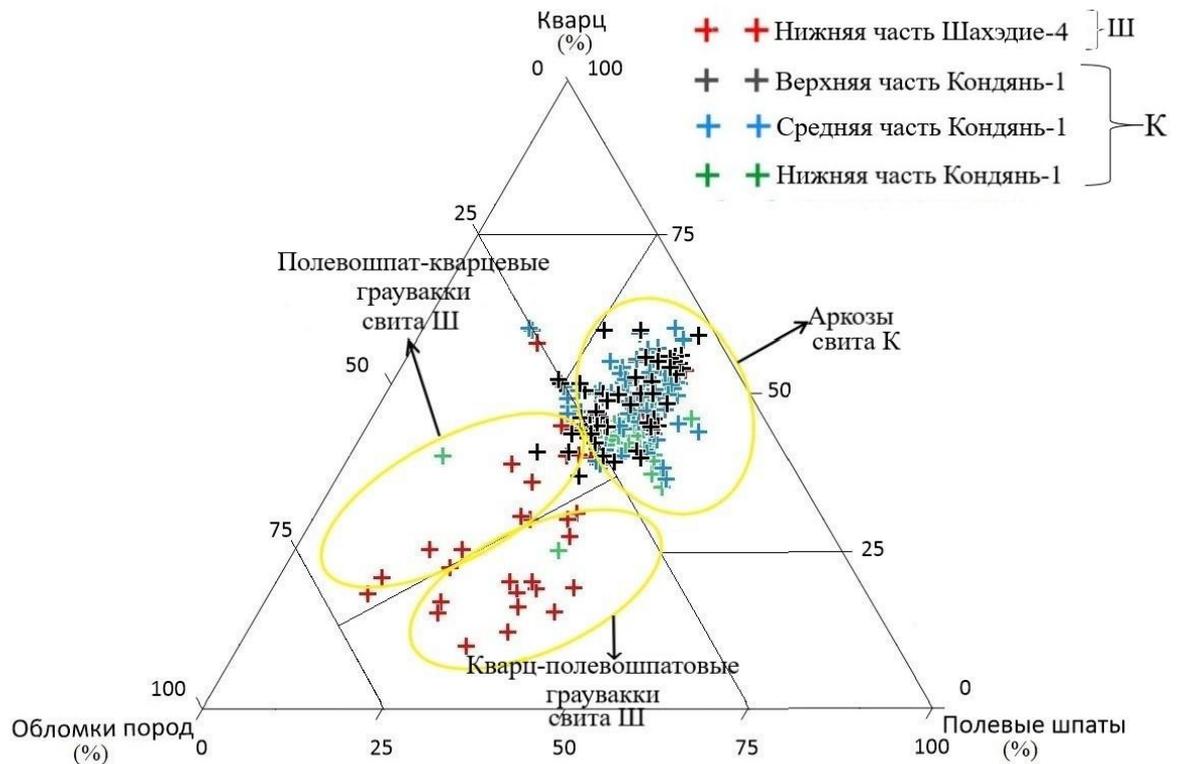


Рис. 10. Состав песчаников базальных отложений Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (по Шванову, 1987)

Контакты зерен песчаников обычно точечные, точечно-линейные, линейно-выпукло-вогнутые (рис. 11). На основании описания 200 шлифов установлено, что контактные отношения зерен песчаников в районе исследования преимущественно линейные, а точечные и вогнуто-выпуклые контакты распределены на небольшой площади, иллюстрируя уплотнение от умеренного до сильного (Niu и др., 2014). Отложения яруса Кондянь находятся на больших глубинах залегания, в связи с чем породы очевидно более уплотнены и в образцах этой толщи наблюдаются сутурные контакты.

Таблица 2

Состав песчаников отложений эпох Кондьянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4

Толщи	Кварц		Полевые шпаты		Обломки пород		Степень минералогической зрелости	
	Диапазон распределения (%)	Средняя величина (%)	Диапазон распределения (%)	Средняя величина (%)	Диапазон распределения (%)	Средняя величина (%)	Диапазон распределения (%)	Средняя величина (%)
Нижняя часть Шахэдие-4	10,1-59,2	24,8	12,7-38,9	30,5	8,1-68,3	44,7	0,11-1,04	0,42
Верхняя часть Кондьянь-1	37,1-60,2	50,2	24,8-38,3	32,7	1,2-32,0	17,1	0,66-3,55	1,52
Средняя часть Кондьянь-1	36,1-61,7	49,2	13,7-46,2	32,5	2,1-27,2	18,3	0,54-2,3	1,27
Нижняя часть Кондьянь-1	25,0-58,6	43,2	12,7-46,9	36,7	8,8-47,2	20,1	0,33-1,82	0,96
Кондьянь-1- Нижняя часть Шахэдие-4	10,1-61,7	45,1	12,7-46,9	35,7	1,2-68,3	19,2	0,11-3,55	1,29

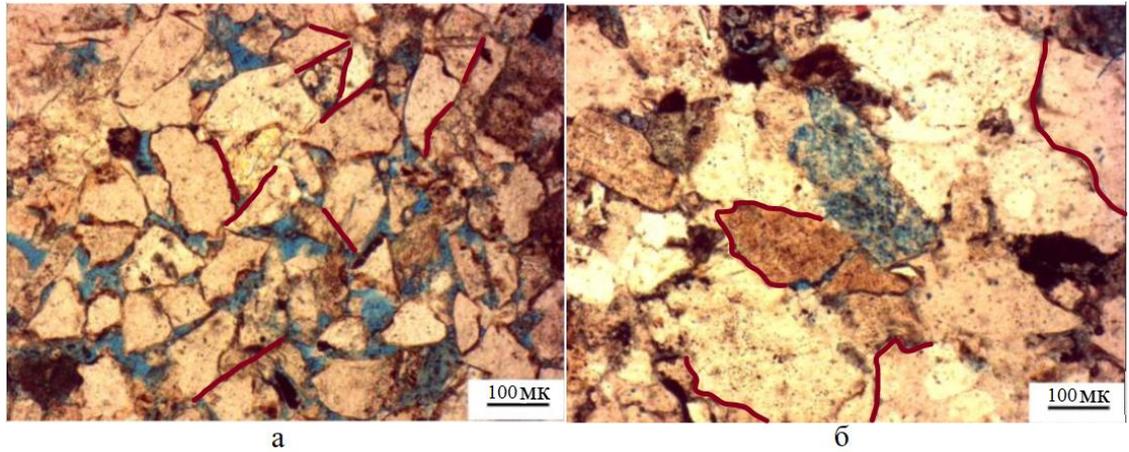


Рисунок 11. Контактные отношения зерен песчаников: а) линейные контакты, скв. Гуан-120, P_k , глубина: 2745,79 м, увеличение: 100; б) линейно-выпукло-вогнутые контакты, скв. Хао-1, P_k , глубина: 4057,6 м, увеличение: 100

При исследовании песчаников были встречены разные по составу типы цементов. Наиболее широко распространены карбонатные цементы, образовавшиеся на ранних этапах превращения осадка в породу. Среди других следует упомянуть кремнистый, пиритовый, гипсовый, ангидритовый и скрытокристаллический гематитовый цементы.

Карбонатные цементы представлены такими минералами, как кальцит, феррокальцит, доломит и анкерит (рис. 12). Кальцит является наиболее распространенным минералом, цементирующим поровое пространство песчаных пород, его содержание меняется в широких пределах от 0,5 до 28% (в среднем 8,2%). Широко представлен и доломитовый цемент. С увеличением глубины залегания содержание кальцитового цемента постепенно снижается. Концентрации феррокальцита, доломита и анкерита варьируют в более узком диапазоне значений: 0,5-19% (в среднем 6%), от 0,5 до 17% (в среднем 6,4%) и 0,3-12% (в среднем 7,5%), соответственно (рис. 13).

Кремнистый цемент проявляется в виде регенерации кварца и полевых шпатов. Нарастание кварца в песчаниках области исследований относительно широко развито, в некоторых случаях в два и даже в три этапа. Содержание аутигенного кварца варьирует от 0,1% до 6%, в среднем 1,5%. Цементы, в составе которых преобладает скрытокристаллический гематит – основная причина, по которой отложения приобретают красный цвет. Скрытокристаллический гематит часто встречается в красных песчаниках и

аргиллитах. Гипсовые и ангидридовые цементы также распространены в красноцветных отложениях юго-восточной части впадины Цзиян (см. рис. 12). В эпоху раннего эоцена климат был аридными, и процесс катагенеза вызывал обезвоживание гипсоносных толщ, что привело к образованию не только гипсового, но и ангидритового цемента, который встречается в довольно большом количестве. Общее содержание цемента в песчаных породах уменьшается по мере увеличения глубины залегания.

В песчаниках также встречаются метасоматические превращения, которые преимущественно проявляются, как метасоматоз карбонатных минералов на других зернах обломков и других цементах: кальцит и доломит заменяют кварц и полевой шпат; феррокальцит и анкерит заменяют регенерационный кварц и кварцевые зерна; встречается метасоматоз между карбонатами.

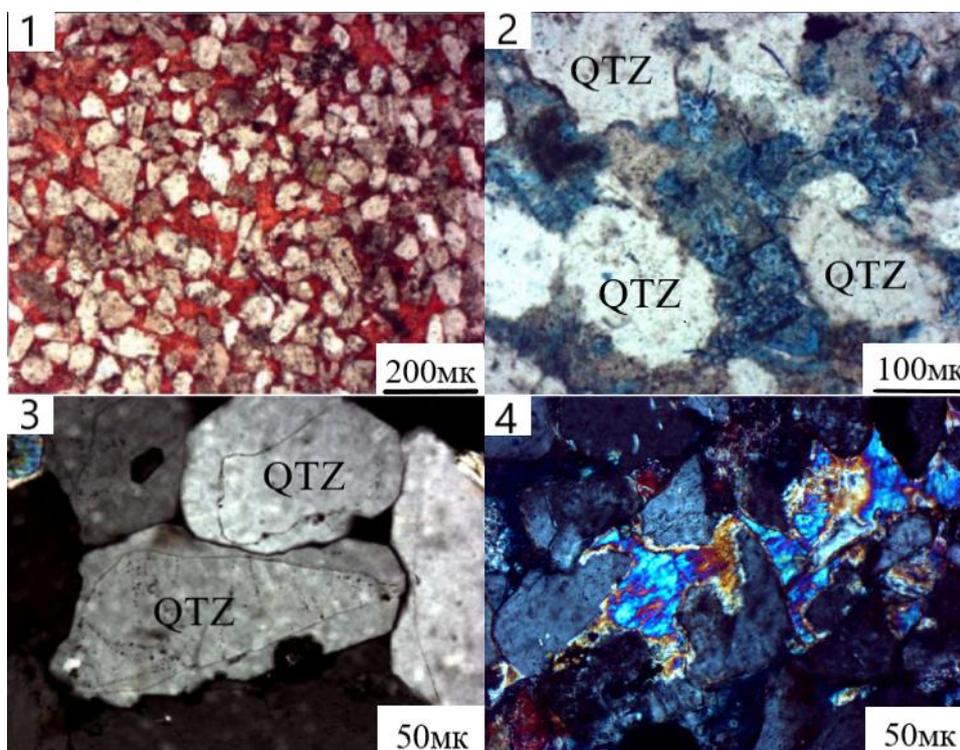


Рисунок 12. Различные виды цементов в песчаниках: 1) базальный кальцитовый цемент, скв.Ван-130, P_k , глубина: 1900,35 м, увеличение:50; 2) анкеритовый цемент, скв.Лян-902, P_k , глубина: 2291,64 м, увеличение:100; 3) регенерация кварца, скв.Ван-46, P_k , глубина: 3170,65 м, увеличение: 200; 4) ангидридовый цемент, скв.фэн-1, $P_{ш}$, глубина: 2945,79 м, увеличение: 200 (QTZ-кварц)

либо при растворении отдельных минеральных компонентов породы в процессе катагенеза (Song, 2005).

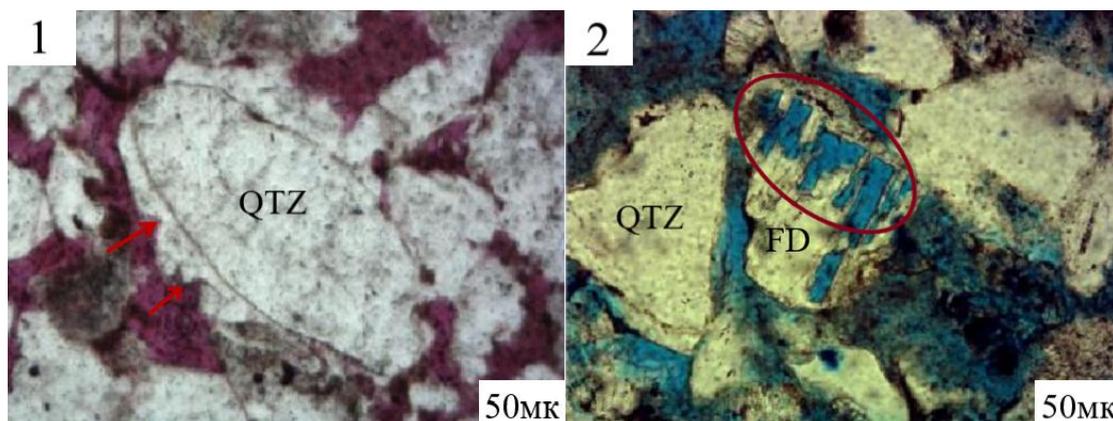


Рисунок 14. Различные виды пор в песчаниках: 1) поры растворения кварца, скв. Гуан-113, P_k , глубина: 2261,85 м, увеличение: 200; 2) поры растворения полевых шпатов, скв. Лян-902, P_k , глубина: 2160,96 м, увеличение: 200 (QTZ-кварц, FD-полевый шпат)

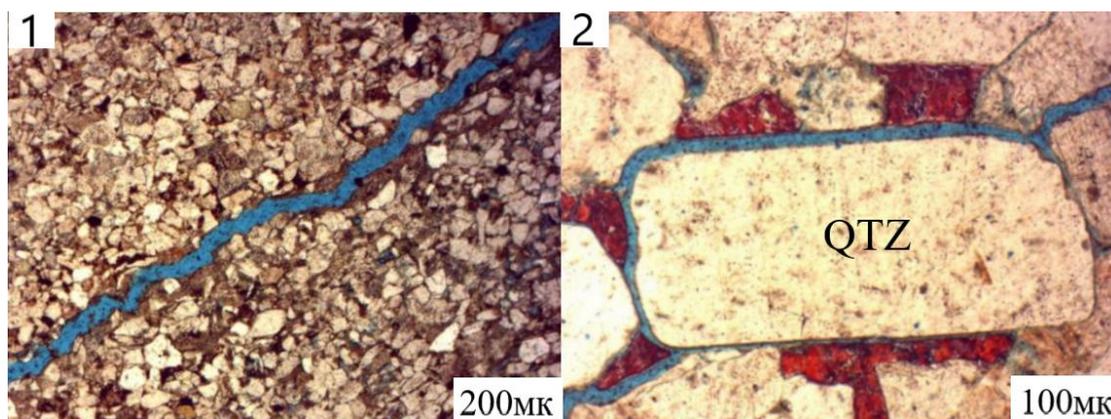


Рисунок 15. Трещиноватость в песчаниках: 1) структурные трещины, скв. Гуан-118, P_k , глубина: 3007,7 м, увеличение: 50; 2) катагенетические трещины, скв. Бин-215, $P_{и}$, глубина: 1075,35 м, увеличение: 100 (QTZ-кварц)

Алевролиты обычно встречаются на удалении от места происхождения терригенных обломков, главным образом, распространены в отложениях верхнего, среднего Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4. Из-за дальнего переноса сортировка и окатанность зерен лучше, а минеральная зрелость выше. В пределах области исследований встречаются пурпурно-красные, красно-коричневые, серые, серо-зеленые алевролиты. Размер зерен алевролитов составляет от 0,02 до 0,8 мм, зерна имеют полуокатанные и угловые формы,

обычно смешиваются с пелитом и песком.

Алевролит можно разделить на крупнозернистый и мелкозернистый. По составу крупнозернистые разности похожи на песчаники: в основном включают кварц, полевые шпаты и обломочные минералы, содержание кварца относительно высокое, варьирует от 35 до 78%, а содержание полевых шпатов и обломочных минералов относительно низкое. Обломочные минералы в основном происходят из магматических и метаморфических пород, иногда встречаются мусковит, пирит и сидерит. По составу и свойствам мелкозернистый алевролит аналогичен глинистым породам.

Контактные отношения зерен в алевролитах обычно точечно-линейные и линейно-выпукло-вогнутые. Породы характеризуются низким содержанием цемента, в основном цемент глинистый, железистый, доломитовый. Для мелкозернистых алевролитов характерна хорошая сортировка и меньшая потеря объёма пустотных пространств при воздействии постседиментационных процессов, чем у песчаников.

В алевролитах часто встречаются поры различных размеров и форм, но в основном поры мелкие и тонкие (0,02 мм-0,1 мм), очертания пор в основном треугольные, выпукло-вогнутые и заливные. Поры могут быть соединены друг с другом через границы между обломочными зернами и цементами, контакты между обломочными частицами, микротрещины.

3.2 Глинистые породы

Базальные красноцветные отложения от Кондянь-1 до нижней части Шахэдие-4 в юго-восточной части впадины Цзиян представлены типичным переслаиванием песчаников с глинистыми породами и глинистых пород с эвапоритами (рис. 16). Окраска глинистых пород является хорошим признаком обстановки осадконакопления. Серый и темно-серый цвет представляют собой полуглубокое-глубокое озеро в условиях гумидного климата. Пурпурно-красный, красный, коричнево-красный, пестрый цвет обычно отражают аридный климат на суше и прибрежных озерах. Серо-зеленый, зеленый чаще всего отражают отложения прибрежных и неглубоких озер в относительно аридных условиях (Князев, 1991). Глинистые породы Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4 юго-восточной части впадины Цзиян обычно пурпурно-красные, красные, коричнево-красные, зеленые,

пестрые цветы, что отражает окислительную среду.

Глинистые минералы нижней части Шахэдие-4 представлены в основном каолинитом, а Кондянь-1 – иллитом и хлоритом. Помимо глинистых минералов, глинистые породы также включают карбонатные минералы, такие как кальцит и доломит, и терригенные обломки, такие как кварц и полевые шпаты. Наблюдение под микроскопом показывает, что большинство глинистых минералов имеют глинистую чешуйчатую форму, часто смешанную с глинистыми обломками и скрытокристаллическими карбонатными минералами. Глинистые минералы на глубинах залегания менее 2500 м – преимущественно каолинит, а более 2500 м – в основном иллит и прослойка между иллитом и монтмориллонитом, доля прослоя составляет 20%, а содержание каолинита менее 20%.

В процессе диагенеза и катагенеза каолинит в базальных красноцветных отложениях трансформировался в иллит и хлорит, а монтмориллонит в иллит. Во время преобразования каолинита в иллит и хлорит выделяется большое количество воды и H^+ (Zhou и др., 2011). В процессе преобразования монтмориллонита в иллит выделяется большое количество межслоевой воды, Ca^{2+} , Na^+ , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Si^{4+} , это может оказать очень большое влияние на цементацию и растворение песчаных коллекторов, а затем повлиять на их коллекторские свойства (Zhu и др., 2013).

Согласно предыдущим исследованиям, глинистые породы в базальных красноцветных отложениях эпохи Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4 не имеют условий для образования нефти и не могут выделяться в качестве хороших нефтематеринских пород, но в некоторых районах они могут использоваться, как хорошие флюидоупоры. НМП в основном распространены в Кондянь-2 и верхней части Шахэдие-4 .

По структурным характеристикам и особенностям минерального состава, глинистые породы можно разделить на несколько типов.

Массивные алевритовые аргиллиты преимущественно распространены в отложениях эпохи нижней части Шахэдие-4, светло-серые с высоким содержанием терригенных обломочных минералов. По наблюдениям под микроскопом, минералы полевых шпатов и кварца распределены равномерно. Предполагается, что массивные алевритовые аргиллиты образовывались в среде с сильным гидродинамическим

воздействием – озерной.

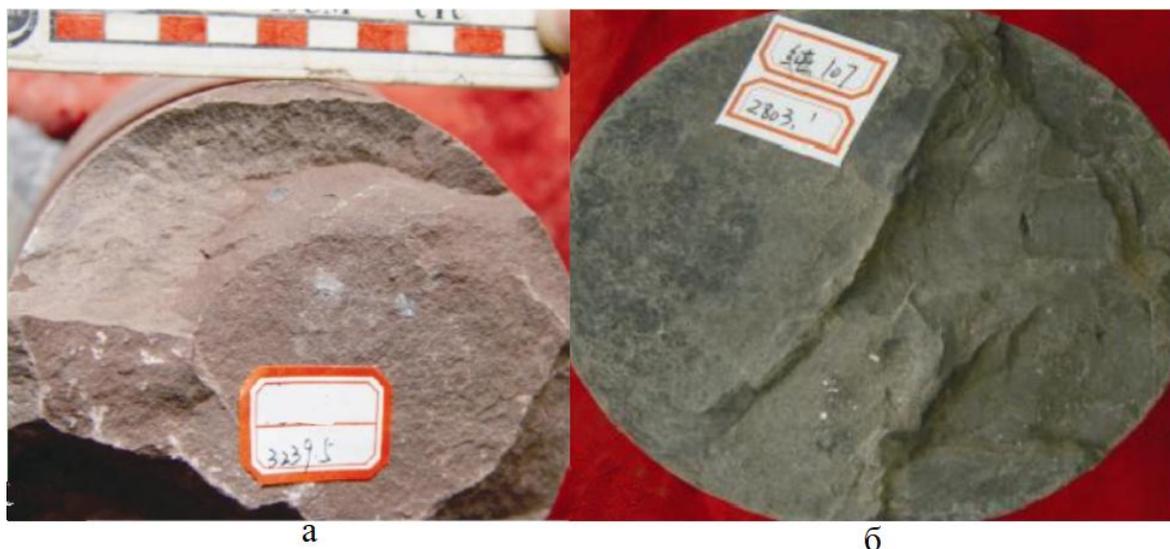


Рисунок 16. а) Коричнево-красные аргиллиты, скв.Лян-215, P_k , глубина: 3239,5 м.; б) Серо-зеленые аргиллиты, скв.Сун-1, $P_{ш}$, глубина: 2803,1 м

Массивные известковые аргиллиты встречаются в отложениях эпохи нижней части Шахэдие-4. Содержание кальцита в массивных известковых аргиллитах составляет 9-60%, в среднем 35%, содержание кварца варьирует от 20 до 47%, в среднем 30%, а глинистых минералов – в пределах 9-41%, в среднем 30%. Минералы распределены равномерно, присутствуют биологические включения, такие как остракоды.

Слоистые гипсовые аргиллиты характеризуются тонким переслаиванием темных аргиллитов и светлых эвапоритов. Основные минералы – глинистые минералы, гипс, кварц и полевые шпаты. Среди них самое высокое содержание глинистых минералов, за ними следует гипс.

Массивные мелкозернистые смешанные породы распространены в отложениях эпохи Кондянь и нижней части Шахэдие-4. Карбонатные минералы, глинистые минералы и терригенные обломки почти равномерно перемешаны. Содержание каждого компонента около 30%. На некоторых участках можно увидеть единичное минеральное обогащение. Накапливались такие отложения в озерных условиях, с поступлением большого количества обломков и достаточного количества кислорода. Содержание органического вещества низкое.

3.3 Эвапориты

Мощности эвапоритовых толщ в юго-восточной части впадины Цзиян велики, но диапазон распределения ограничен – в основном в районе впадины Дунин. Они образуются за счет осаждения сульфид-ионов.

Эвапориты в свите Кондянь явно не перекристаллизованы, гипс часто образуется в виде прерывистых полос и опухолевидных форм (рис. 17). Гипс и каменная соль присутствуют в виде пластинок, между некоторыми из них можно увидеть микрокристаллические строматолиты и следы птиц. Эти особенности являются признаками мелководного происхождения соленосных пород в условиях испарения. Отложения соленого озера в основном представляют собой переслаивание темно-красных, пурпурно-красных мелкозернистых обломков и гипсов, каменных солей, главным образом, распределенных в трех горизонтах: 4351-4433 м, 4193-4237 м, 4014-4071 м, толщина монослоя небольшая, в пределах 1-5 м. Переслаивание серых аргиллитов, гипсов и каменных солей присутствует только на небольшой площади в более глубокой части озера. Существует много типов осадочных структур, включая параллельную слоистость, косую слоистость, структуру биотурбации, поверхности размыва и т.д.

Гипсы и каменные соли в свите нижней части Шахэдие-4, которые сосуществует с глинистыми породами и даже сланцами, имеют характеристики глубоководного генезиса. Отсутствуют перерывы осадконакопления и признаки засухи и окисления. Большая часть каменной соли испытала перекристаллизацию, размер зерна относительно крупный, в пределах 6-10 мм, менее подвержен влиянию волн и течений.

Соли начали появляться в позднем Кондяне, в основном – в центре впадины, в течение раннего Шахэдие отложения гипсов и ангидритов не изменялись, но область накопления и мощность прослоев увеличились. Гипсы и ангидриты в ярусе Кондянь были унаследованы и развиты, а развитие соленого озера вступило в период своего расцвета.

Наличие толщ гипсовых пород оказывает значительное влияние на постседиментационные процессы в нижележащих песчаных коллекторах и формирование объема пустотного пространства коллекторов. Низкая плотность гипсовой соли снижает давление на нижележащие толщ, ослабляет эффект уплотнения и способствует сохранению первичных пор (Lai и др., 2011). Гипсово-солевые толщ имеют хорошую

экранирующую способность, что затрудняет пропускание флюидов из нижележащих толщ и приводит к появлению зон аномально высокого давления (АВПД), которое способствует сохранению первичных пор, но не способствует образованию вторичной пористости. Кроме того, гипсы начинают обезвоживаться и превращаться в ангидриты при 90°C, наиболее масштабно этот процесс происходит в диапазоне температур 100-150 °С, во время преобразования и обезвоживания гипса в ангидрит высвобождается большое количество щелочной воды, богатой Ca^{2+} и другими ионами металлов (Zou и др., 2008). Поступление щелочной воды в пласт неизбежно окажет значительное влияние на свойства пластового флюида, тем самым влияя на качество коллектора.



Рисунок 17. а) Гипсовая порода мелководного происхождения, скв.Хао-3, P_k , глубина: 4502,0 м; б) Гипсовая порода мелководного происхождения, скв.Фэн-2, P_k , глубина: 5474 м

Гипсы и ангидриты – белые, серые или светло-желтые волокнистые кристаллы. Размер частиц гипса крупный, ангидрита – мелкий. Гипсы в основном тонкослойные, смешанные с черными и серыми глинистыми породами и сланцами, в глинистых породах гипс часто бывает в форме типа снежинок, волокнистым и переслаивается аргиллитом.

Каменные соли жесткие и плотные, с определенной прозрачностью, окраски в основном серовато-белые, главный минерал каменных соли - хлорид натрия, содержатся и другие минералы, такие как хлорид калия. Толщина монослоя изменяется от 15 до 50 см. Такие отложения образуются за счет отложения растворенных солей, когда соленость озера чрезмерно повышается. Каменная соль часто ритмично переслаивается с глинистыми породами.

Соляные породы легко растворяются и деформируются. В периоды интенсивной

тектонической активности, когда в аргиллитвах, окружающих соляную породу, образуются трещины, растворенные в пласте гипс и соли заполняют трещины и перекристаллизовываются.

Выводы

1. Базальные красноцветные отложения выделяются в нижнем эоцене, в составе свит Кондянь-1 и Шахэдие-4 (нижняя часть). Они широко распространены в юго-восточной части впадины Цзиян, представлены в основном терригенными породами, встречаются конгломераты, гравелиты, песчаники, алевролиты и глинистые породы.

2. Состав песчаников, а, следовательно, их коллекторские свойства в юго-восточной части впадины Цзиян, определялись тектоническими подвижками по региональной системе сдвиговых разломов Тан Лу. Одно из таких событий в конце эпохи Кондянь привело к подъему древнего горного массива и резкой смене состава терригенного материала, который стал накапливаться во впадине Цзиян. Если раньше здесь аккумуляровались песчаники аркозовой группы, то теперь их сменили граувакки, характеризовавшие более слабыми коллекторскими свойствами.

3. В песчаниках базального комплекса нижнего эоцена получили развитие различные типы цементов. Наиболее распространен карбонатный цемент, образование которого связано со стадиями диагенеза и раннего катагенеза. Встречаются также кремнистый, пиритовый, скрытокристаллический гематитовый и гипсово-ангидритовый цементы. Повсеместное развитие скрытокристаллического гематита является тем фактором, который определяет преобладание красной и пестрой окраски отложений базального комплекса нижнего эоцена в районе исследования. Содержание цемента в неглубоко залегающих породах значительно выше, чем в глубокопогруженных (кроме гипсового/ангидритового).

Глава 4. Литолого-фациальные комплексы базальных отложений и обстановки их аккумуляции

4.1 Обстановки осадконакопления

Исследования каротажных и сейсмических материалов, а также результаты изучения керна позволили обнаружить, что на процесс осадконакопления базальных красноцветных отложений Кондянь-1 (нижний эоцен) нижней части Шахэдие-4 впадины Цзиян большое влияние оказали процессы затопления в условиях аридного климата.

4.1.1 Окраски пород

Отложения в районе исследования в основном представлены переслаиванием песчаников и глинистых пород. Отложения яруса Кондянь переслаиваются пурпурно-красными глинистыми породами и коричнево-красными песчаниками, а в нижней части Шахэдие-4 – пурпурно-красными глинистыми породами и серыми песчаниками. От центра к краю впадины темные цвета постепенно уменьшаются, а красные постепенно увеличиваются. Переслаивание терригенных пород и гипсов, что отлагались в центральной части бассейна, показывает, что климат в период осадконакопления в целом был аридным.

4.1.2 Характеристики палеоклимата

Изменения климата могут вызвать определенные процессы, влияющие на растительность, в том числе изменения в составе пыльцы, продуцируемой ею. Следовательно, изменения содержания пыльцы могут быть использованы для восстановления палеоклиматических характеристик исторического периода. Проанализированы виды и изменения содержания спорополленов в скважне Хао-1 и Ван-46 в фан-дельтовых отложениях пологого склона района исследования и было выявлено, что голосеменные преобладают в выборках. Их доля достигает 41–76%, за ними следуют покрытосеменные, составляющие 20–40%, а наименее представлены водоросли и папоротники – 2–20%. Среди детектированных голосеменных очень распространены представители рода эфедра, доля которых составляет от 20% до 60%. Обилие ксерофитной эфедры в спорополлене свидетельствует о засушливости климата в период осаднения

базальных красноцветных отложений.

4.1.3 Палеосоленость

Существует множество методов измерения палеосолености, в данном исследовании используются в основном геохимические методы. В качестве основного индикатора палеосолености было выбрано соотношение массовых долей элементарного стронция и бария (Sr/Ba). Отношение стронция к барию больше 1,0, что соответствует среде с соленой водой; от 0,5 до 1 – среде с солоноватой водой; меньше 0,5 – пресноводной среде. Для измерения отношения стронция к барию были отобраны семь скважин, среди которых скважины Лян-125, Гуан-113, 118 и 120 предоставляют данные о палеосолености нижней части Шахэдие, и Ван-93, 130 и 112 – данные для отложений Кондянь-1. В период осадконакопления изученных отложений отношение элементарного стронция к барию в водной среде в районе исследования было в основном больше 0,5, и лишь очень немногие замеры показали значения ниже 0,5, в среднем 0,935. Отношение элементарного стронция к барию показало, что соленость среды в этот период была относительно высока. По данным каротажа и керновых наблюдений выявлено небольшое количество гипсового и ангидритового материалов в отложениях, что также доказало, что соленость водной среды в этот период была относительно высокой.

4.2 Основные литолого-фациальные комплексы

Исследования, проведенные в рамках данной работы, позволили выделить три литолого-фациальных комплекса и соответствующие им обстановки осадконакопления: пролювиальные конусы выноса, фан-дельты и песчаные бары. Выводы сделаны на основании описаний кернового материала, анализа каротажных и сейсмических данных, изучения геохимических особенностей базальных красноцветных отложениях нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цизян.

4.2.1 Проллювиальные конусы выноса

Состав пород

Состав и характеристики терригенных пород в отложениях проллювиальных конусов выноса сильно различаются из-за особенностей материнских пород в областях сноса. Преобладают конгломераты, песчаные конгломераты, крупнозернистые песчаники, песчаники, красные глинистые породы и т. д. В составе песчаников 13,5-42,7% приходится на кварц, 15,6-36,2% на полевые шпаты и 31,7-65,1% на обломки пород, они плохо отсортированы, минералогическая зрелость низкая (рис. 18). Размер гравийных и песчаных зерен варьируется от 0,01-3мм при преобладании части 0,2-2мм (рис. 19).

Текстуры пород

Текстуры проллювиальных конусов выноса в базальных красноцветных отложениях нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цизян разнообразны. Конгломераты массивнослоистые, присутствуют текстуры размывов, породы относительно равномерны по материалу, по составу и строению различий нет. Слоистость в районе исследования в основном сформирована быстрым накоплением несортированных отложений, которые отражают действие гравитационных и селевых потоков. В проллювиальных отложениях также встречается направленный гравий, отражающий седиментацию речных потоков в активных гидродинамических условиях. Наблюдения показывают, что размерность обломочных частиц постепенно уменьшается вверх по разрезу, что отражает переход селевого потока в речной в процессе осадконакопления (рис. 20).

Особенности субфаций

В проксимальной части проллювиальных конусов выноса наблюдаются селевые и русловые отложения. Селевые отложения представляют собой гравийные и песчаные зерна, характеризующиеся плохой окатанностью и сортировкой, угловатыми и эллиптическими формами, встречается вертикальный или наклонный гравий, пространство между зернами заполнено глинами или песчаными глинами. Русловые отложения состоят из серых мелко-среднезернистых гравийников и крупнозернистых песчаников с нечеткой слоистью (рис. 21).

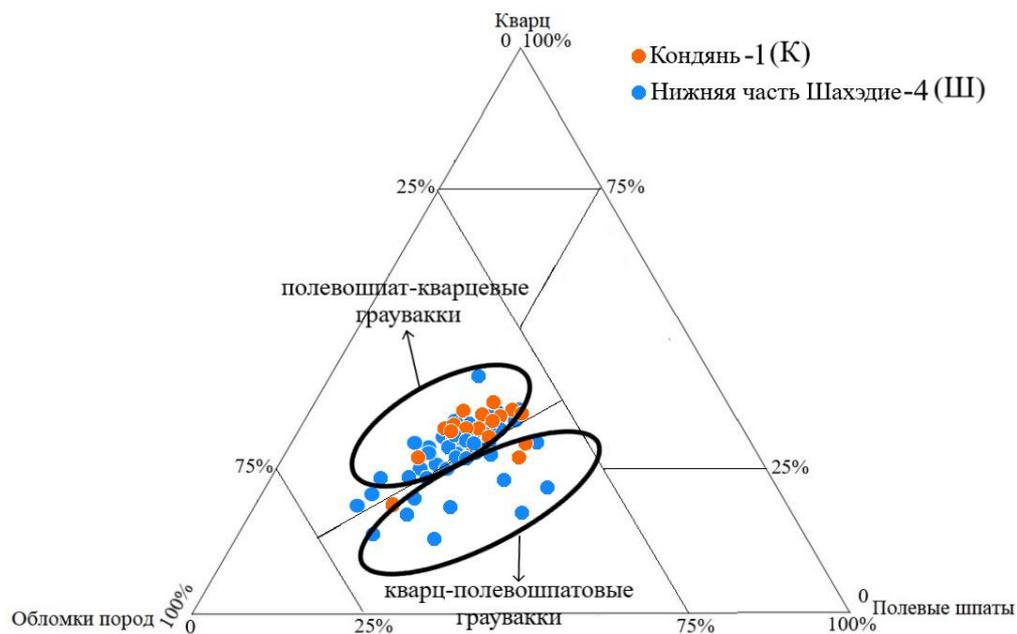


Рисунок 18. Состав песчаников пролювиальных конусов выноса

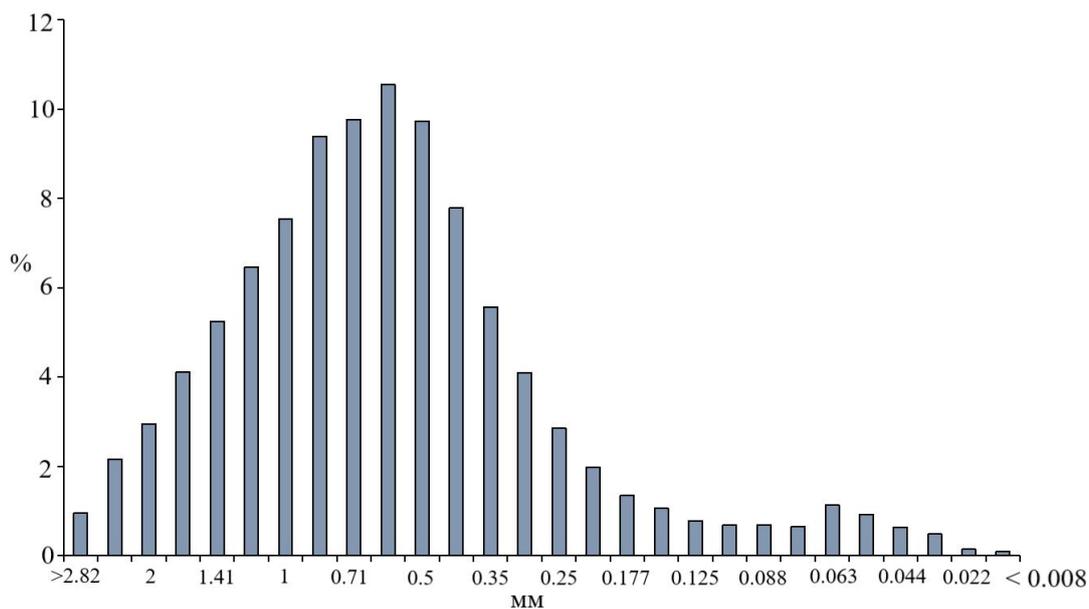


Рисунок 19. Гистограммы гранулометрического состава песчаников в отложениях пролювиальных конусов выноса



Рисунок 20. Характеристики текстур отложений пролювиальных конусов выноса

- 1) конгломерат, скв.Ван-110, глубина: 2070,33 м; 2) конгломерат, скв. Ван-730, глубина: 2317,66 м; 3) конгломерат, скв.Ван-130, глубина: 1744,1 м; 4) конгломерат, скв.Ван-730, глубина: 1378,7 м; 5) гравелит, скв.Ван-130, глубина: 2289,74 м; 6) текстура размыва, скв.Ван-112, глубина: 1415,5 м; 7) текстура размыва, скв.Ван-110, глубина: 2300,6 м; 8) текстура размыва, скв.Ван-112, глубина: 1945,9 м; 9) текстура размыва, скв.Ван-112, глубина: 1927,1 м; 10) гравелит, скв.Ван-110, глубина: 2318,51 м; 11) конгломерат, скв.Ван-110, глубина: 2322,31 м; 12) глинистая порода, скв.Ван-110, глубина: 2325,62 м

Отложения разветвляющейся реки развиты в средней части конуса выноса, зачастую наблюдаются алевриты, песчаники, конгломераты с прослоями коричневых и пурпурных глинистых пород, часто встречаются текстуры размыва.

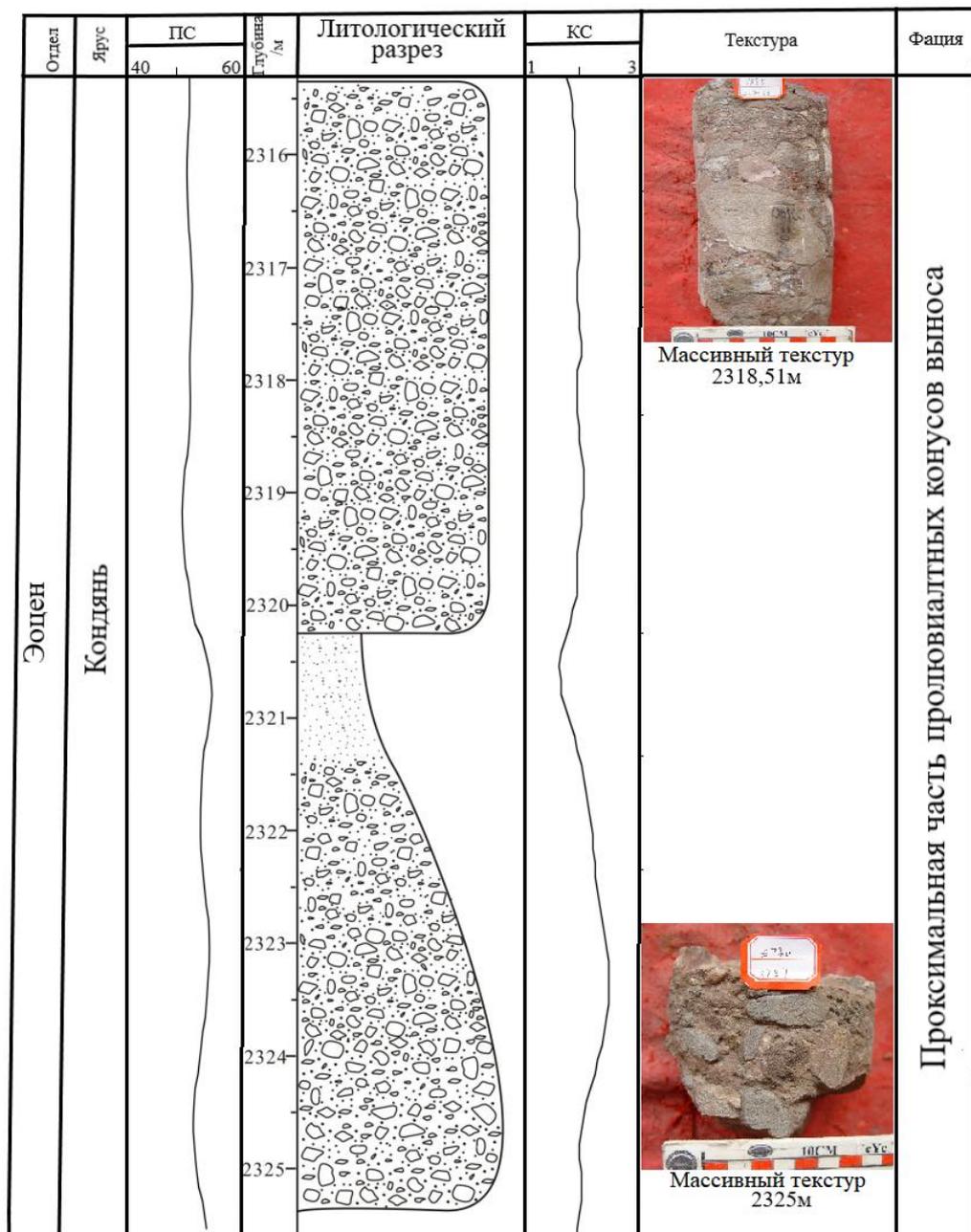
В дистальной части пролювиальных конусов выноса преобладают отложения растекания, преимущественно получили распространение серо-зеленых, пурпурно-красных, коричнево-красных, пестрых песчаников и гравийсодержащих глинистых пород, в основном развита массивная слоистость, также можно увидеть косую слоистость.

Процесс формирования отложения

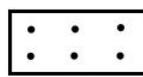
В условиях аридного климата было образовано большое количество продуктов выветривания и денудации, грубая часть обломочного материала, переносимого гравитационными потоками, откладывалась во время значительного снижения скорости потока, в результате чего были сформированы пролювиальные конусы выноса.

В основании конусов выноса развиты селевые отложения, образованные массивными скоплениями, постепенно вверх по разрезу они переходят в отложения разветвляющейся реки. Мощность песчаных тел в отложениях конуса выноса в основном меняется от 70 до 200 м. Разные части конуса выноса в районе исследования имеют разные последовательности накопления отложений, но, в целом, преобладают циклиты с уменьшением размера зерен снизу вверх.

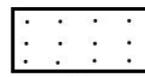
Отложения пролювиальных конусов выноса на изучаемой территории практически не содержат органических останков и органического вещества. Они имеют плохую сортировку и низкую минералогическую зрелость и не могут рассматриваться в качестве хороших коллекторов.



1



2



3

Рисунок 21. Разрез отложений пролювиальных конусов выноса
Условные обозначения: 1 – гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алевриты

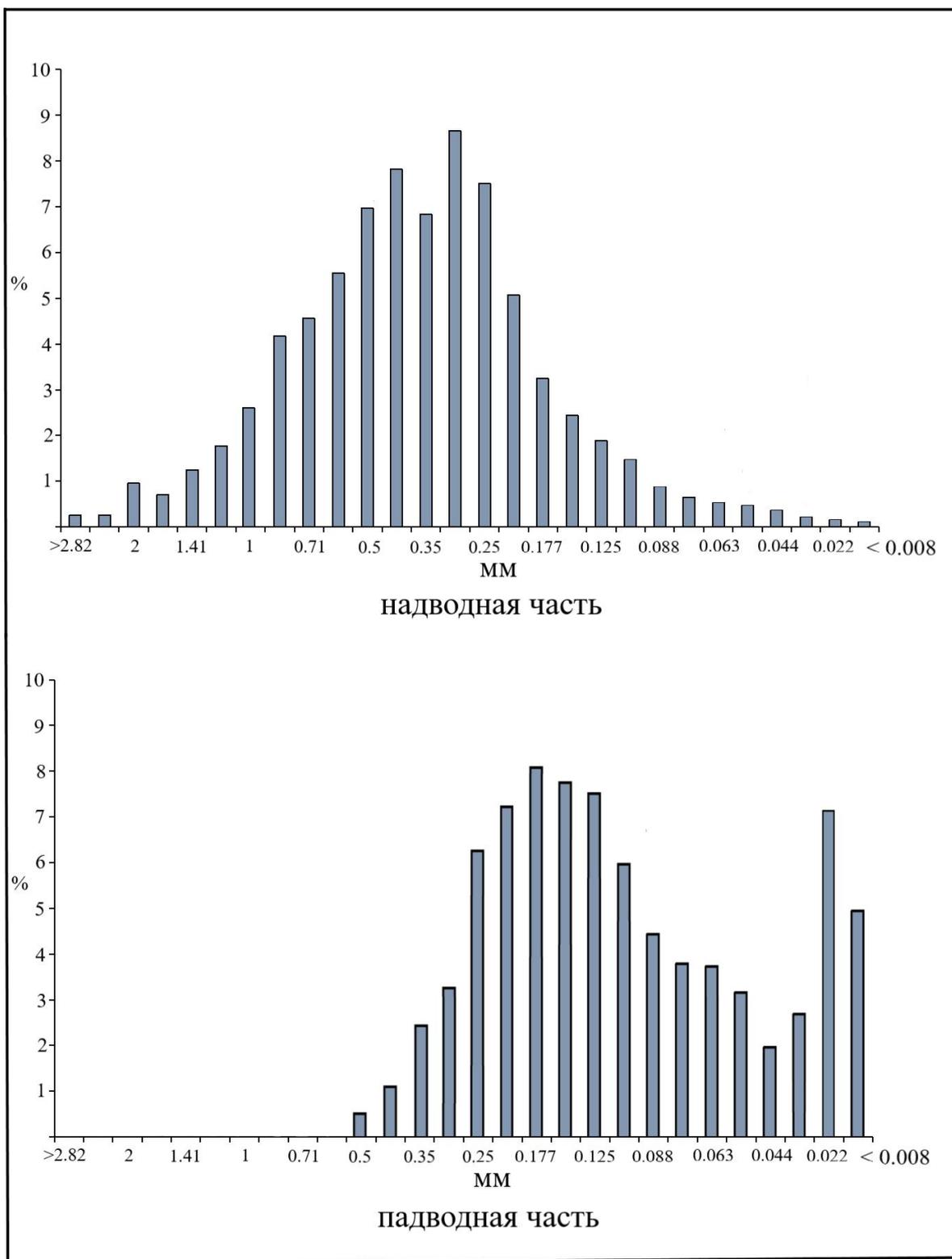


Рисунок 22. Гистограммы гранулометрического состава песчаников в отложениях фан-дельта

4.2.2 Фан-Дельты

Состав пород

Фан-дельты – небольшие по размерам конусы выноса, отдельные горизонты которых сложены песчаным, алевритовым материалом и песчаными с прослоями серовато- и коричневатого-красных глинистых пород, приносимым горными реками на равнину. Отложения надводной части фан-дельты представлены крупно- и среднезернистыми песчаниками, размер наибольшего количества частиц концентрируется в интервале от 0,1 мм до 2 мм, песчаники в составе подводной части сложены преимущественно материалом средне- и мелкопесчаной (0,01-0,5 мм) размерностей (рис. 22). Исследование керна и шлифов показывает, что содержание кварца в песчаниках фан-дельты обычно составляет от 21,3% до 50,6% при среднем 41,7%. Содержание полевых шпатов обычно меняется от 24,9% до 47,3%, в среднем 34,0%, из них содержание калиевого полевого шпата (КПШ) меняется от 10,3% до 20% при среднем 16,7%, а плагиоклаза обычно в пределах 12,3%-23% при среднем 17,3%. Содержание обломков пород обычно колеблется от 8,3% до 43,8%, при среднем содержании 24,3% (рис. 23), из которых содержание магматических обычно составляет 4%-16,1% при среднем содержании 8,5%, а метаморфических – 8,9%-19,1% при среднем 13,3 %. Содержание обломков осадочных пород обычно варьирует от 1,9% до 6,5 %, в среднем 2,5%, содержание метаморфических обломков пород значительно выше, чем магматических и осадочных пород; минералогическая зрелость обычно составляет 0,63-0,8 (в среднем 0,73) что является средними значениями.

Изучаемые фан-дельтовые отложения отличаются относительно высоким содержанием кварца и полевых шпатов, по сравнению с содержанием обломков пород, что указывает на относительно высокую степень зрелости породы.

Текстуры пород

Типы текстур в отложениях фан-дельты разнообразны, зачастую встречаются текстуры размыва, параллельная, косая и косоволнистая слоистость которые отражают одновременное существование гравитационных и речных потоков во время формирования отложений. Существуют различные типы косой слоистости, в том числе желобообразная, клиновидная, волнистая слоистость и знаки ряби, основными причинами их образования

являются речная и волновая деятельность. Волнистая слоистость представляет собой непрерывную форму волны с направлением, параллельным слою, в основном это вызвано волновым колебательным движением в зоне осадконакопления, что свидетельствует о достаточной поставке обломочных материалов. Клиновидная косая слоистость распространена в основном во фронтальной части фан-дельты. Желобообразная косая слоистость образуется при частом изменении направления движения среды осадконакопления, они встречаются в фан-дельтовой равнине и фронтальной части фан-дельты. При движении организмов в осадках или на их поверхности часто разрушаются и деформируются первоначальная осадочная текстура, остаются следы жизнедеятельности этих организмов, что обычно встречается в протоках фан-дельты. Кроме того, наблюдаются смена окраски образцов пород некоторых интервалов с серого и зеленого на красный и темно-бордовый в отложениях фан-дельты, что указывает на изменчивость среды осадконакопления (рис. 24).

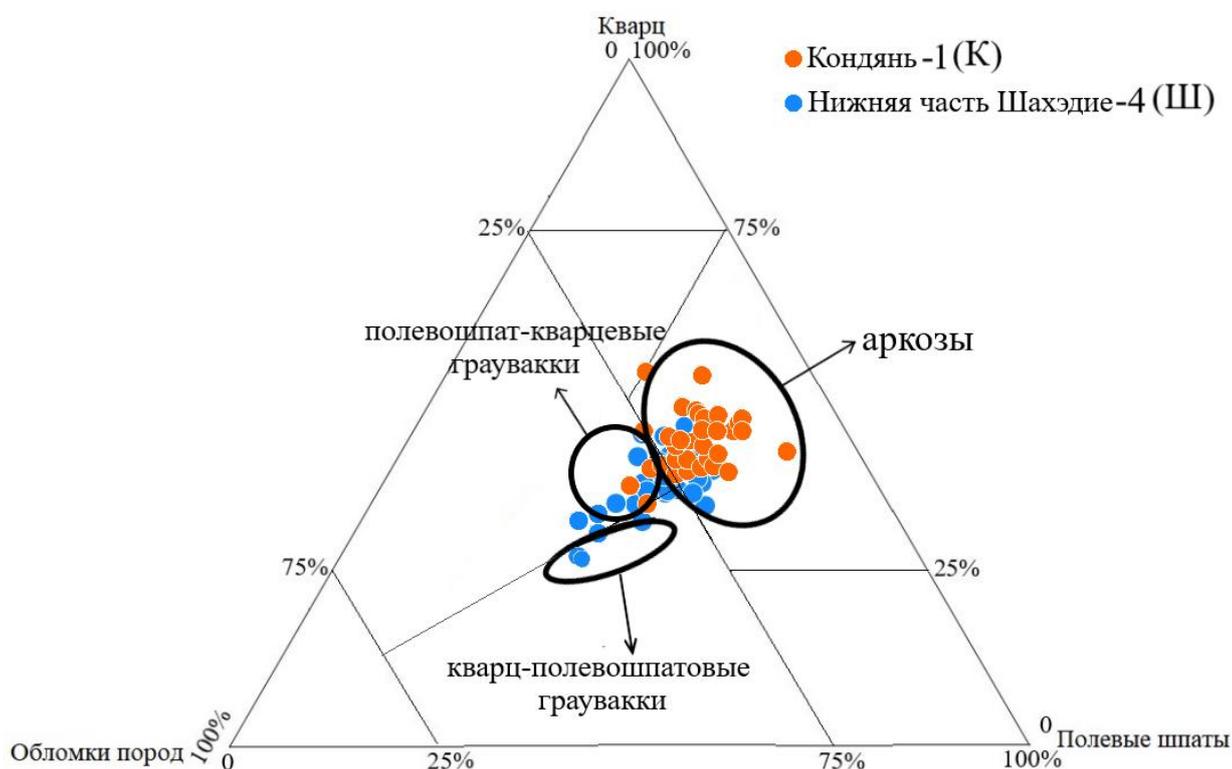


Рисунок 23. Состав песчаников фан-дельт



Рисунок 24. Характеристики текстур отложений фан-дельт

- 1) корытообразная косая соистость в песчанике, скв.Хао-1, глубина: 5273,7 м;
- 2) корытообразная косая слоистость в песчанике , скв. Лян-125, глубина: 1806,5м;
- 3)корытообразная косая слоистость в песчанике, скв.Ван-130, глубина: 1744,1 м;
- 4) параллельная слоистость в песчанике скв.Лян-41, глубина: 1076,59 м; 5) параллельная слоистость в песчанике, скв.Ван-130, глубина: 2081,74 м; 6) клинообразная косая слоистость в песчанике, скв.Лян-41, глубина: 1074,51 м. 7) клинообразная косая слоистость в песчанике, скв.Лян-41, глубина: 1074,71 м; 8) волнистая слоистость в песчанике, скв.Гуан-113, глубина: 2478 м; 9) изменение окраски песчаника, скв.Гуан-113, глубина: 2104,3 м; 10) красные аргиллиты. Гуан-112, глубина: 2111,6 м; 11) резкое изменение окраски песчаника, скв.Лян-125, глубина: 1804,7 м; 12) следы биотурбации в песчанике, скв.Гуан-120, глубина: 3120,23 м

Особенности субфаций

В составе фан-дельт на мелководье выделяются прибрежная дельтовая равнина, фронтальная части фан-дельты и продельта. Прибрежная дельтовая равнина – надводная часть, а фронтальная части фан-дельты и продельта – подводные. В фан-дельтовых отложениях развито много типов песчаных тел. В нижней части отложений под влиянием гравитационных потоков формируются песчаные тела. По мере того, как энергия потока уменьшается, речные потоки постепенно заменяют гравитационные, что приводит к образованию песчаных тел, в которых преобладают разветвляющиеся русловые отложения. На процессе осадконакопления озерное течение трансформирует песчаные тела более ранних этапов и способствует образованию устьевых и приустьевых баров.

Прибрежная дельтовая равнина представляет собой наклонный веер, на равнине фан-дельты можно увидеть микрофации, такие как разветвленные речные русла и болота, на которые в основном влияет береговая линия озера, действие волн, приливов и отливов. Русла развиты в основном в подошве дельтовой равнины и состоят из конгломератов и крупнозернистых песчаников со средней степенью зрелости и средней сортировкой. Гравий угловатый и полукруглый, размер частиц обычно 3-5 см, содержание обломков пород высокое, в прибрежном положении размерность пород становится более тонкой (часто песчаники крупнозернистые и среднезернистые), минералогическая зрелость увеличивается, сортировка становится лучше. Вверх по разрезу размерность зерен пород уменьшается, в подошве толщи наблюдаются размывы, характерна массивная слоистость, в верхней части встречается косая и волнистая слоистость, окаменелости относительно редки.

В фан-дельтовой равнине также присутствуют отложения болот и пойм, которые в основном развиты в низинах между руслами рек. Их распространение более рассеянное и площадь небольшая, зернистость отложений относительно мелкая, в основном алевритовая и глинистая, местами встречаются соли, в местах видны линзы крупнозернистых песчаников, встречаются корневища растений, наблюдается биотурбация.

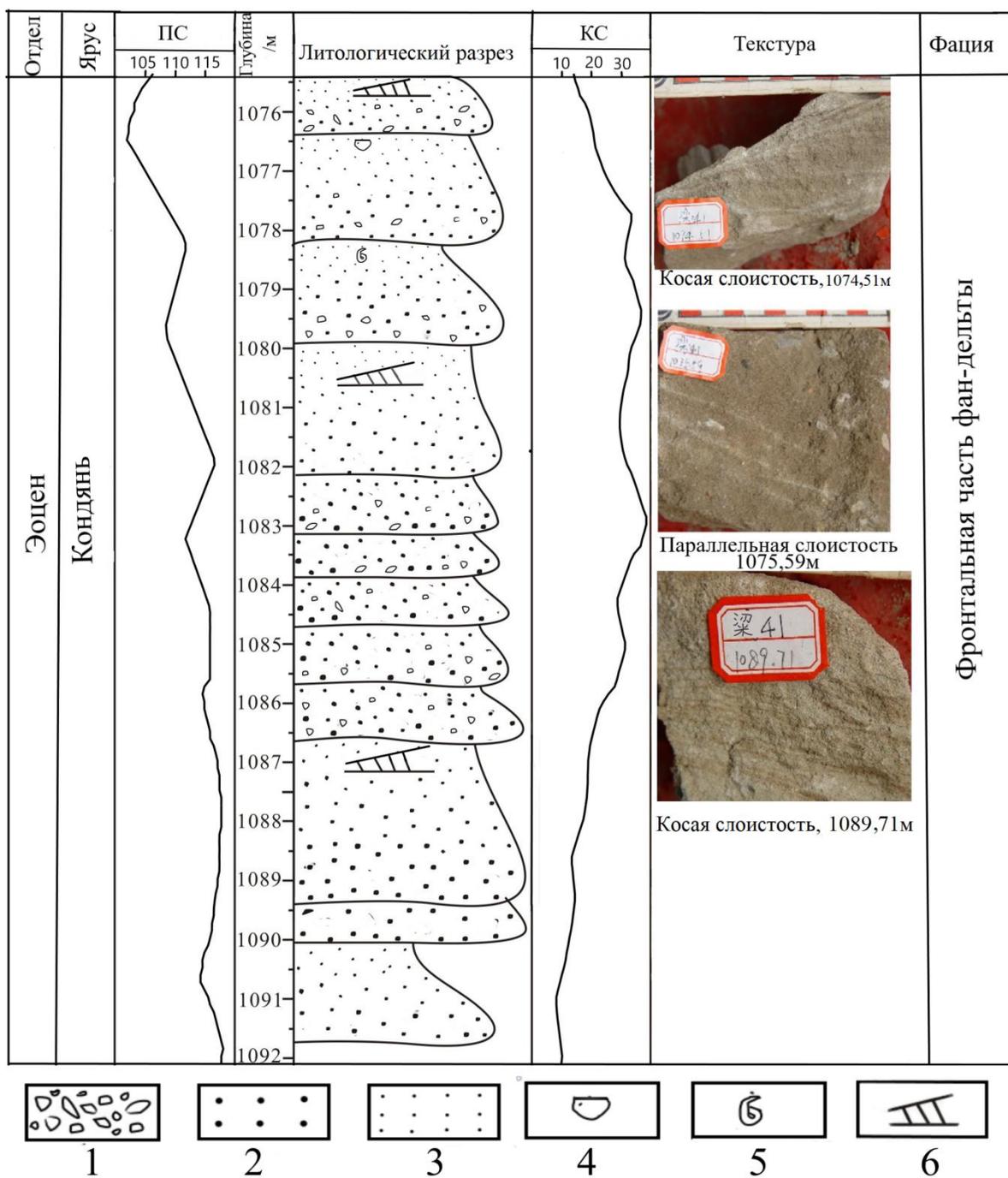


Рисунок 25. Разрез отложений фан-дельт

Условные обозначения: 1 – гравелиты; 2 – песчаники; 3 – алеволиты; 4 – раковины остракод; 5 – раковины гастропод; 6 – косая слоистость

Фронтальная часть фан-дельты подвергалась совместному влиянию речных потоков, озерных волн и приливов-отливов. Подводные каналы, расположенные во фронтальной части фан-дельты, являются очень важным коллектором нефти и газа в пределах изучаемой территории. Отложения каналов представлены среднезернистыми и мелкозернистыми песчаниками, можно увидеть небольшую косую слоистость. Отложения протоков в основном представлены мелкозернистыми песчаниками и глинистыми породами, которые несут в себе признаки обработки волновой деятельностью и отличаются высокой степенью биотурбации, часто в них присутствуют раковины моллюсков. Песчаные тела, отложившиеся в эстуарии, были подвержены влиянию штормов и озерных волн, что приводило к образованию приустьевых баров. Песчаники приустьевых и устьевых баров хорошо отсортированы и характеризуются высокой зрелостью, что определяет их, как хорошие породы-коллекторы. Также в составе отложений присутствует значительное количество алевролитов, зернистость которых увеличивается вверх по разрезу (рис. 25).

Отложения продельты отлагались в относительно глубоководной области, они представлены серо-черными, серо-зелеными аргиллитами и глинистыми алевролитами, отличаются горизонтальной слоистостью, содержат много остракод и ископаемых рыб.

Вновь сформированные фан-дельты на озерном мелководье зачастую накрывали обширные участки, где обитал многочисленный бентос, в том числе животные с карбонатным скелетом. После погружения в недра в диагенезе происходило частичное растворение карбонатного материала, который заполнял крупные поры, образуя своего рода цемент. Развитие последнего значительно ухудшает коллекторские свойства песчаников.

Процесс формирования отложений

Фан-дельты образуются в мелководных озерах в аридных условиях. Берега озера в пределах района исследования характеризовались высоким рельефом, сильной тектонической активностью, аридным климатом, достаточным сносом и частыми дождями. Терригенные отложения пролювиальных конусов выноса сносились прямо в бассейн озера или переносились в них по каналам на короткие расстояния, в результате чего

образовались фан-дельты (Tian и др., 2010). Фан-дельты имеют веерообразные или язычковые очертания в плане, и линзовидные формы в разрезе.

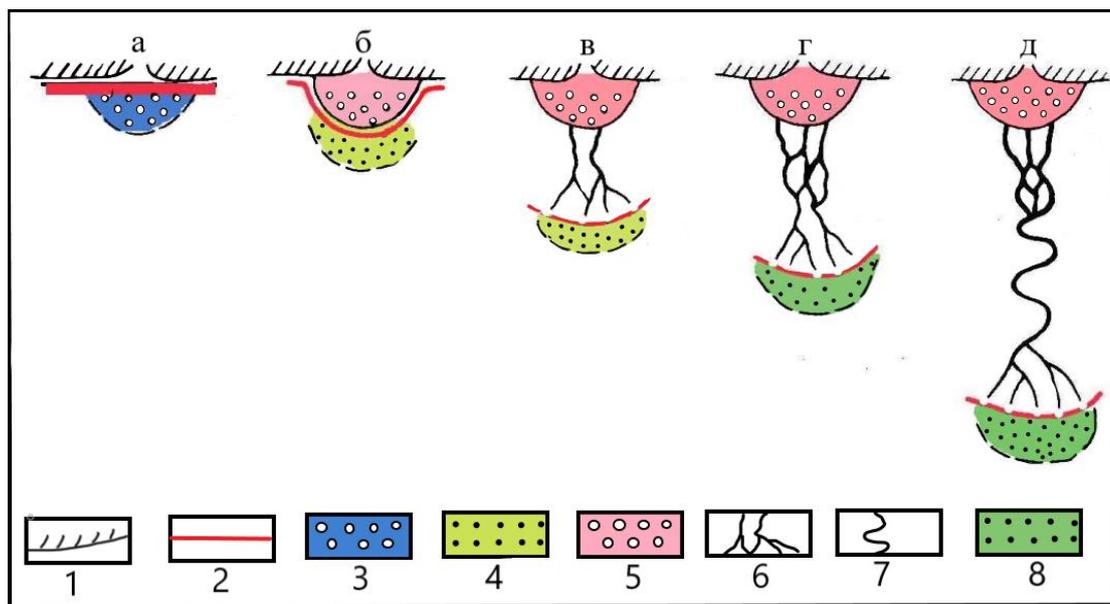


Рисунок 26. Сравнение фан-дельт, подводных конусов выноса и речных дельт
(G. Song и др., 2015)

Условные обозначения: а) подводный конус выноса; б) фан-дельта (близкие к области сноса); в) фан-дельта (снос на короткие расстояния реками); г) разветвляющаяся речная дельта; д) меандрирующая речная дельта;

1 – область сноса; 2 – береговая линия озера; 3 – подводный конус выноса; 4 – фан-дельта; 5 – пролювиальный конус выноса; 6 – разветвляющаяся река; 7 – меандрирующая река; 8 – речная дельта

Фан-дельты представляют собой тип отложений, отличный от подводных конусов выноса и речных дельт (рис. 26). Подводные конусы выноса в основном образуются в результате гравитационного оползания, и все отложения находятся под поверхностью воды, а для фан-дельт характерно наличие как надводной, так и подводной части. Фан-дельта также сильно отличается от речной дельты: топографический уклон области развития фан-дельты больше, так как в непосредственной близости находятся горные сооружения, областью сноса для фан-дельт выступают пролювиальные конусы выноса, зернистость пород относительно грубая. В надводной части фан-дельты развиты конгломераты и крупнозернистые песчаники, в близкой к водоему части развиты

подводные каналы. Площадь относительно небольшая, обычно от десятков до сотен квадратных километров. Речные дельты обычно развиты на краю впадины вдали от области сноса, а обломочные породы попадают в бассейн озера по разветвленным и извилистыми каналам, из-за уменьшения уклона речные потоки рассеиваются и скорость резко снижается, также накапливается большое количество придонного материала. По сравнению с речными дельтами фан-дельта ближе к области сноса, характеризуется более грубым материалом, более неустойчивыми компонентами, меньшими сортировкой и минералогической зрелостью отложений (Feng и др., 2015).

Фан-дельта развивалась в озере с колеблющимся уровнем воды в условиях аридного климата и ее отложения характеризовались разными особенностями в период осушения и затопнения. В период затопнения в бассейне озера откладывалось большое количество обломочного материала. В то же время бассейн озера расширялся, водоем углублялся, а обломочный материал под действием озерных волн образовал устьевые бары и дельтовые передовые песчаники в прибрежной зоне. В мелководной зоне из-за аридного климата водоем быстро обмелел, площадь бассейна озера уменьшилась, и вместе с этим уменьшилось поступление обломочного материала. гравитационный поток преобразовался в обычный разветвляющийся поток. Образовались русловые отложения, встречаются слои с большей долей глинистых пород и меньшей – песчаников.

Основными коллекторами в районе исследования являются отложения подводных русел, склонов, приустьевых и устьевых баров. Мощность песчаных тел изменяется в пределах 40-300м при средних значениях 80-140 м. Песчаники фронтальной части фан-дельты хорошо отсортированы, имеют высокую минералогическую зрелость. В них сохранилось большое количество первичных пор, в то же время, в процессе диагенеза и катагенеза, такие песчаники были подвержены образованию вторичной пористости.

4.2.3 Песчаные бары

Состав пород

Материал, формирующий песчаные бары, в основном поступает из близлежащих песчаных тел фан-дельты. Под влиянием волн материал хорошо сортируется. Зернистость породы мелкая, наблюдается высокое содержание кварца и полевых шпатов, небольшое

количество обломков пород, минералогическая зрелость пород высокая. Содержание кварца в песчаных барах обычно колеблется в пределах 39,4-65,2% при среднем содержании 50,6 %. Содержание полевых шпатов обычно составляет от 24,9% до 45,1%, среднее содержание около 34,3% (рис. 27), из которых содержание калиевого полевого шпата обычно составляет от 10 до 22% при среднем содержании 17,3%, а плагиоклаза – 9%-21%, в среднем 17%, содержание КПШ и плагиоклаза мало отличается. Содержание обломков пород значительно снижается и обычно составляет 3,6-26,1%, среднее содержание – 15,1%, среди них магматических пород – от 0,5 до 11% (в среднем 4,4%), метаморфических – 0,5-11 % (в среднем 8,2 %), осадочных пород – до 6,3% (в среднем 2,5%), содержание обломков метаморфических пород значительно выше, чем магматических и осадочных. Размер зерен отложений песчаных баров средний, в основном это песчаники средне-мелкие и алевролиты с высокой степенью зрелости. Размер зерен преимущественно меняется от 0,01 мм до 0,25 мм (рис. 28). Здесь преобладают серые, серо-зелёные и коричнево-красные алевролиты и глинистые алевролиты с прослоями коричнево-красных глин и алевролитов. Вверх по разрезу размерность зерен становится более тонкой, толщина песчаных тел уменьшается до 10 м.

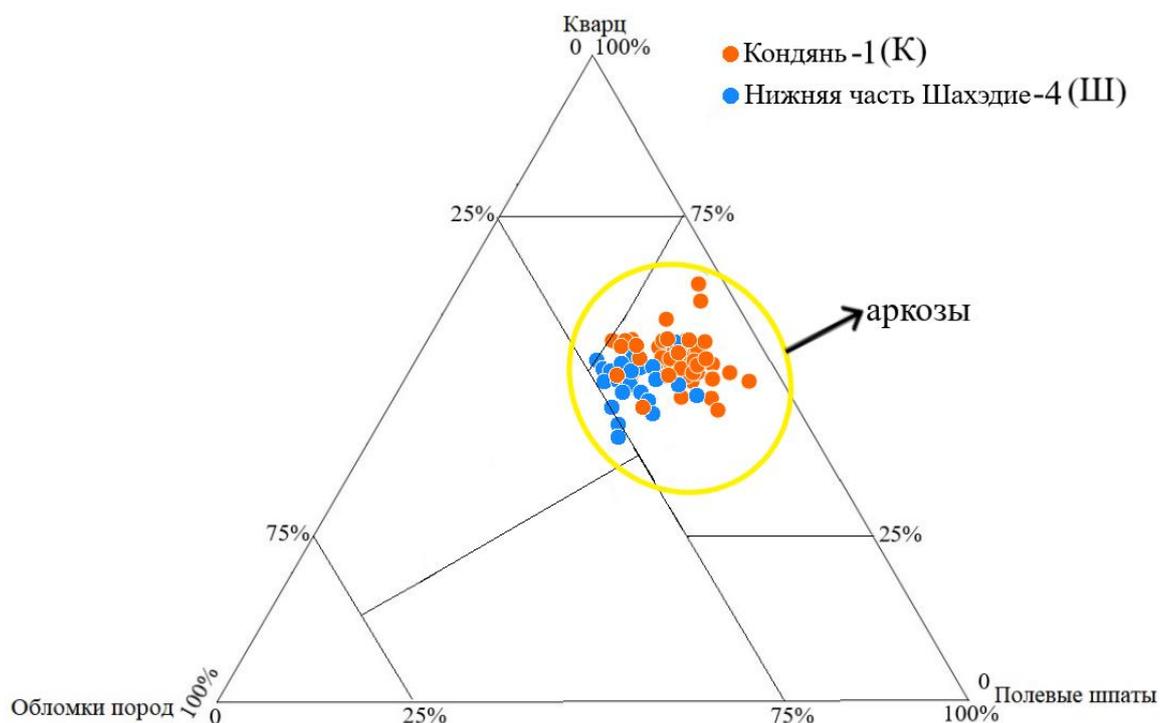


Рисунок 27. Состав песчаников песчаных баров

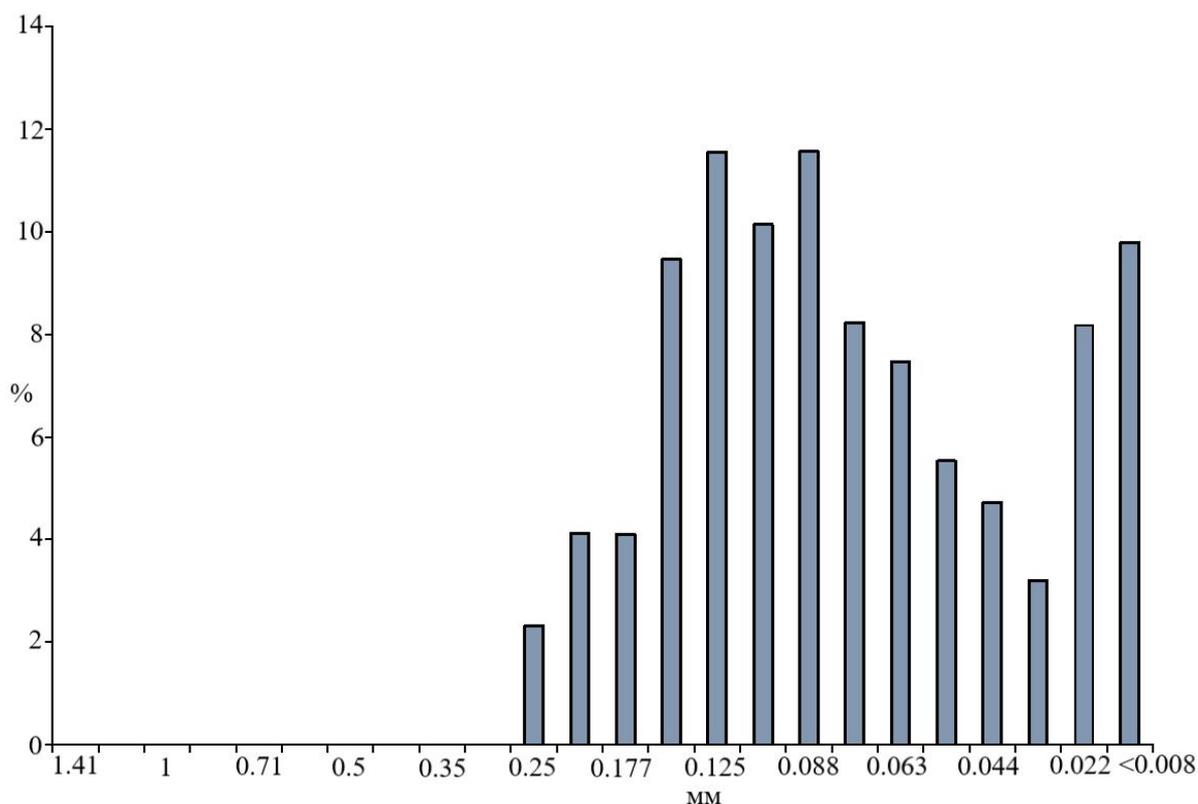


Рисунок 28. Гистограмма гранулометрического состава песчаников в отложениях песчаных баров.

Текстуры пород

Для отложений песчаных баров характерны различные типы текстур (параллельная и волнистая слоистость, знаки ряби и т.д.), которые отражают воздействие волн и течений вдоль берега, часто видны следы биотурбации различных типов, в основном вертикальные, наклонные и горизонтальные (Рис. 29). Доминирующими биотурбаторами являются мелкие беспозвоночные, такие как дождевые черви, полихеты, прозрачная креветка, грязевые креветки и личинки мошек. Деятельность этих мелких беспозвоночных, включая рытье нор, заглатывание и последующая дефекация обломочных зерен, способствует перемешиванию и изменению структуры отложений.



Рисунок 29. Текстуры отложений песчаных баров

- 1) волнистая слоистость в песчанике, скв.Лян-120, глубина: 3099,4 м;
- 2) косоволнистая слоистость в песчанике, скв.Гуан-118, глубина: 2983,9 м;
- 3) биотурбация в песчанике, скв.Гуан-12, глубина: 3320 м; 4) косая слоистость в песчанике, скв.Хао-1, глубина: 3757,02 м; 5) биотурбация в песчанике, скв.Гуан-12, глубина: 3323.2 м; 6) биотурбация в песчанике, скв.Гуан-4, глубина: 2749,35 м;
- 7) биотурбация в песчанике, скв.Лян-120, глубина: 3095,5 м; 8) биотурбация в песчанике, скв.Лян-120, глубина: 3094,55 м; 9) биотурбация в песчанике, скв.Лян-120, глубина: 3921,7 м; 10) горизонтальная слоистость в песчанике, скв.Гуан-4, глубина: 1917,83 м; 11) горизонтальная слоистость в песчанике, скв.Ван-130, глубина: 2081,7 м; 12) горизонтальная слоистость в песчанике, скв.Гуан-118, глубина: 2988,67 м

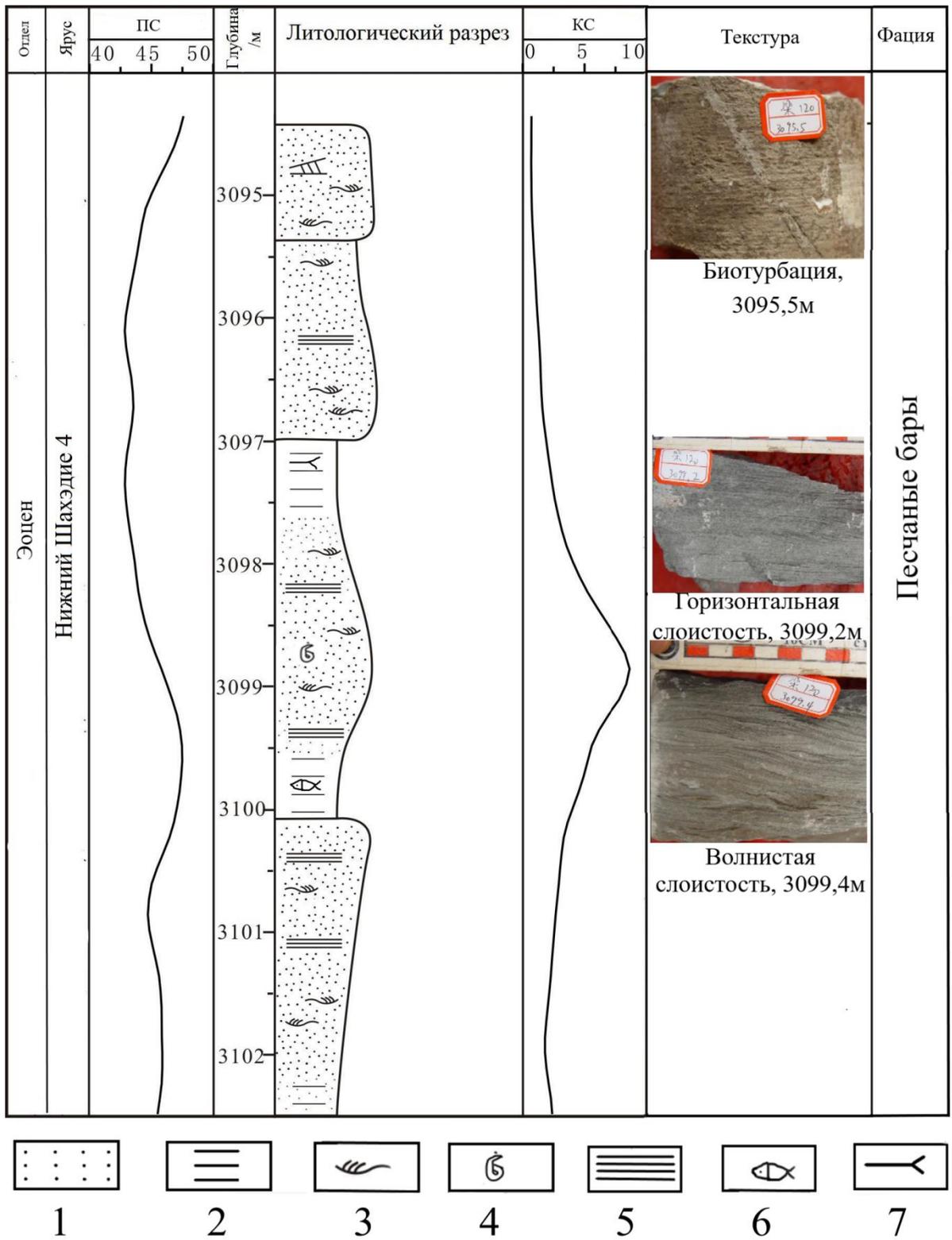


Рисунок 30. Разрез отложений песчаных баров

Условные обозначения: 1 – алевролиты; 2 – глинистые породы; 3 – знаки ряби; 4 – раковины гастропод; 5 – параллельная слоистость; 6 – угли; 7 – кости рыб

Процесс формирования отложений

Песчаные бары представляют собой обычные песчаные тела в мелководной части озера. Их формирование в основном контролируется волновой деятельностью и прибрежными течениями. Песчаные бары развиваются параллельно береговой линии озера, как правило, в форме поясов, которые сформированы путем ретранспорта и переосаждения осадка прибрежными течениями и волнами. Песчаный материал поступал из близлежащих песчаных тел, таких как фан-дельты (Wang и др., 2007). Песчаные тела в ходе своего образования были изолированы и разбросаны по мелководью на большие расстояния, что привело к довольно хорошей сортировке зерен данных отложений.

Динамический баланс между речной деятельностью и действием волн и прибрежных течений является основой для формирования и развития песчаных баров. Чрезмерное речное действие делает поступление наносов достаточным, а также тормозит действие волн и прибрежных течений, так что в наносах преобладают фан-дельты, в последствие могут образовываться массивные песчаные бары. Слишком слабое речное воздействие делает очень малым поступление обломочного материала, что приводит к отсутствию материальной базы для формирования песчаных тел (Wang и др., 2021).

Песчаники характеризуется малой мощностью и сильной латеральной изменчивостью. На плоскости развитие и распространение песчаных баров контролируется палеогеоморфологией, сформированной тектонической деятельностью. Такие песчаные объекты в основном распространены на флангах носовых структур, на периферии подводного нагорья и в точках тектонических поворотов.

Отложения баров представлены циклитами обратной последовательности, местами встречаются нормальные циклиты (рис. 30), предполагается, что это может быть связано с неполной переработкой песчаного тела дельт волнами. Баровые песчаники имеют высокую минералогическую зрелость, хорошую сортировку. Как правило, они могут использоваться в качестве хороших коллекторов и формировать крупные залежи нефти и газа, однако из-за сильного влияния постседиментационных процессов, как показало данное исследование, демонстрируют средние-хорошие ФЕС.

Типы литолого-фациальных комплексов базальных отложений

Фация	Субфация	Породы	Текстуры	Размер	Сортировка	Зрелость
пролювиальные конусы выноса	проксимальная часть	конгломераты, гравелиты, песчаники и глинистые породы	Массивный, текстура размывов	1-2 мм	плохая	низкая
	средняя часть	гравелиты, песчаники и глинистые породы	массивный, текстура размывов	0,5-2 мм	плохая	низкая
	дистальная часть	песчаники, алевролиты и глинистые породы	массивный	0,2-1 мм	плохая	низкая
фан-Дельты	прибрежная дельтовая равнина	крупнозернистые песчаники, алевролиты, глинистые породы	текстура размыва, и косая слоистость	0,1-1 мм	плохо-средняя	низко-средняя
	фронтальная части фан-дельты	средне-мелкозернистые песчаники, алевролиты, глинистые породы	Параллельная, косая, косоволнистая слоистость, знаки ряби, биотурбация	0,1-0,5 мм	хорошая	высокая
	Продельта	мелкие песчаники, алевролиты, глинистые породы	параллельная и косая слоистость, биотурбация	0,01-0,1 мм	плохая	низкая
песчаные бары	Песчаные бары	мелкие песчаники, алевролиты, глинистые породы	Параллельная, косая, косоволнистая слоистость, знаки ряби, биотурбация	0,01-0,25 мм	хорошая	высокая

4.3 Особенности пространственного распространения различных литолого-фациальных комплексов

На основе вышеприведенного анализа изучаемые отложения области исследований были разделены на три литолого-фациальных комплекса в зависимости от их генезиса: пролювиальные конусы выноса, фан-дельты и песчаные бары (таб. 3). Множественные циклиты развивались в отложениях ярусов Кондянь-1 и Шахэдие-4 (нижняя часть). В пределах одного циклита в разных областях бассейна были образованы различные типы отложений. При этом в жарком и сухом климате там, в мелком воде накапливалось большое количество сульфат-ионов, которые впоследствии выпадали в осадок в форме гипса и ангидрита. В этом исследовании были выбраны две корреляции скважин с юго-востока на север и с запада на северо-восток для анализа особенностей распределения литолого-фациальных комплексов в пределах района исследований.

Пролювиальные конусы выноса развиты в основном вдоль южной периферии бассейна. Они генетически связаны с временными потоками, выносящими большое количество обломочного материала. В подошве циклитов часто наблюдаются конгломераты, крупнозернистые песчаники и т. д., в них наблюдаются текстуры размыва. Отложения фан-дельты развиты внутри южной пологой склоновой зоны, как и пролювиальные конусы выноса, имеют более крупную зернистость в подошве циклитов, вверх по разрезу размерность зерен и мощность песчаных тел постепенно уменьшается, в кровле циклита наблюдаются глинистые породы небольшой мощности. Мощность глинистых пород увеличивается от краевой части бассейна ко внутренней. Ближе ко внутренней части бассейна присутствуют песчаные бары, однако зернистость относительно мелкая, мощность песчаных тел очень мала, они часто переслаиваются со фан-дельтовыми песчаными телами. В центральной части впадины разрез в основном представлен переслаиванием баровых песчаников, глинистых пород и эвапоритов (рис. 31). На западной окраине впадины на ранних этапах развивалась большая площадь фан-дельтовых отложений. Крупномасштабные фан-дельтовые отложения обеспечивают достаточный снос для формирования песчаных баров и большое количество баровых песчаных тел развито ближе ко внутренней части впадины. В центре впадины в основном

развито переслаивание отложений глинистых пород и эвапоритов (рис. 32).

4.4 Литолого-фациальное районирование

В веках Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4 господствовал преимущественно аридный климат, водоем был мелководным, в разных частях бассейна развивались различные типы осадочных фаций.

В северной части впадины, в связи с активацией разлома Ченнан, впадина испытала крупномасштабное проседание, в результате чего сформировалась зона крутого склона, и произошло накопление осадочной толщи подводных конусов выноса с узким ареалом распространения. В южных и западных районах впадины в основном развивались пологие склоновые пояса, где широкое распространение получили отложения пролювиальных конусов выноса и фан-дельтовые отложения. Мощность осадочной толщи здесь сравнительно невелика, но ареал распространения значительно шире, чем у отложений подводных конусов выноса.

Анализируя отношение суммарной мощности песчаных пластов к общей мощности разреза, можно увидеть, что во время накопления изучаемых отложений в регионе существовали три основные области сноса, которые обеспечивали поступление обломочного материала в район пояса пологих склонов: выступ Линфандиа и Цинчэнь на севере, выступ Гуанжао на юго-востоке и выступ Луси на юго-западе (рис. 33). Содержание крупнозернистых обломочных пород выше вблизи области сноса. Разломная активность в южной части выступов Луси и Гуанжао выражена слабо, устойчивые водоемы не развиты. На юге образовалась масштабная область накопления отложений пролювиальных конусов выноса. Перед пролювиальным конусом выноса развит участок развития фан-дельтовых отложений. Ширина пояса пологих склонов на северо-западе способствовала тому, что при входе водотока в котловину поток резко расширялся и на большой площади растекался вперед, образуя веерообразное дельтовое осадочное тело. Вблизи фан-дельты деятельностью волн и прибрежных течений были образованы изолированные и рассеянные баровые песчаные отложения вдоль береговой линии озера (рис. 34). В центре озерной котловины водоем мелководный, откладывалось большое количество глинистых пород, соленосных глин и эвапоритов.

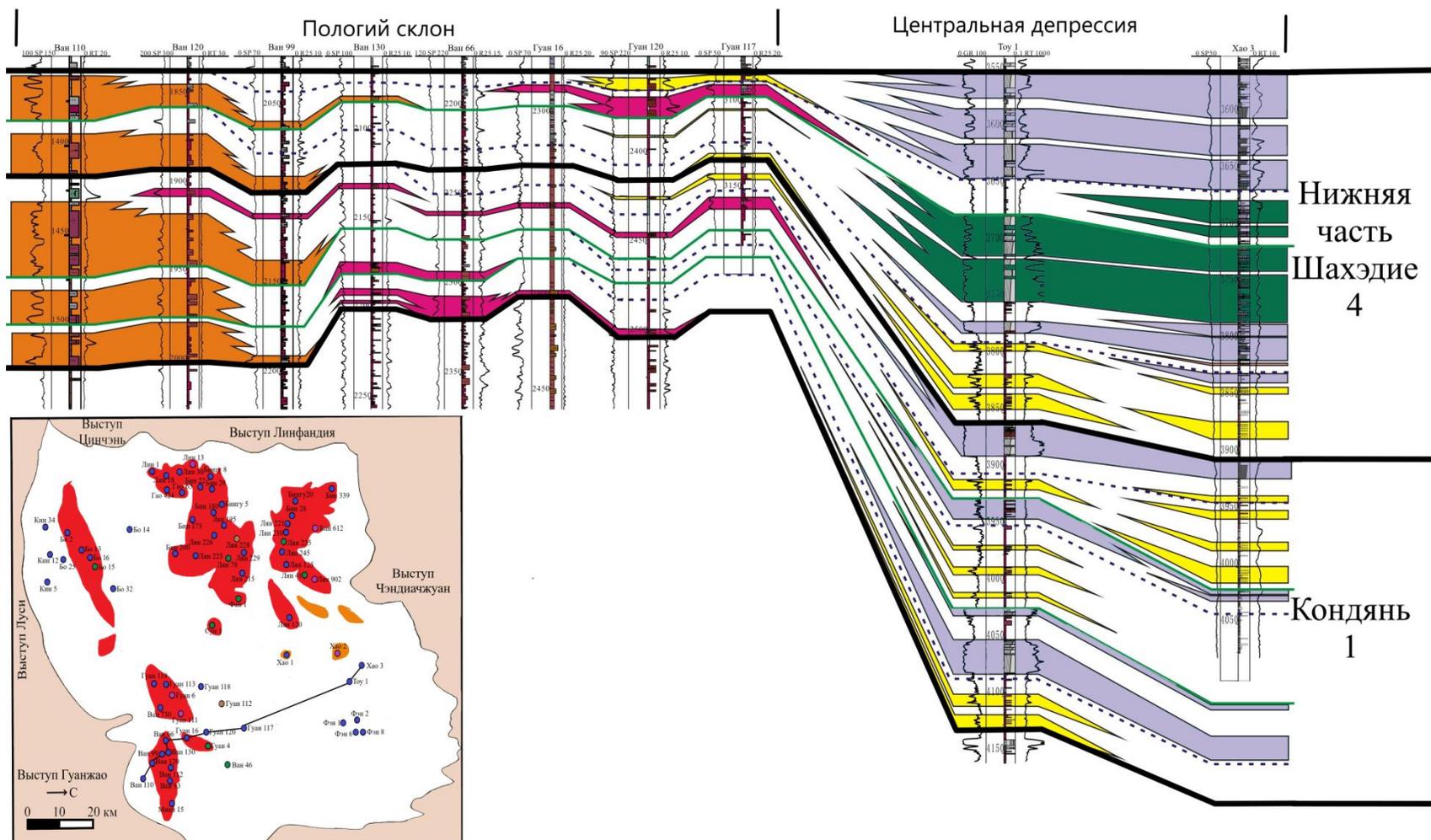


Рисунок 31. Фациальный разрез базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (с юго-востока на север)

Условные обозначения см. на рисунке 32.

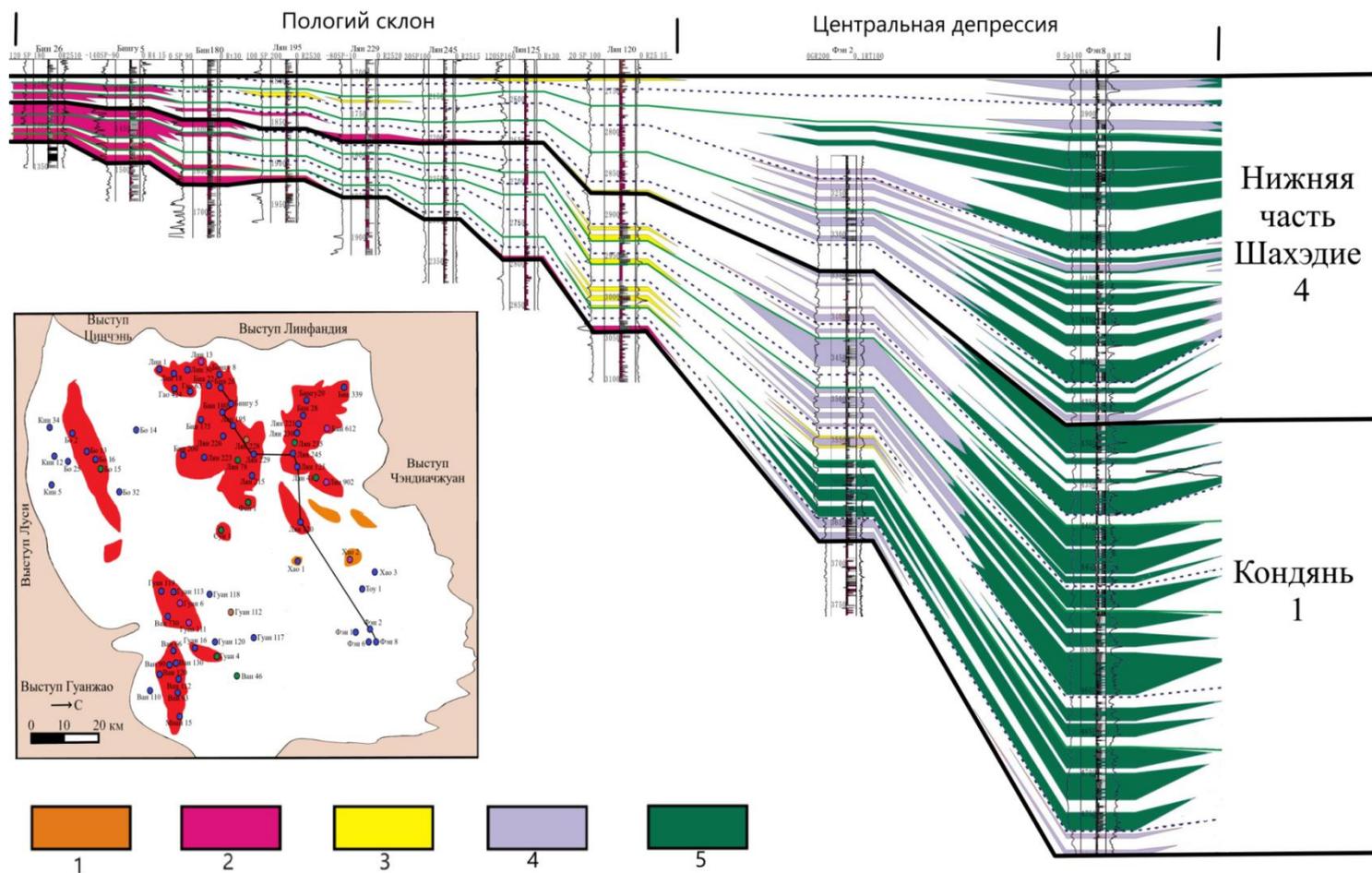


Рисунок 32. Фациальный разрез базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (с запада на северо-восток)

Условные обозначения: 1 – пролювиальные конусы выноса; 2 – фан-дельты; 3 – песчаные бары; 4 – переслаивание глинистых и эвапоритовых пород; 5 – эвапориты

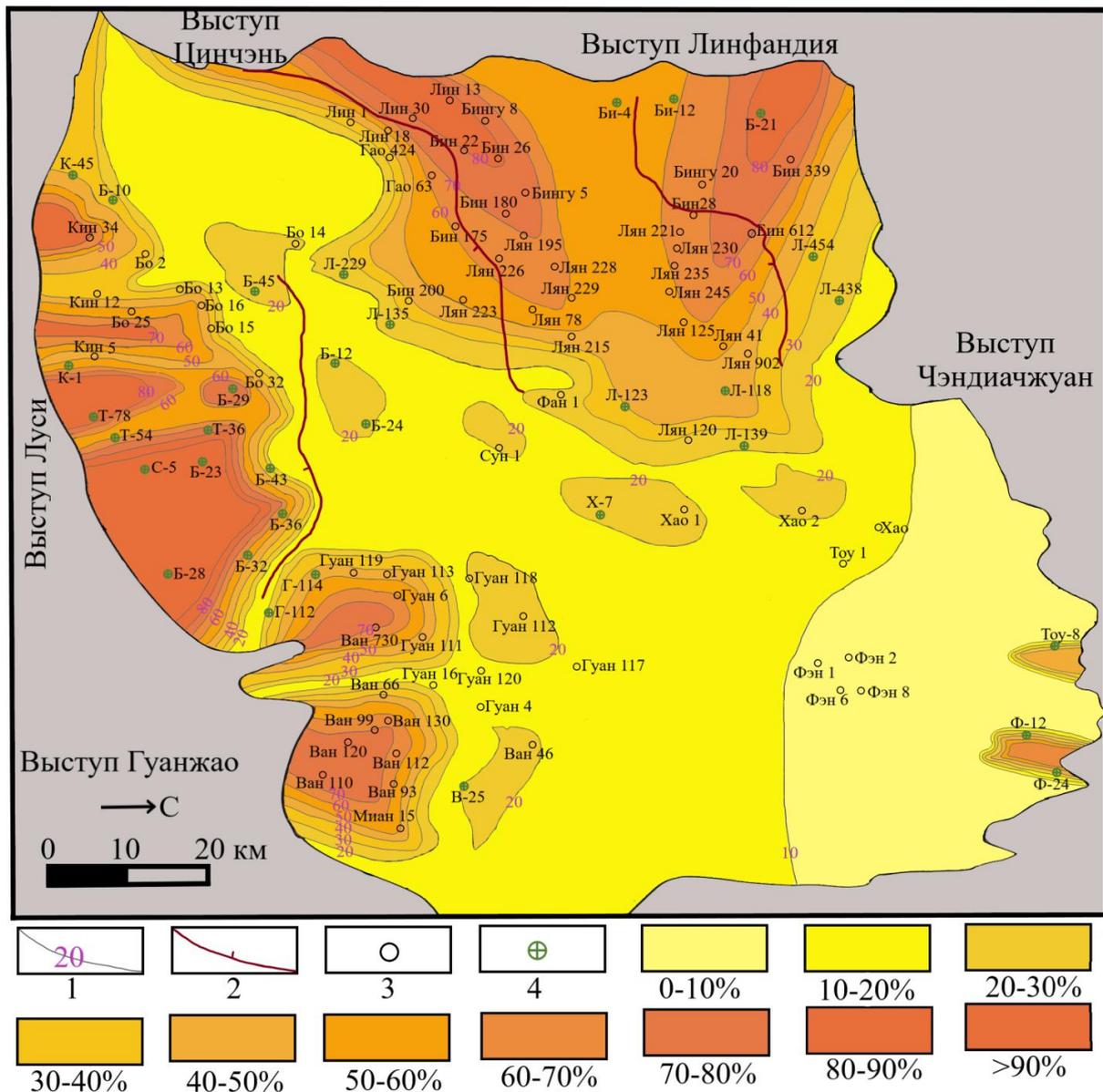


Рисунок 33. Карта коэффициента песчаности базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (Y. Gao, 2014, с дополнениями и изменениями)

Условные обозначения: 1 – изолинии коэффициента песчаности; 2 – тектонические нарушения; 3 – фактические данные по скважине; 4 – литературные данные по скважине

4.5 Модель седиментации

На основе анализа каротажных, сейсмических, геохимических данных и кернового материала, в сочетании с анализом палеогеоморфологических и осадочных особенностей, создана модель седиментации базальных отложений (рис. 35).

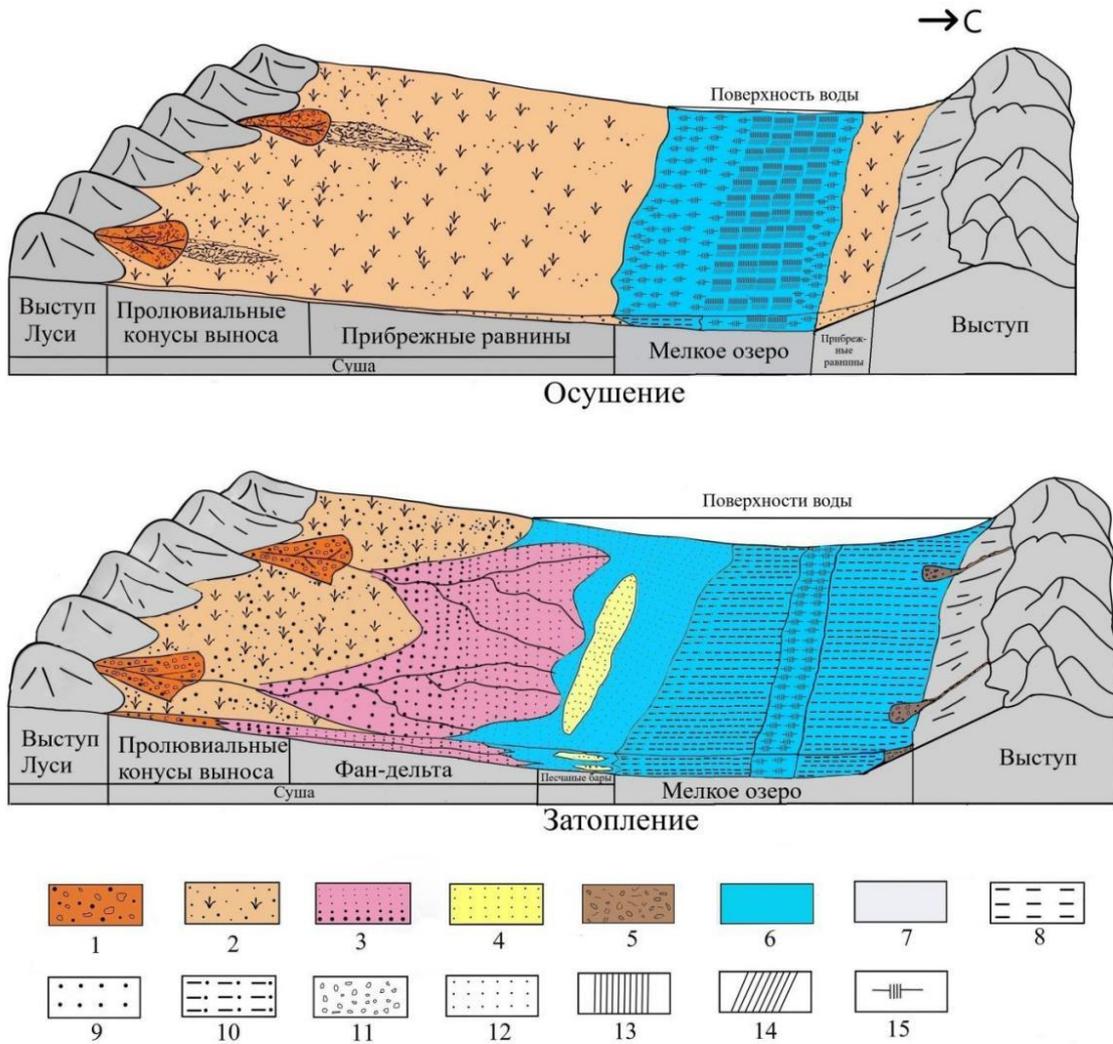


Рисунок 35. Седиментационная модель базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4

Условные обозначения: 1 – пролувиальные конусы выноса; 2 – прибрежные равнины; 3 – фан-дельты; 4 – песчаные бары; 5 – подводные конусы выноса; 6 – мелкое озеро; 7 – выступы; 8 – глинистые породы; 9 – песчаники; 10 – глинистые песчаники; 11 – гравелиты; 12 – алевролиты; 13 – гипсы; 14 – ангидриты; 15 – глинистые породы с содержанием эвапоритов

В период накопления отложений Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4, на площадь и глубину водоема в основном влияли процессы затопления. Ветры, которые дули в разных направлениях, удаляли с горных склонов тонкий глинистый и мелкоалевритовый материал. Во время повышения уровня воды на равнину помимо зерен кварца и полевых шпатов перемещались фрагменты почвы, своего рода дебрис-флоу (потоки обломков). Уровень воды в озере быстро поднимался, потоки воды несли большое количество терригенного материала, этот своеобразный набор частиц отличался слабой степенью окатанности и сортировки, он накапливался в зоне пологого склона впадины. На периферии зоны пологого склона откладывалось большое количество отложений пролювиальных конусов выноса, а внутри этой зоны развивались крупномасштабные фан-дельтовые отложения. Песчаные бары, образованные волновой деятельностью и озерными течениями, были изолированы и разбросаны по мелководью. В период затопления поступление воды превышает отток, то объем озера увеличивается, лишь в самые сильные наводнения, случавшиеся очень редко, содержание сульфат ионов в воде значительно снижалось, и поверхность фан-дельт покрывалась травянистой растительностью, о чем свидетельствуют отдельные углефицированные фрагменты гумусового облика, встречающиеся в породах.

Периодически объем воды в озере стремительно сокращался под воздействием испарения, уровень воды быстро падал, и песчаные отложения, отложившиеся в зоне пологого склона во время затопления, оказывались выведенными над поверхностью воды, что приводило к окислению, в условиях практически полного отсутствия реакционноспособного органического вещества (ОВ) железо находилось в форме оксидов и оксигидратов. Очевидно, что климатические условия предопределили облик исследуемых пород, обусловив пеструю окраску отложений с преобладанием красного цвета. В период осушения из-за меньшего сноса только пролювиальные конусы выноса отлагались на краю бассейна. В центре озера вода имела высокую соленость, что привело к образованию большого количества эвапоритов при последующих этапах испарения.

В начальный период затопления, отраженный в подошве циклита, на пологом склоне впадины накапливались крупнозернистые обломочные отложения. На фоне непрерывного подъема уровня озера зернистость осадка постепенно становилась мельче, мощность

песчаных прослоев уменьшалась. В период осушения уровень озера падал, в кровле циклита развивались относительно мощные пурпурно-красные отложения глинистых пород. От края ко внутренней части впадины размерность зерен постепенно уменьшались. В депрессионной зоне, примыкающей к поясу пологих склонов, в период затопления отлагались толщи переслаивания песчаных и глинистых пород. Толщи периода осушения характеризуются переслаиванием глинистых пород и эвапоритов. В центральной части впадины в период затопления уровень воды в озере повышался, откладывалось большое количество глинистых пород, а период осушения уровень воды опускался, озерная вода в центре котловины сильно испарялась, образуя эвапориты (гипс и ангидрит).

Выводы

1. В ходе работы были выделены 3 основных литолого-фациальных комплекса: пролювиальные конусы выноса, фан-дельты и песчаные бары, представленные терригенными отложениями, которые аккумулировались в результате действия затопления. В условиях жаркого и сухого климата под воздействием испарения в мелководных обстановках накапливалось большое количество сульфат-ионов, которые впоследствии выпадали в осадок в форме гипса и ангидрита.

2. Отложения пролювиальных конусов выноса в основном развиты по периферии зоны пологого склона. Фан-дельты выдвигались в сторону озерного мелководья, отвоевывая пространство у береговых баров. В фан-дельтовых отложениях выделяются циклиты, внутри которых наблюдается уменьшение размера зерен вверх по разрезу, в подошве циклитов наблюдаются конгломераты, крупнозернистые песчаники и т.д., в кровле – глинистые породы. Вблизи фан-дельты деятельностью волн и прибрежных течений были образованы изолированные и рассеянные баровые песчаные отложения вдоль береговой линии озера.

3. Большое количество обломочного материала, отложившегося в период затопления, оказывалось над поверхностью воды в период осушения. В условиях практически полного отсутствия реакционноспособного органического вещества (ОВ) железо находилось в форме оксидов и оксигидратов. Очевидно, что климатические условия предопределили облик исследуемых пород, обусловив пеструю окраску отложений с преобладанием красного цвета.

4. Особенности пространственного распространения различных литолого-фациальных комплексов базальных красноцветных отложений определили распределение различных типов коллекторов. Песчаные отложения фронтальной части фан-дельты, в том числе подводных русел, склон, устьевых и приустьевых баров имеют высокую минералогическую и структурную зрелость, хорошую сортировку и показывают хорошие коллекторские свойства.

Глава 5. Постседиментационные преобразования песчаных коллекторов базальных отложений

Данные, полученные при изучении кернового материала, шлифов и измерениях пористости и проницаемости песчаных отложений нижнеэоценового базального комплекса впадины Цзиян, легли в основу анализа изменений песчаников в эпигенезе. На основе полученных результатов была создана модель постседиментационного преобразования данных отложений. Вторичные преобразования (особенно в процессах диагенеза и катагенеза) оказывают большое влияние на коллекторские свойства песчаников. Диагенез – это стадия превращения образованных в седиментогенезе рыхлых осадков, накопившихся на дне седиментационных бассейнов, в плотную осадочную горную породу верхней зоны земной коры. Катагенез – дальнейшее после диагенеза преобразование осадочной горной породы по мере увеличения глубины ее захоронения под влиянием возрастающих температуры и давления (а в некоторых случаях и воздействия водных растворов и газов), вплоть до превращения начала ее метаморфизации. Вторичное преобразование пород в постседиментационных процессах может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на их коллекторские свойства (Япаскурт, 1995).

5.1 Постседиментационные процессы

Базальные отложения во впадине Цзиян залегают на больших глубинах и были сильно подвержены процессам постседиментационного преобразования, таким как уплотнение, цементация, образование новых минералов, перекристаллизация, метасоматоз, растворение и коррозия минералов, регенерация кварца и т. д.

5.1.1 Уплотнение

Процесс уплотнения пород выражается в том, что после захоронения осадка, с увеличением глубины залегания, под действием вышележащей нагрузки и гидростатического давления частицы сближаются, а пластичные компоненты вдавливаются в поры, что приводит к уменьшению общего объема осадка и ухудшению его ФЕС. В результате уменьшения объема порового пространства происходит увеличение

плотности горных пород. Процесс сопровождается изменением структуры и физических свойств осадочных образований (Сулейманова, 2002).

Впадина Цзиян отличается относительно большими глубинами и их вариативностью: на бортах впадины глубины составляют менее 1000 м, в пределах пояса пологого склона – 2000-3000 м, а в центре – более 3000 м. В области небольших глубин для пород характерны такие типы контакта зерен, как точечные и линейные, постепенно с глубиной начинают преобладать вогнуто-выпуклые и шовные.

Общими чертами уплотнения коллекторов в базальных отложениях являются:

1) Перегруппировка частиц: уплотнение осадочных горных пород происходит в результате сближения и перегруппировки их составных частей или вследствие заполнения пустот минеральными новообразованиями. В начальные этапы катагенеза уплотнение происходит в результате перегруппировки частиц, более плотной их укладки под действием литостатического (горного) давления, возрастающего по мере увеличения глубины залегания осадочных толщ. Максимальное уплотнение пород за счет перегруппировки частиц и более плотной их укладки в каждом конкретном регионе, в зависимости от литологического состава, формы, прочности, отсортированности, характера поверхности частиц, происходит на разных глубинах.

2) Пластичные частицы, такие как обломки глинистых пород, слюда и т. д., подвергаются пластической деформации при уплотнении (Zhang и др., 2003);

3) Твердые частицы, такие как полевые шпаты и кварц, разрушаются и растрескиваются при уплотнении, под действием тектонического напряжения в зернах образуется множество трещин неправильной формы (Zhang и др., 2003);

4) Образование тектонических трещин: после полуконсолидации или консолидации горных пород при уплотнении могут образовываться тектонические трещины. Некоторые из этих трещин оказываются заполнены новообразованными минералами, некоторые остаются полностью проводящими и играют роль каналов миграции углеводородных флюидов.

Потеря пористости при уплотнении необратима, поэтому уплотнение оказывает разрушительное воздействие на коллекторские свойства горных пород. Когда пластовое давление или тектоническое напряжение превышают гидростатическое давление, в точке

контакта частиц могут возникать деформации или начаться процессы растворения. Это явление растворения частиц из-за чрезмерного уплотнения может происходить в обломочных зернах, таких как кварц и полевой шпат. В изучаемых отложениях растворение чаще встречается в зернах кварца и проявляется в виде образования вогнуто-выпуклых или шовных контактов между зернами.

5.1.2 Минеральные новообразования

Минеральные новообразования широко распространены в осадочных породах. Вторичные образования чаще всего представлены породообразующими минералами – кварцем, кальцитом, полевыми шпатами, кислыми плагиоклазами, халцедоном, гидрослюдой, хлоритом и др. Они образуются за счет веществ, растворенных в подземных водах, и газообразных соединений, содержащихся в пустотном пространстве пород.

Причина образования новых минералов – нарушение физико-химического равновесия в системе из-за поступления мигрирующих флюидов в иные термобарическую и геохимическую обстановки (Хіан и др., 2004). Кроме того, новые соединения возникают при взаимодействии минеральных и органических соединений с подземными водами. В эпигенезе распространенными новообразованными минералами являются в основном карбонатные, глинистые, кремнистые и сульфатные минералы.

1) Карбонатные минералы

Карбонатные минералы в исследуемых отложениях в основном представлены кальцитом и доломитом, которые растут по краям обломочных зерен и существуют в виде цемента, что указывает на их более раннее образование. Мигрирующие поровые воды непрерывно приносили растворенную углекислоту, которая является основным компонентом новообразованных карбонатных минералов. В то же время поровая вода растворяла биологические оболочки и карбонатные частицы в терригенных отложениях, и растворенные вещества впоследствии переотлагались с образованием новых карбонатных минералов.

Ранние кальцит и доломит в основном образовались на поздней стадии диагенеза, в небольшом количестве, и часто замещались феррокальцитом, анкеритом и др. В целом, чем выше структурная зрелость и лучше сортировка, тем больше было образовано

минералов кальцита и доломита. Поздние карбонатные минералы представлены в основном феррокальцитом и анкеритом. Чаще всего они образуются после регенерации кварца, в основном на средней стадии катагенеза.

Поздний кальцит часто замещен другими зернами в мелкокристаллической форме и нередко проявляется в виде метасоматоза с другими минералами. Поздний феррокальцит заменяет обломочные зерна и карбонатные минералы, образованные на ранней и средней стадиях, особенно характерен метасоматоз плагиоклаза и экструзивного детрита.

2) Глинистые минералы

Глинистые минералы в базальных отложениях в основном представлены хлоритом, иллитом, смешаннослойным иллит-монтмориллонитом, каолинитом и др.

Хлорит. Хлорит является аутигенным минералом, самое высокое его содержание наблюдается в отложениях свиты Кондянь. Содержание хлорита обычно составляет от 0,5% до 2%, в среднем 1,4%, а относительное содержание хлорита в глинистых минералах – от 7% до 70%, в среднем 33,7%. Хлорит часто нарастает на поверхности обломочных частиц в виде пленок или колец, толщина колец хлорита составляет 1-3 мкм. Хлорит можно увидеть под микроскопом в виде игольчатых агрегатов, растущих к центру пор, кроме того, типичны также цветкообразные, листовидные и помпонообразные кристаллы хлорита, заполняющие поры.

Иллит. Содержание иллита в коллекторах базальных отложений обычно составляет 0,5-3% при среднем содержании 1,3%, относительное содержание иллита в глинистых минералах составляет в среднем 28,2% и имеет тенденцию к увеличению с увеличением глубины. Иллит может присутствовать в составе смешаннослойных минералов или образоваться путем изменения калиевого полевого шпата (Жуковская, 2000). Наиболее очевидной особенностью иллита в период захоронения является то, что его структура упорядочивается с увеличением глубины захоронения. Под микроскопом можно увидеть, что иллит растет в виде чешуйчатых перемычек и разделяет межзерновые поры, изредка иллит в виде сетчатых и изогнутых тонких пластин ориентируется или покрывает поверхность частиц в виде тонкой пленки.

Каолинит. Содержание каолинита в базальных отложениях относительно низкое, и наблюдение пород в шлифах показывает, что содержание каолинита обычно составляет

менее 2%, и он распределяется пятнами. Под микроскопом монокристаллы каолинита имеют форму псевдогексагональных пластинок и часто образуют червеобразные агрегаты. Между кристаллами каолинита часто имеется большое количество остаточных пор, пор растворения и микропор, которые хорошо видны в шлифах.

Для образования вторичных глинистых минералов требуются определенные условия. В эпигенезе образование аутигенных минералов может осуществляться за счет обмена ионами внутреннего происхождения. Катионы металлов, поступающие с водой из выше- и нижележащих глинистых пород также играют важную роль в образовании минералов. Образование иллита происходит в богатых калием щелочных условиях, тогда как аутигенный каолинит образуется в условиях кислой среды. Глинистые минералы оказывают большое влияние на ФЭС песчаных коллекторов: аутигенные иллит, хлорит и иллит-монтмориллонитовые глинистые минералы играют роль в сокращении порового пространства песчаника.

3) Кремнистые минералы

Кварц. В базальных отложениях юго-восточной части впадины Цзиян широкое распространение получил процесс регенерации кварца и образование межзернового аутигенного кварца. Регенерация происходит путем нарастания кварца на поверхности кварцевых частиц за счет растворенного в пластовой воде кремнезема (Yang, Chen, 2004). В то же время регенерация кварца сопровождается растворением полевых шпатов. С точки зрения типа породы явление регенерации кварца в аркозовых песчаниках более широко распространено.

Полевые шпаты. В исследуемых отложениях широко распространено образование аутигенных полевых шпатов. В песчаниках это часто проявляется в виде вторично-укрупненных краев обломков полевых шпатов или в виде мелких идиоморфных кристаллов заключенных в порах породы. Изучение пород в шлифах показало, что содержание аутигенных полевых шпатов в песчаном коллекторе может достигать 0,79%. Под микроскопом хорошо видно, что аутигенные полевые шпаты заполняют межзерновые поры и поры растворения скелетных частиц.

4) Сульфатные минералы

В центральной части впадины Цзиян широко распространены сульфатные минералы,

в основном гипс и ангидрит, заполняющие первичные и вторичные поры. Образование эвапоритов связано с высокой интенсивностью испарения в условиях аридного климата.

5.1.3 Метасоматоз и перекристаллизация

Метасоматоз – распространенный постседиментационный процесс, в результате которого происходит замещение новыми минералами обломочных зерен, их краев, или цементов пород (Лебедев, 1992). Это явление происходит в ответ на различные изменения физико-химических условий системы (температура, давление, рН, Eh и т.д.): исходные минералы или минеральные компоненты в изменившихся условиях могут потерять стабильность, что приводит к их растворению или трансформации с образованием новых минералов или минеральных комбинаций, которые устойчиво существуют в новых физических и химических условиях (Сахибгареев, 1989).

В изучаемых отложениях наблюдаются различные виды метасоматоза: замещение обломочных частиц карбонатными минералами (кальцит, доломит, феррокальцит и анкерит замещают кварц, частицы полевых шпатов и регенерационные каймы и т. д.), метасоматоз между карбонатными минералами (доломит замещает кальцит, феррокальцит замещает кальцит, анкерит замещает доломит и кальцит и т. д.). В то же время встречаются замещение гипсом и ангидритом регенерационных полевых шпатов и кварца.

Метасоматоз между кремнеземом и кальцитом очень распространен в районе исследований. Взаимная трансформация между ними в основном связана с рН и температурой системы. При значениях рН менее 9 растворимость кремнезема остается неизменной, но кальцит легко растворяется при рН менее 8. При таких условиях кальцит в обломочной породе будет растворяться, а кремнезем останется стабильным, что приведет к замещению кальцита кварцем. При рН больше 9 произойдет растворение кремнезема и осаждение кальцита.

В пределах района исследований часто встречается замещение калиевых полевых шпатов кальцитом и другими карбонатными минералами, однако редко встречается замещение кальцитом плагиоклаза. Кальцит, замещающий края и кристаллы полевых шпатов, часто имеет неправильную форму. Возможность метасоматоза в случае кальцита и полевых шпатов зависит от многих факторов. Оба минерала более стабильны при

повышении рН и легко растворяются при его снижении, однако растворимость полевого шпата увеличивается с повышением температуры, в то время как растворимость карбоната уменьшается. В то же время концентрация ионов в растворе также будет иметь большее влияние на полевые шпаты, которые могут подвергаться растворению под влиянием растворов, богатых ионами кальция.

Явление перекристаллизации в породах района исследований в основном встречается в цементе обломочных пород. При воздействии напряжения на карбонатные минералы часто происходит перекристаллизация и разрушение кристаллизационной решетки. Зерна пород, подверженных этим процессам часто характеризуются волнообразным погасанием. В процессе перекристаллизации в обломках могут оставаться включения и остатки исходных зерен.

5.1.4 Процесс растворения и коррозии минералов

Растворение обломочных зерен и цементов песчаных пород в процессе эпигенеза может привести к образованию большого количества вторичных пор, в результате чего может наблюдаться улучшение ФЕС коллекторов.

Вторичное порообразование в основном связано с влиянием кислых веществ (органических кислот и фенолов), которые в большом количестве образуются в процессе созревания керогена. В диапазоне 100-130 °С кислые вещества регулируют рН пластовой воды, в результате чего может осуществляться процесс растворения полевых шпатов и карбонатов.

В исследуемых отложениях можно наблюдать результат воздействия сложных процессов растворения и коррозии минералов. Частицы обломков и ранние цементы могут полностью или частично растворяться, образуя вторичные поры, но образующиеся позже цементы могут заполнять вторичные поры, образовавшиеся на ранней стадии. В результате воздействия постседиментационных процессов растворение минералов и цементов и вторичная цементация могут чередоваться в результате колебаний глубин залегания, вызванных тектоническими процессами, и различных изменений физико-химических условий в пределах толщ пород, что приводит к образованию сложных структур порового пространства в песчаниках.

В образцах исследуемых отложений наиболее часто наблюдается растворение частиц полевых шпатов, а также регенерационного кварца, реже карбонатных цементов, пирита и обломков пород.

5.2 Стадийность вторичных преобразований

Анализ большого количества геохимических данных и материала шлифов позволил определить, что большая часть нижнеэоценовых базальных отложений юго-восточной части впадины Цзиян находятся на стадиях протокатагенеза (градации ПК₁-ПК₃) и мезокатагенеза (градации МК₁-МК₃).

На глубинах менее 1200 м отложения находились на стадиях диагенеза и начала катагенеза (стадия ПК), а пластовые палеотемпературы не превышали 65 °С. В это время основными процессами являлись уплотнение и дренирование. Анаэробные бактерии разлагали SO₄²⁻ в органическом веществе и поровой воде с выделением органических кислот, H₂S, CO₂ и др. Большинство образовавшихся в этот период органических кислот было разрушено бактериями, что помешало увеличению кислотности пластовой воды. Уплотнение в диагенезе и ПК₁ относительно слабое – в исследуемых породах, находящихся на этом этапе преобразования, сохранилось большое количество первичных пор, местами видны поры, образовавшиеся в результате растворения полевого шпата, частицы в основном находятся в точечном и линейном контакте (рис. 36 А). Когда глубина залегания превышала 1000 метров, в больших количествах начинали формироваться ранние карбонатные минералы, чаще всего кальцит и доломит, которые в некоторой степени тормозили процесс уплотнения (рис. 36 Б). При приближении к центру бассейна щелочность пластовой воды повышалась и вместе с этим усиливалась цементация пород.

При увеличении глубины залегания процесс уплотнения продолжал усиливаться, породы вошли в стадии ПК₂-ПК₃, пластовые палеотемпературы здесь не превышали 75 °С. В это время органическое вещество в нефтематеринской породе начинало разлагаться с образованием кислых веществ, которые, попадая в обломочную породу, активировали процесс растворения полевых шпатов и карбонатных минералов (рис. 36 В). В породах на этих градациях катагенеза также распространена регенерация кварца. При глубине залегания более 2000 м и палеотемпературах выше 75°С разложение органического

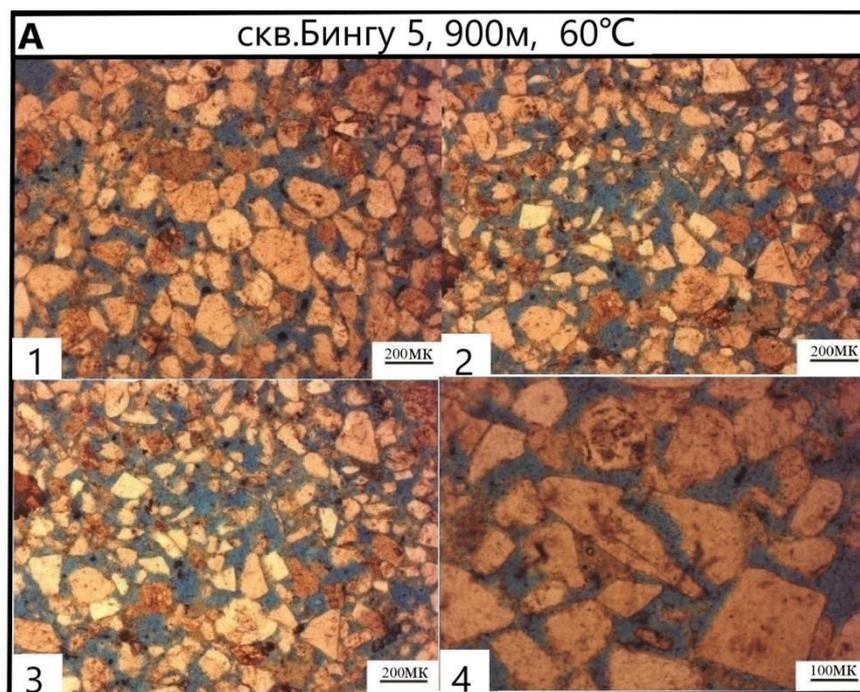
вещества становится более интенсивным, кислотность пластовой воды продолжает увеличиваться, полевые шпаты растворяются в больших количествах, ранние цементы, кальцитовый и доломитовый, так же растворяются или постепенно превращаются в более поздние феррокальцитовый и анкеритовый (рис. 36 Г). Глинистые минералы исследуемых пород на данной стадии преобразования представлены в основном каолинитом, иллитом и смешаннослойными минералами.

Базальные отложения, преобразованные до стадии МК, достигли палеоглубин залегания более 2700м и палеотемператур в пределах 130 °С-190 °С. При постоянном увеличении глубины и температуры, процессы цементации и уплотнения оказали значительное воздействие на породу: ранние поры растворения могут быть заполнены поздними цементами, частицы находятся в линейном и вогнуто-выпуклом контакте, большое количество неустойчивых компонентов, таких как плагиоклаз, калиевый полевой шпат, обломки пород и цементы, растворены кислыми флюидами. Встречаются зерна с многоэтапной (2-3 этапа) регенерацией кварца (рис. 36 Д). При повышенной щелочности пластового флюида кварц также мог быть растворен.

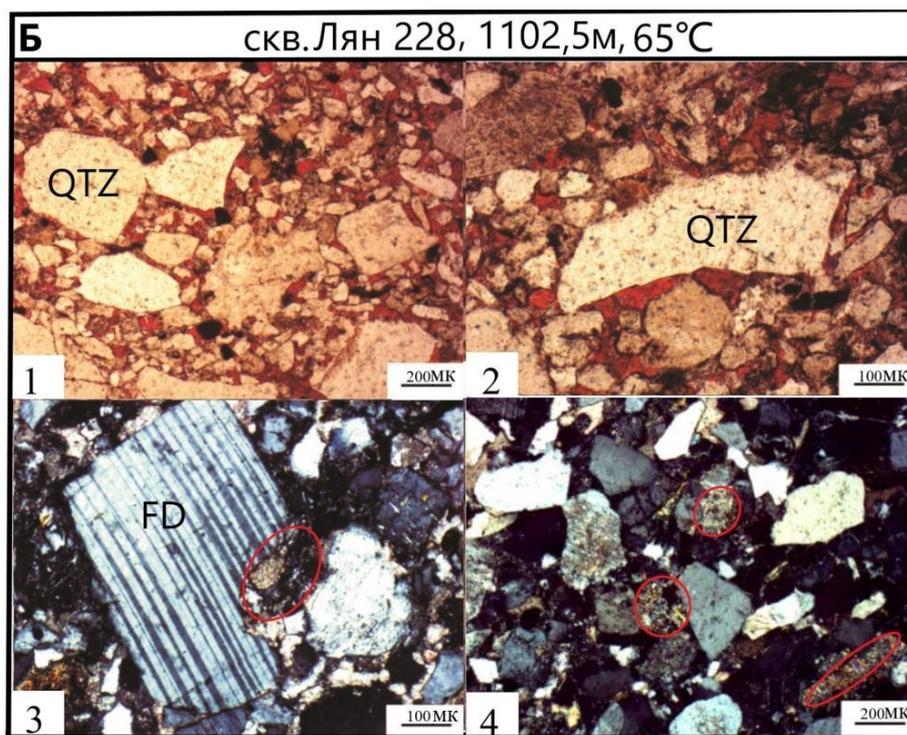
Песчаники, преобразованность которых соответствует градации МК₃, характеризуются максимальным уплотнением, первичные поры в них почти полностью исчезают, а пустотное пространство в основном представлено вторичными порами (рис. 36 Е). Основным аутигенным минералом стадии МК₂-МК₃ является кварц, также наблюдается регенерация полевых шпатов. Глинистые минералы в основном представлены иллит-хлоритом.

Песчаные породы нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цзиян в эпигенезе испытали относительно разнообразные изменения. При глубине залегания менее 1500 м в породах присутствуют в основном первичные поры. По мере увеличения глубины залегания начинают появляться вторичные поры. Когда глубина превышает 2700 м, вторичные поры становятся основным элементом пустотного пространства коллекторов. Несмотря на то, что в изученных породах присутствуют признаки растворения минералов, требуются определенные условия (они будут представлены позже), которые обеспечат образование вторичных пор в том объеме, который окажет значительное влияние на фильтрационно-емкостные свойства пород.

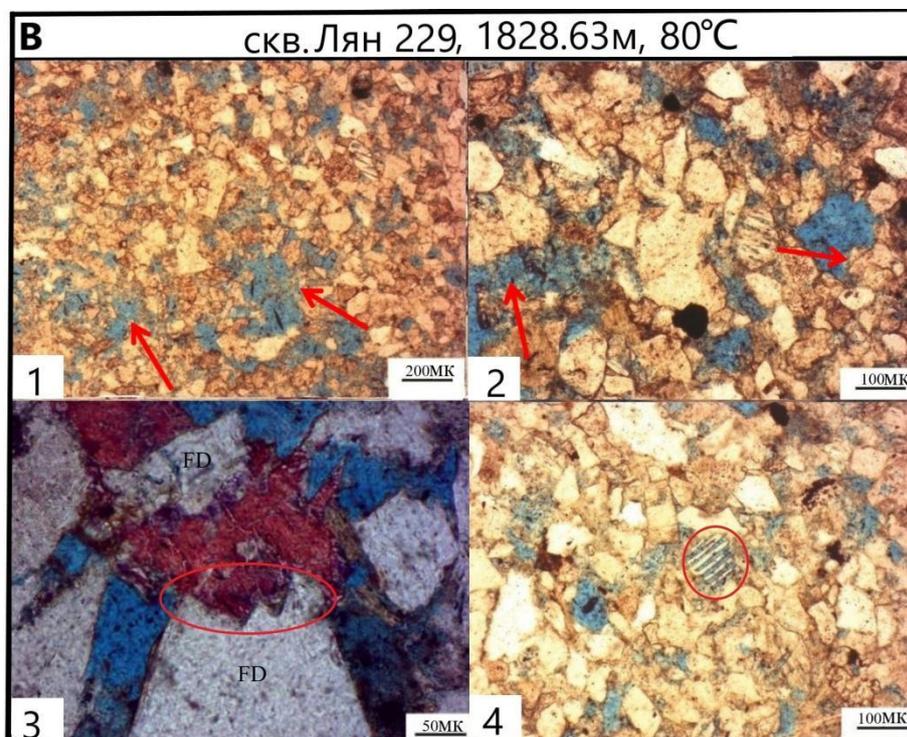
Процесс уплотнения приводит обломочные частицы в тесный контакт, а цементация способствует образованию большого количества аутигенных минералов и заполнению порового пространства. В связи с образованием различных аутигенных минералов первичные межзерновые поры в разной степени редуцируются. Влияние уплотнения, цементации и аутигенных минералов, образующихся при цементации, на коллектор в основном отрицательное, и оно напрямую снижает пористость и проницаемость песчанников.



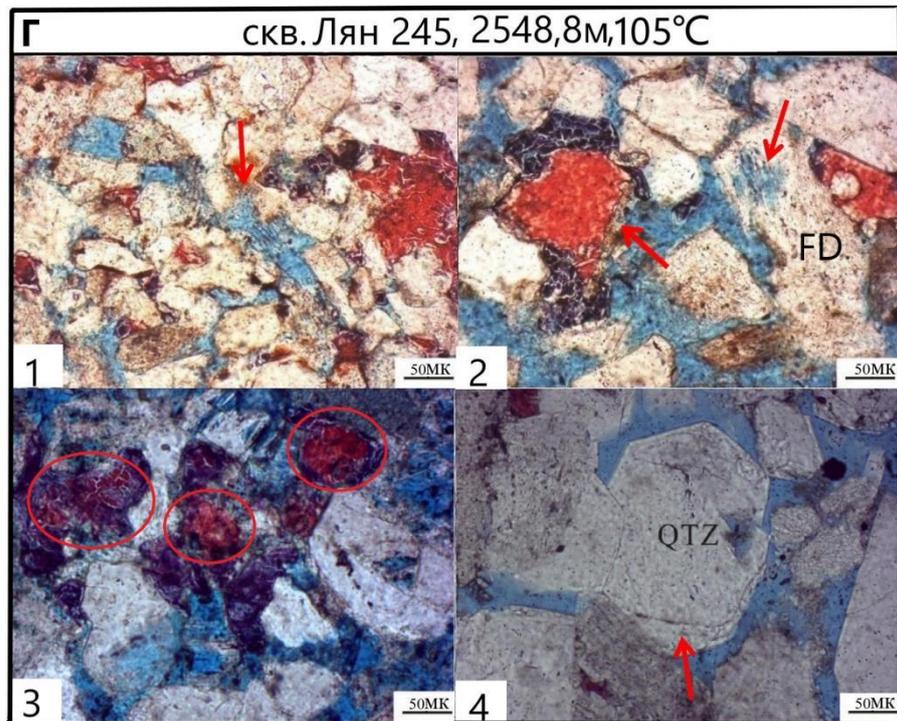
1,2,3,4 – песчанники с преобладанием первичных пор в структуре пустотного пространства



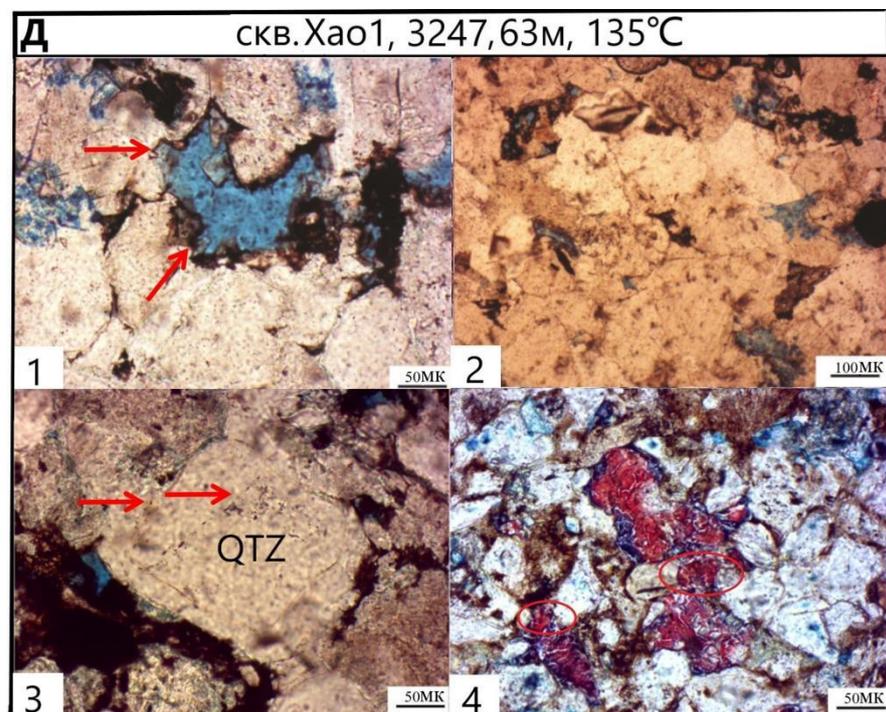
1,2 – карбонатный цемент: заполнение порового пространства кальцитом; 3 – замещение полевого шпата доломитом; 4 – заполнение порового пространства доломитом



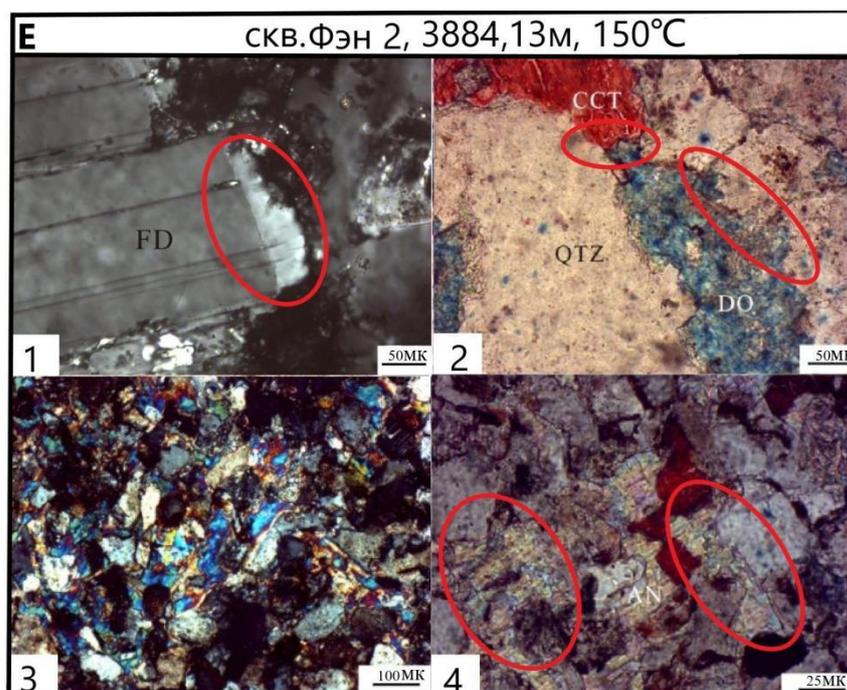
1,2,4 – поры растворения в полевых шпатах; 3 – замещение полевых шпатов кальцитом



1 – поры растворения в полевых шпатах; 2 – поры растворения в полевых шпатах и кальците; 3 – карбонатный цемент: феррокальцит; 4 – регенерация кварца



1 – поры растворения в полевых шпатах; 2 – сильное уплотнение; 3 – многоэтапная регенерация кварца; 4 – замещение полевого шпата анкеритом



1 – регенерация полевого шпата; 2 – замещение кальцита и полевого шпата доломитом; 3 – гипсовый цемент; 4 – замещение полевого шпата гипсом

Рисунок 36. Стадийность вторичных преобразований песчаников базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (QTZ- кварц, FD-полевой шпат, ДО-доломит, CCT-кальцит)

5.3 Влияние постседиментационных процессов на формирование коллекторских свойств песчаных тел

Базальные отложения Кондянь-1 и нижней Шахэдие-4 в районе исследований представляют собой переслаивание песчаников и глинистых пород. Литологические особенности отложений, а также мощность коллекторских прослоев оказали большое влияние на протекание различных постседиментационных процессов. С увеличением глубины залегания большое количество катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} вместе с водой поступало в песчаные тела через подстилающие и перекрывающие вмещающие породы, что привело к плотной цементации верхней и нижней частей этих песчаных тел (Wang и др., 2013). Концентрированность щелочной пластовой воды уменьшалась от края песчаного тела к его внутренней части, в результате чего мы видим в пределах одного мощного песчаного тела наилучшие коллекторские свойства в средней части и

постепенное их ухудшение к верхнему и нижнему краям. Если при большой мощности в середине песчаного тела еще сохраняется большое количество первичных пор, то при небольшой (меньше 10 метров) – тело оказывается полностью сцементировано (рис. 37).

Базальные отложения в основном рассматриваются в качестве коллекторских толщ. Нефтегазоматеринские породы, которые могли генерировать флюиды, мигрирующие в исследуемые толщи в основном распространены в верхней части Шахэдие-4. При достижении пластовых температур значений более 75°C, происходит активное преобразование органического вещества с выделением большого количества кислых веществ (Yuan и др., 2012), которые, как было отмечено выше, могут служить катализатором процессов вторичного порообразования. Однако кислые вещества не могут напрямую поступать в обломочные породы, и для активации данного процесса необходимо наличие разрывных нарушений, выступающих в роли каналов миграции, от нефтематеринской породы к коллектору. При большой мощности песчаного тела поры в средней его части могут играть роль каналов миграции кислых веществ. В маломощные песчаные тела, плотно сцементированные, кислым веществам трудно проникнуть, что выражается в меньшем развитии вторичных пор в коллекторе (рис. 38).

Исходя из всего вышесказанного, можно сделать вывод, что для того, чтобы песчаное тело претерпело значимые преобразования в эпигенезе, необходимо выполнение двух условий: 1) мощность песчаного тела должна быть относительно велика; 2) необходимо наличие крупных разрывных нарушений, соединяющих песчаные тела и нефтематеринские породы.

Мощность песчаных тел, окислительно-восстановительные (Eh) и кислотно-щелочные (pH) условия в разных районах юго-восточной части впадины Цзиян различны, в связи с чем вариативна интенсивность вторичных преобразований, и в последствии коллекторские свойства песчаных тел в изучаемом комплексе отложений.

На периферии впадины распространено большое количество пролювиальных конусов выноса, отличающихся большой мощностью и малыми глубинами залегания. Цементация и уплотнение таких отложений слабые, в структуре пустотного пространства преобладают первичные поры, вторичное порообразование не получило широкого распространения из-за отсутствия разломов, обеспечивающих сообщение с НМП. Во внутренней части пояса

пологого склона можно увидеть обширные области распространения фан-дельтовых отложений. Песчаные тела здесь относительно мощные и в щелочной среде на границах песчаных тел, по вышеописанному механизму, образуется большое количество карбонатного цемента. Также в областях распространения фан-дельтовых развиты крупные разрывные нарушения, сообщаемые с нефтегазоматеринскими породами, поэтому в средней части мощного песчаного тела в фан-дельтовых отложениях не только сохранилось большое количество первичных пор, но и активно проявились процессы вторичного поробразования, что сделало песчаные тела фан-дельт (особенно их фронтальных частей) перспективными коллекторами нефти и газа.

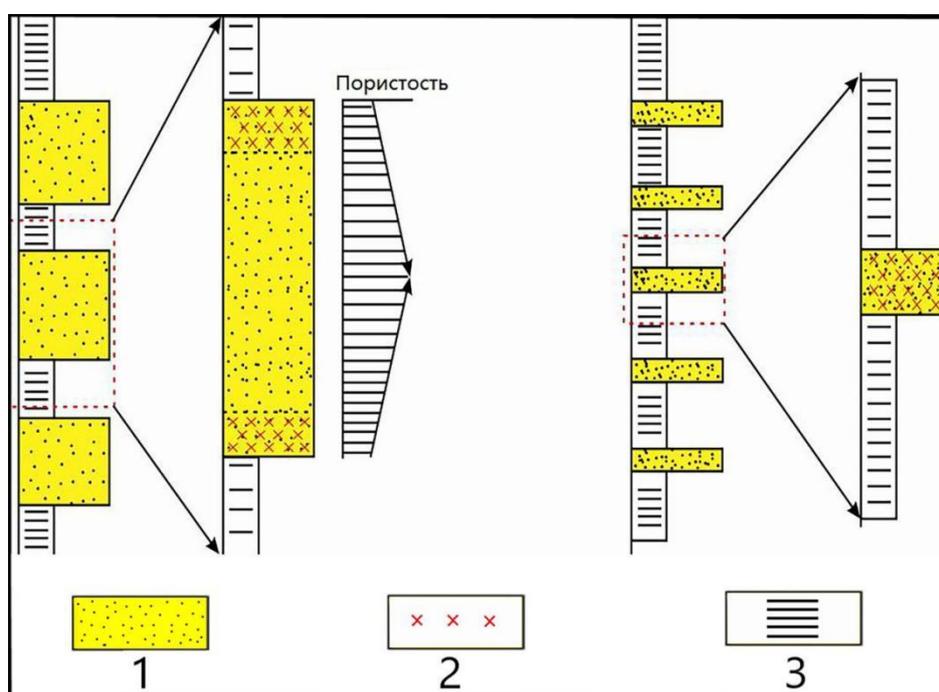


Рисунок 37. Модель цементации песчаных тел базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4

Условные обозначения: 1 – песчаники; 2 – область цементации; 3 – глинистые породы

Баровые песчаные тела расположены ближе к депоцентру впадины, в связи с чем отмечается их сильное уплотнение. Мощность этих отложений относительно невелика, сильнощелочные пластовые воды способствовали образованию большого количества карбонатных, гипсовых и ангидритовых цементов, а плотная цементация впоследствии затруднила поступление кислых веществ в песчаное тело для его преобразования.

Таким образом, песчаные тела фронтальной части фан-дельты, распределенные в зоне пологого склона, могут быть выделены в качестве наиболее перспективного объекта для поиска углеводородов в пределах области исследования.

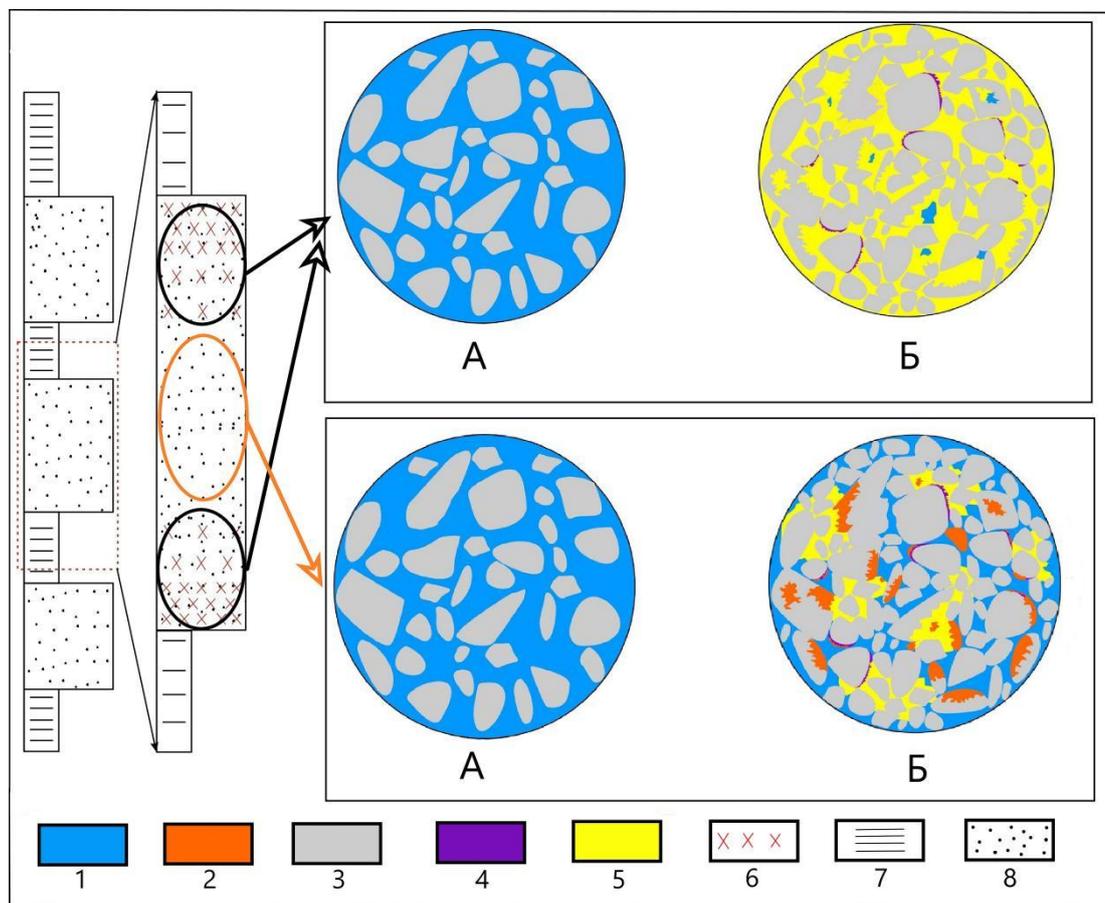


Рисунок 38. Модель преобразования песчаных тел базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4: А – до вторичного преобразования; Б – после вторичного преобразования

Условные обозначения: 1 – первичные поры; 2 – вторичные поры; 3 – зерна пород; 4 – регенерационный кварц; 5 – карбонатные цементы; 6 – область цементации; 7 – глинистые породы; 8 – песчаники

Выводы

1. Базальные отложения в юго-восточной части впадины Цзиян глубоко погружены, на их пористость и проницаемость оказывают большое влияние постседиментационные процессы, в основном проявляющиеся в эффектах уплотнения, образования новых минералов, коррозии и растворения полевых шпатов, кварца и карбонатных цементов.

2. Базальные отложения юго-восточной части впадины Цзиян по степени преобразованности находятся на стадиях протокатагенеза (градации ПК₁-ПК₃) и мезокатагенеза (градации МК₁-МК₃). При глубине залегания менее 1500 м основное влияние на ФЕС коллекторов оказывает уплотнение и дренирование. В таких отложениях преобладающим типом пустот являются первичные поры. С увеличением глубины залегания появляется большое количество карбонатных, кремнистых, гипсовых и ангидритовых цементов. Кварц, полевые шпаты и ранние цементы могли быть растворены, вследствие чего образовались вторичные поры. При глубине залегания от 1500 до 2700 м в песчаных породах присутствуют в большом количестве как первичные, так и вторичные поры. При глубине залегания свыше 2700 м, пустотное пространство песчаных пород в основном представлено вторичными порами. Встречаются вторичная или даже третичная регенерация кварца.

3. Для того, чтобы постседиментационные процессы в пределах песчаных тел получили широкое распространение и привели к положительным преобразованиям потенциальных коллекторов, необходимо соблюдение двух условий: 1) относительно большая мощность песчаного тела 2) наличие крупных разрывных нарушений, соединяющих песчаные тела и нефтематеринские породы.

4. Песчаные тела отложений фронтальной части фан-дельты, распределенные в зоне пологого склона юго-восточной части впадины Цзиян, имеют одновременно большую мощность и сообщение с нефтематеринскими толщами через крупные разломы. Эти отложения характеризуются сохранностью в ходе постседиментационных процессов большой доли первичной пористости и развитием большого количества вторичных пор. Зона пологого склона, где распространены отложения фронтальной части фан-дельты может быть использована в качестве целевого объекта будущих разведочных работ.

Глава 6. Оценка коллекторских свойств песчаников базальных отложений

6.1 Типы песчаных тел

Песчаные тела южного и западного поясов пологих склонов исследуемой территории развиты широко и крупномасштабно, их можно разделить на три типа по принадлежности к различным литолого-фациальным комплексам: песчаные тела пролювиальных конусов выноса, фан-дельты и песчаные бары. Среди этих типов песчаные тела фан-дельты и пролювиальных конусов выноса отличаются относительно большой мощностью (от 70 до 300 м), в то время как мощность баровых песчаных тел значительно меньше – обычно менее 100 м. На мощность песчаных тел также влияет различие тектонической активности в западной и южной частях впадины. Западная часть впадины во время накопления изучаемых отложений отличалась большей разломной активностью и большим количеством сносимого материала, что обусловило большую мощность (100-300 м) песчаных тел по сравнению с южной частью (70-200 м) (Рис. 39). Породы представлены в основном крупнозернистыми, среднезернистыми, средне-мелкозернистыми песчаниками. На юге разломная активность слабая, снос материала значительно меньший, мощность песчаных тел сильно варьирует по латерали, также мощности песчаных тел на юго-востоке больше, чем на юго-западе впадины. Отложения южной пологой склоновой зоны состоят в основном из конгломератов, гравелитов, гравийных и среднезернистых песчаников, размерность зерен пород в целом крупнее, чем на западе.

Мощность песчаных тел в изучаемом районе оказывает важное влияние на ФЕС коллекторов, вообще говоря, чем больше мощность песчаного тела, тем выше вероятность того, что оно может являться эффективным коллектором.

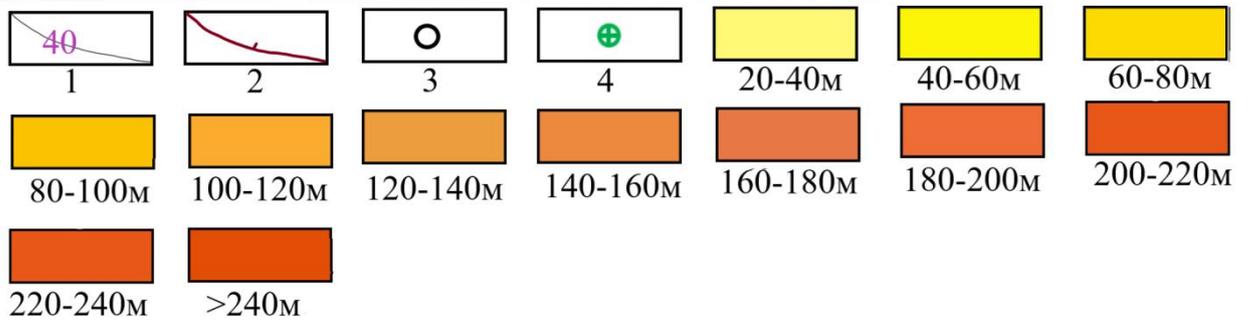
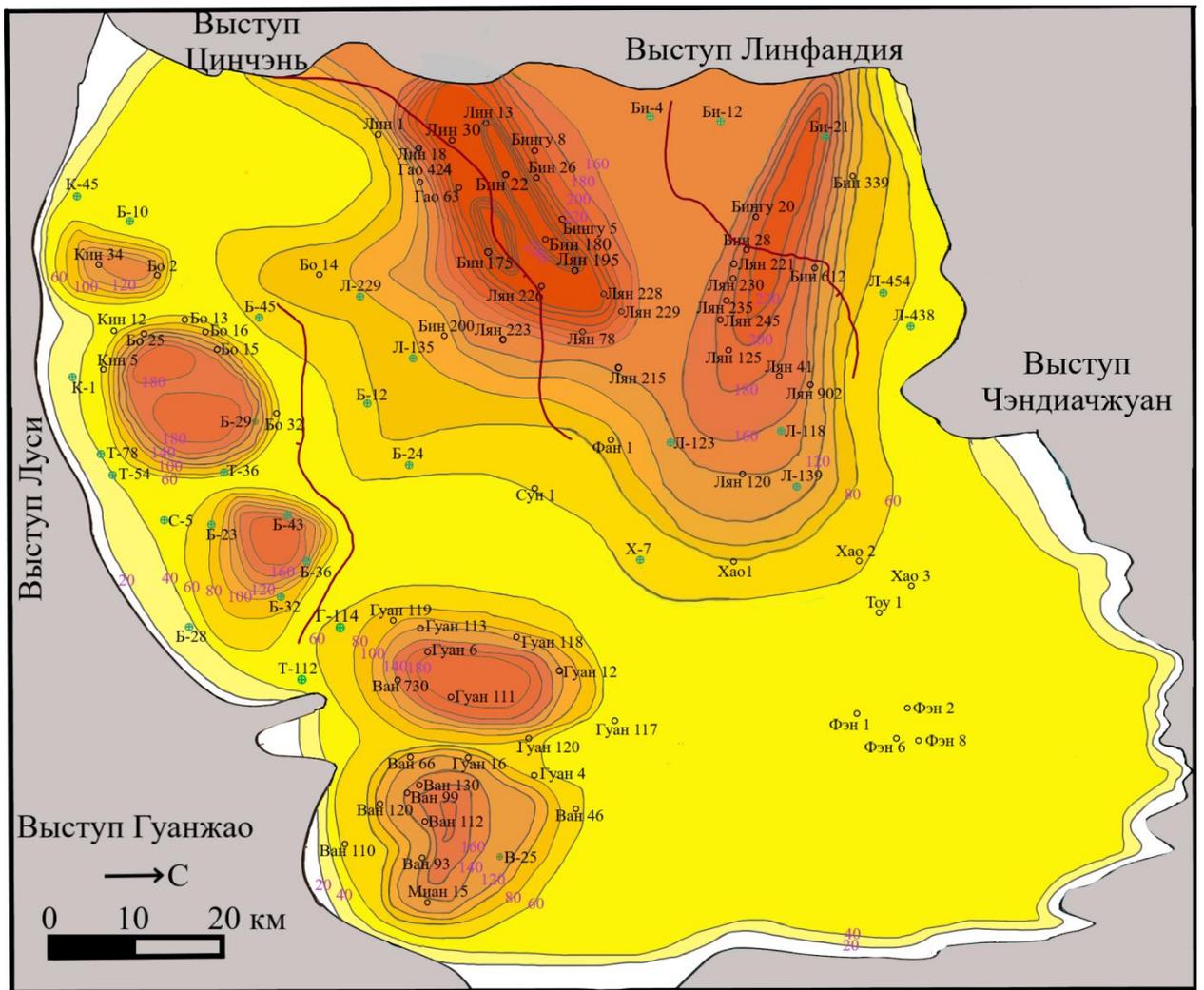


Рисунок 39. Мощности песчаных тел базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4 (Y. Gao, 2012, с изменениями и дополнениями)

Условные обозначения: 1 – изолинии мощности, 2 – тектонические нарушения;

3 – фактические данные по скважине; 4 – литературные данные по скважине

6.2 Пустотные пространства песчаных коллекторов

Пустотное пространство коллекторов базальных отложений в основном состоит из пор и трещин. Поры представлены несколькими типами: первичные, вторичные и смешанные. Вторичные поры в основном образуются за счет растворения и коррозии кварца, полевых шпатов, обломков пород и цемента, образовавшихся на ранней стадии. Смешанные поры представляют собой результат расширения первичных межзерновых пор в результате частичного растворения зерен. Изучение пород Кондянь-1 и нижней части Шахэдие-4 в шлифах показало, что в них присутствуют межзерновые, внутризерновые, сверхкрупные поры, трещины и микропоры и т.д (Тап и др., 2010).

6.2.1 Межзерновые поры

Межзерновые поры являются наиболее распространенными, они представлены как остаточными первичными порами, так и вторичными порами выщелачивания (Zhang и др., 2008). Первичные межзерновые поры относятся к пустотам, которые остаются после вторичных преобразований пород и не заполнены цементным материалом. Они имеют треугольную, четырехугольную или неправильную форму. Распределение пор неравномерное, связь между ними плохая, размер пор составляет порядка 15-75 микрон. В песчаниках, в которых развиты процессы регенерации кварца, количество остаточных межзерновых пор невелико. Межзерновые поры выщелачивания представляют собой остаточные межзерновые поры, расширенные за счет растворения обломков пород, кварца и цемента, их размер составляет порядка 10-40 микрон.

В отложениях Кондянь-1 и нижней Шахэдие-4 межзерновые пор составляют в среднем 42,6% от общего количества пор.

6.2.2 Внутризерновые поры

Внутризерновые поры также являются распространенным типом пустотного пространства песчаных пород изучаемого интервала. Их присутствие обусловлено растворением зерен полевых шпатов и обломков пород. Образование таких пор связано с растворением минеральных компонентов породы, их распределение неравномерно. Данный тип составляет 30,9% от общего количества пор в изучаемых отложениях.

6.2.3 Сверхкрупные поры

Сверхкрупные поры – пустоты, диаметр которых превышает диаметр зерен в 1,2 раза (Zhou и др., 2011). Этот тип встречается в изученных отложениях значительно реже и составляет порядка 16% от общего количества пор. Его появление часто обусловлено увеличением размеров первичных межзерновых пор за счет выщелачивания – внутри крупных пустот видны «плавающие» остатки частиц и цемента.

6.2.4 Трещины

Пустотные пространства этого типа в песчаных породах района исследований представлены тектоническими трещинами и трещинами, образовавшимися в процессе катагенеза. Также можно увидеть внутризерновые трещины, образованные в результате уплотнения твердых частиц, таких как кварц. Трещины могут не только непосредственно вмещать углеводородные флюиды, но и способствовать их миграции, а также циркуляции кислых пластовых вод, что играет положительную роль в формировании новых пустот (Zhang и др. 2008).

Пустотное пространство песчаных коллекторов в районе исследования представлено не одним преобладающим типом пор, а несколькими, существующими в различных комбинациях. Наиболее распространенным является сочетание межзерновых пор и пор растворения.

6.3 Фильтрационно-емкостные свойства песчаных коллекторов

Прогноз распространения коллекторов и оценка их фильтрационно-емкостных свойств осуществлялись по результатам интерпретации лабораторных исследований керн и данных ГИС.

В выборке образцов интервала разреза Кондянь-1 И нижней части Шахэдие-4 наиболее высокие значения пористости и проницаемости отмечаются в фан-дельтовых отложениях. Значения пористости песчаников в фан-дельтовых отложениях варьируют в широком диапазоне от 2 до 38% (среднее 20,9%), характер распределения пористости – бимодальный, с двумя пиковыми значениями 10-16% и 24-30%. Приблизительно у 5,6% образцов пористость не достигает 10%. При этом большинство образцов характеризуются

довольно высокими ее значениями, которые находятся в диапазоне 10-30%. Что касается проницаемости, то ее значения концентрируются от 5 до 500×10^{-3} мкм², лишь в 18,7% образцов были определены низкие значения проницаемости, менее 1×10^{-3} мкм². В фан-дельтовых отложениях наилучшими ФЕС обладают породы её фронтальной части (подводная часть), 90% образцов имеют пористость выше 20 % и проницаемость более 10×10^{-3} мкм², за ними следуют песчаные породы прибрежной дельтовой равнины (надводная часть) с руслами рукавов, прирусловыми барами или валами, где пористость в основном колеблется от 10 % до 15%, проницаемость менее 10×10^{-3} мкм². Наиболее удаленная часть фан-дельты (профан-дельта) имеет наихудшие ФЕС с пористостью ниже 10% и проницаемостью ниже 1×10^{-3} мкм² (рис. 40).

Отложения фаций песчаных баров обладают средне-высокой пористостью, для большей части выборки значения пористости составляют от 2 до 28% (среднее 15,8%), распределение пористости в этой области имеет очевидный пик в диапазоне значений 10-20%. Приблизительно у 13,3% образцов пористость не достигает 10%. При этом большинство образцов характеризуются значениями от средних до высоких – в диапазоне 10-20%. Значения проницаемости в основном меняется от $1-100 \times 10^{-3}$ мкм², в 20% образцов были определены низкие значения проницаемости, менее 1×10^{-3} мкм².

Отложения пролювиальных конусов выноса, распространены на краю пояса южных пологих склонов, характеризуются более низкими фильтрационно-емкостными показателями. В этом исследовании пористость выборки образцов из пролювиальных конусов выноса в основном колеблется от 6% до 15%, со средним значением 9,8%, половина образцов имеет пористость менее 12%. Проницаемость в основном распределена в пределах $0,1$ и 10×10^{-3} мкм², почти 60% образцов отличаются проницаемостью ниже 1×10^{-3} мкм². ФЕС разных частей пролювиальных конусов выноса различны: отложения средней части представлены в основном гравелитами и крупнозернистыми песчаниками, умеренно отсортированными и имеющими пористость более 10%, характеризующимися лучшими ФЕС, чем отложения проксимальной и дистальной часть конусов выноса с пористостью менее 10% и проницаемостью менее 1×10^{-3} мкм² (рис. 41).

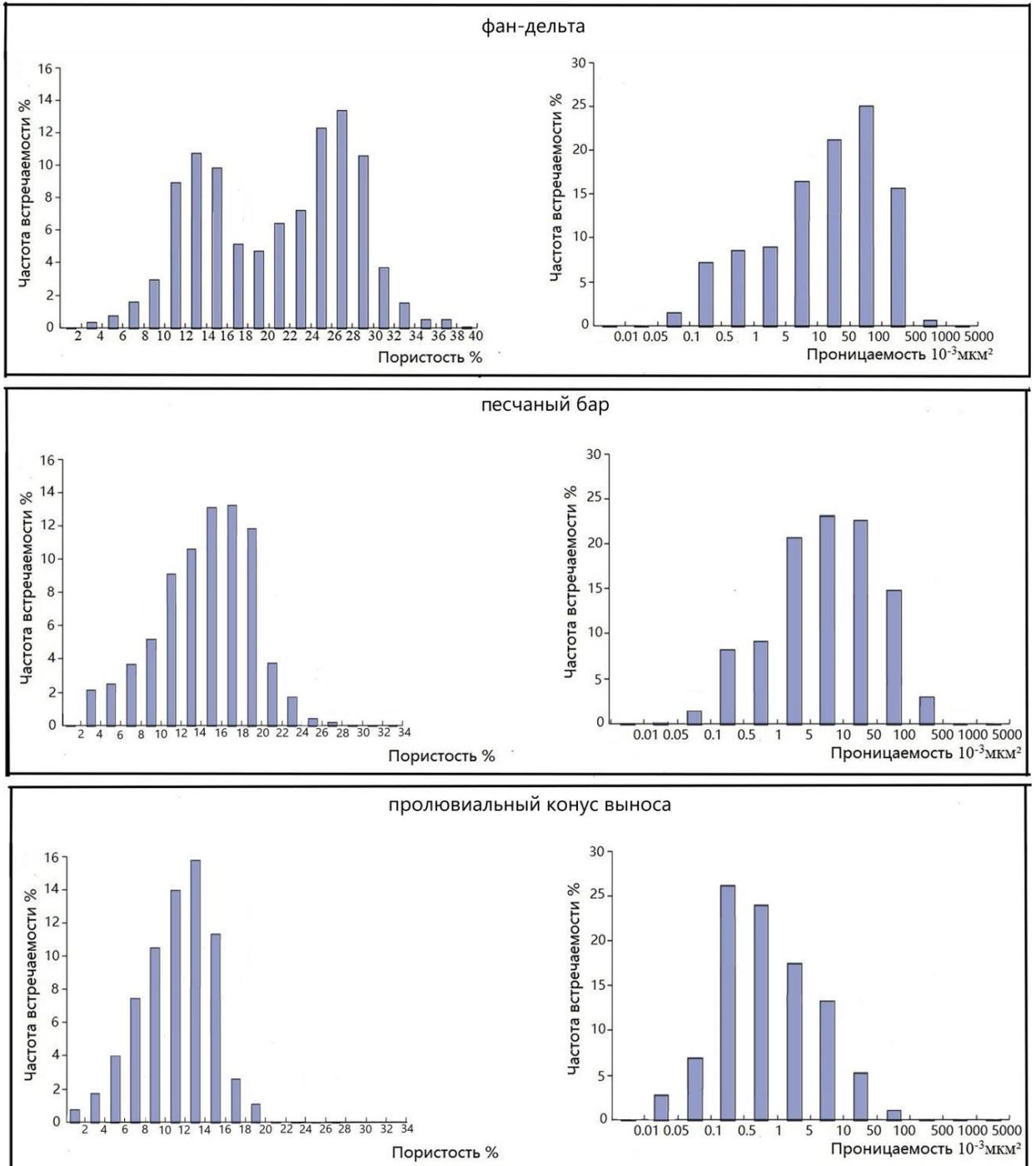


Рисунок 40. Распределение пористости и проницаемости в песчаных коллекторах по фациям базальных отложений Кондянь-1 - нижняя часть Шахэдие-4

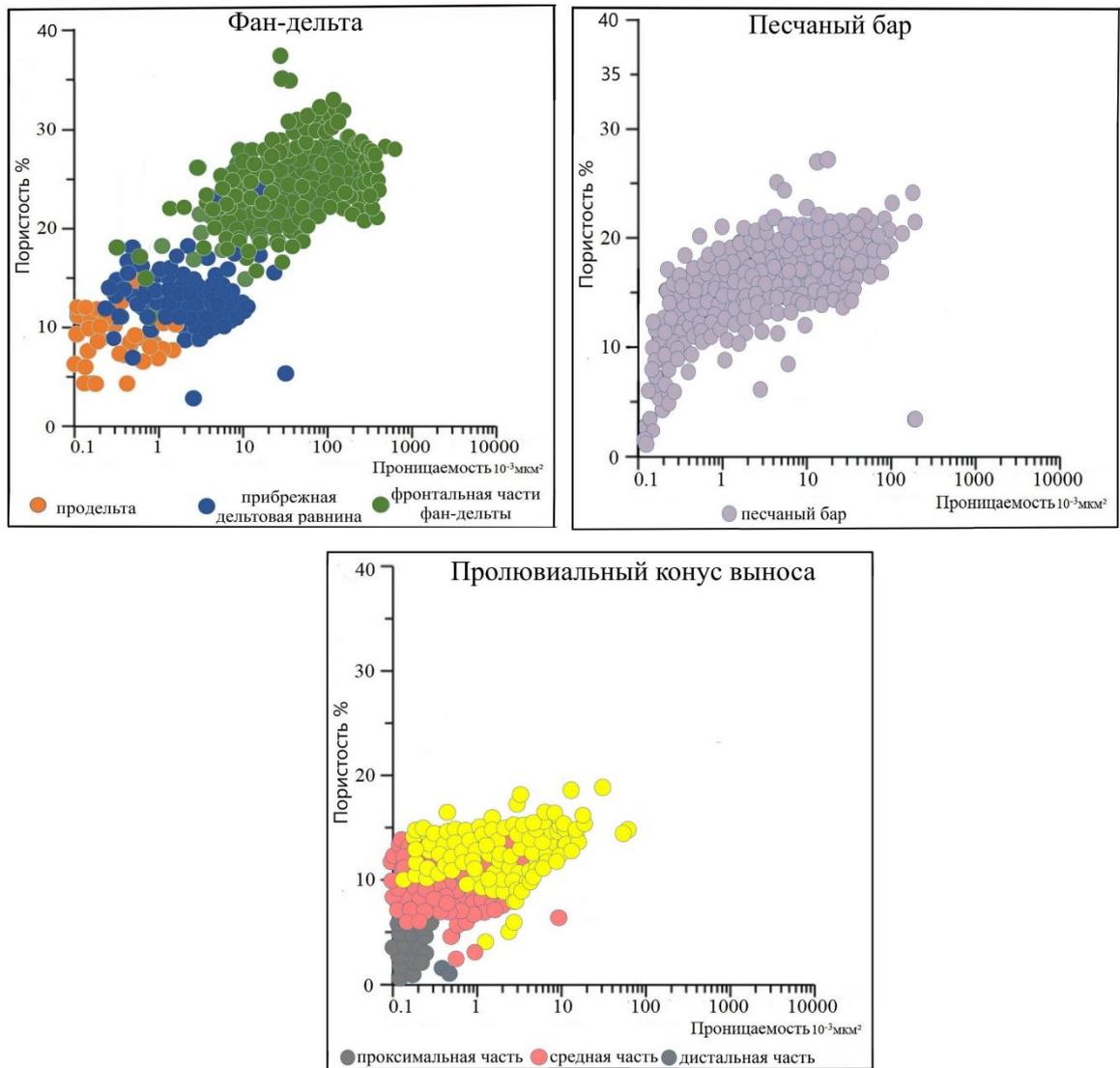


Рисунок 41. График зависимости пористости от проницаемости в песчаных коллекторах по фациям базальных отложений Кондянь-1 - нижняя часть Шахэдие-4

Для базальных песчаных отложений нижней части Кондянь-1 и Шахэдие-4 в юго-восточной части впадины Цзиян характерна тенденция к ухудшению ФЕС при увеличении глубины. В связи с активным проявлением процессов растворения и коррозии минералов, формирующих вторичные поры, в средних и глубоких слоях толщи локально развиты зоны улучшения ФЕС. Первая благоприятная зона находится в интервале глубин 1800-2200 м, вторая и третья – 2700-3200 м, 3500-3800 м соответственно. На глубинах менее 1500 м присутствуют преимущественно первичные межзерновые поры. При глубине более 1500 м начинают появляться карбонатные цементы, первичная пористость значительно

уменьшается. На глубинах 1500-2000 м начинают проявляться процессы растворения минералов, в основном полевого шпата и кварца. На глубинах более 2000 м доля вторичной пористости значительно возрастает: в дополнение к порам растворения полевого шпата и кварца появляются поры растворения различных цементов и обломков пород. Улучшение ФЕС наблюдается в тех интервалах, в которых количество вторичных пор, возникших при растворении минералов, оказывается больше, чем количество первичных пор, редуцированных в процессе цементации и уплотнения. Из наблюдений в шлифах видно, что пустотное пространство в первом интервале повышения ФЕС (1800-2000 м) представлено в равной степени первичными и вторичными порами. Во втором интервале (2700-3200 м) вторичные поры начинают преобладать над первичными, а в третьем (3500-3800 м) – пустотное пространство почти полностью представлено вторичными порами (рис. 42).

Таким образом можно сделать вывод, что при различных глубинах залегания изучаемых отложений ФЕС песчаных коллекторов контролируются разными факторами: при глубинах меньше 1500 м, ФЕС контролируются степенью сортировки зерен пород (чем лучше сортировка, тем лучше ФЕС); на глубинах 1500-3500 м – содержанием цемента и активностью процессов растворения минералов; на глубинах превышающих 3500 м – преимущественно процессами растворения минералов.

6.4 Факторы, влияющие на коллекторские свойства песчаных пород

6.4.1 Обстановки осадконакопления

Характеристики породы, обусловленные различными условиями осадконакопления, оказывают значительное влияние на формирование первичного пустотного пространства. Различные условия осадконакопления приводят к большим различиям в составе и структуре песчаников. Песчаники с более крупными зёрнами и высокой минеральной и структурной зрелостью характеризуются более высокими значениями пористости и проницаемости, что в то же время с большей вероятностью обеспечит в эпигенезе более свободную миграцию пластовых флюидов, оказывающих значительное влияние на развитие вторичной пористости.

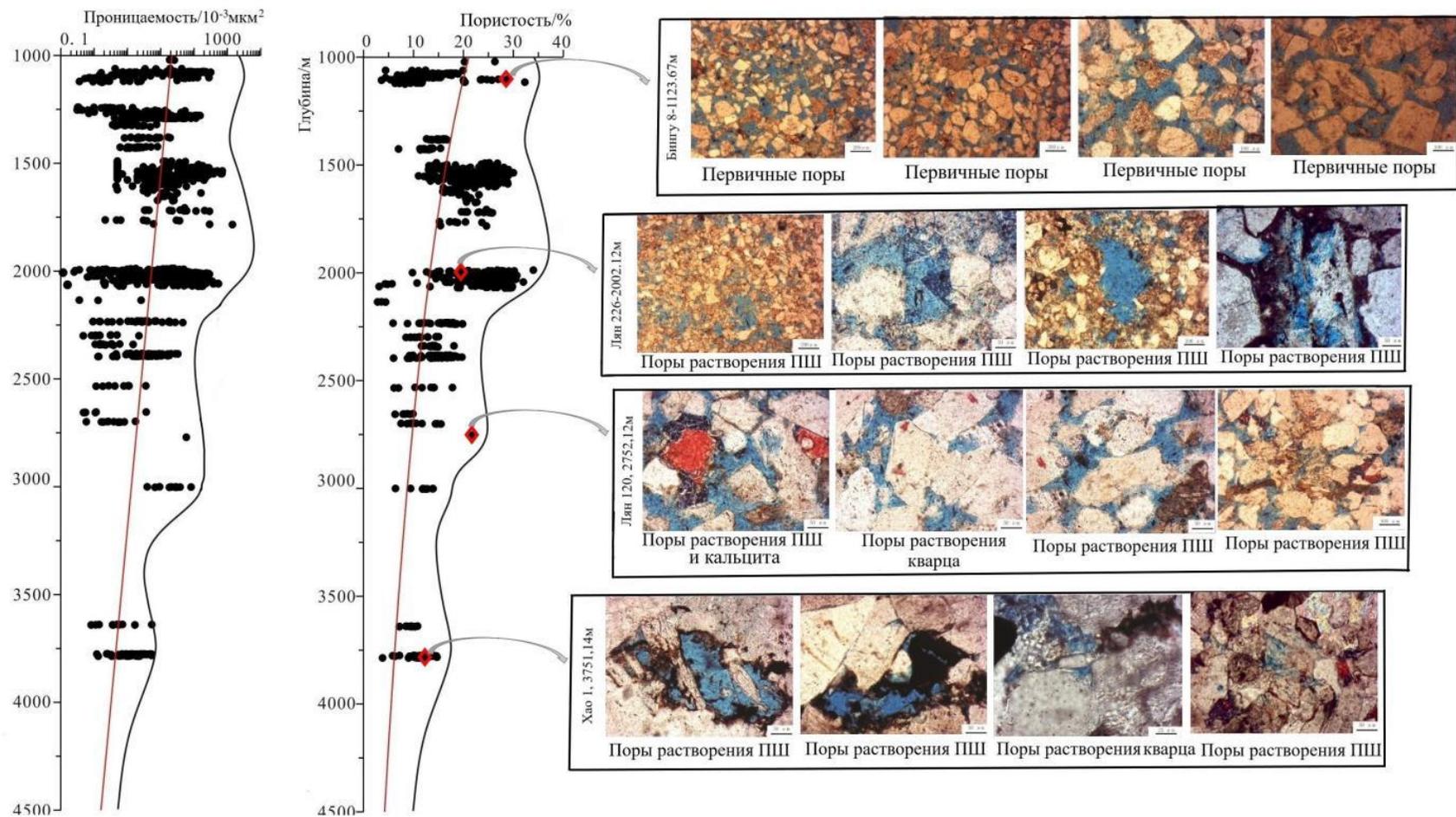


Рисунок 42. Изменение пористости и проницаемости песчаников с увеличением глубины. Фото шлифов – пустотные пространства зоны улучшения ФЕС (ПШ-полевой шпат)

В пределах базального комплекса нижнего эоцена юго-восточной части впадины Цзиян развиты в основном отложения пролювиальных конусов выноса, фан-дельт и песчаных баров. Породы пролювиальных конусов выноса представлены песчаниками и конгломератами крупнозернистыми, характеризующимися низкой зрелостью и плохой сортировкой зерен. Отложения фан-дельт относятся к средней и мелкой фракции, отличаются высоким содержанием полевых шпатов и кварца, средними или высокими зрелостью и сортировкой. Среди этих отложений песчаные тела подводных каналов, склонов, устьевых и приустьевых баров и т.д. характеризуются большей мощностью, хорошей сортировкой и высокой зрелостью, в структуре порового пространства преобладают микропоры и мелкие поры с хорошей связью. Отложения песчаных баров в ходе своего образования были преобразованы волнами в течение длительного периода времени, что привело к довольно хорошей сортировке зерен и высокой зрелости данных отложений.

6.4.2 Постседиментационные процессы

Постседиментационные процессы оказывают как положительное, так и отрицательное влияние на коллекторские свойства песчаников. Уплотнение и цементация обычно производят отрицательный эффект, а такие процессы как растворение кварца, полевых шпатов и карбонатного цемента – положительный (Niu и др. 2014).

Кислотно-щелочные (pH) условия в районе исследований на ранних стадиях литогенеза были щелочными, что привело к образованию большого количества раннего карбонатного цемента (Wang и др., 2013). При последующем развитии, в катагенезе, за счет разложения органического вещества созревшей нефтематеринской породы, образовалось большое количество кислых веществ, являющихся катализатором процессов вторичного порообразования за счет растворения минеральных компонентов породы.

Песчаные тела (в основном приуроченные к пролювиальным конусам выноса), распространенные на краю бассейна, удалены от центральной части впадины, вследствие чего поступление кислых и щелочных веществ было невелико, и, соответственно, проявление процессов цементации и растворения минералов в этих отложениях не получило широкого распространения. Первичная пористость здесь в среднем составила

8,6%, вторичная – 1,2%. Песчаные тела фан-дельтового генезиса, расположенные в зоне пологого склона относительно близко к центру прогиба, характеризуются умеренно сильным воздействием процессов уплотнения, цементации и растворения зерен. В то же время в этой области имеются крупные разрывные нарушения, сообщающиеся непосредственно с нефтематеринскими породами, что является условием активного развития вторичной пористости в коллекторах района исследований. Средняя первичная пористость песчаников в этой области около 9,8%, доля вторичной пористости значительно увеличивается (в среднем 11,1%). В центре впадины, где распространены отложения песчаных баров, цементация и уплотнение оказали значительное влияние на породы – исчезла большая доля первичных пор. Сильная цементация затруднила растворение кислыми веществами зерен полевого шпата и кварца, что привело к торможению процессов вторичного порообразования. Значения первичной пористости коллекторов этой зоны в среднем составляют 7,8%, вторичной – 8 %.

6.5 Прогноз пространственного распределения коллекторов

Прогноз распространения песчаных коллекторов различного качества осуществлялся на основе литофациального районирования с учетом постседиментационных преобразований. По итогам работы песчаные коллекторы были разделены на четыре типа (Таб. 4).

К лучшим песчаным коллекторам, выделенным как первый тип, на изучаемом участке относятся подводные каналы, склон, устьевые и приустьевые бары фронтальной части фан-дельты. Размер зерен песчаников от среднего до мелкого, характерны хорошая сортировка и высокая степень зрелости. При погружении толщи процессы уплотнения и цементации были умеренными, при этом растворение минералов проявилось в достаточно большом объеме, что способствовало, с одной стороны, одновременному сохранению большого количества первичных пор, с другой – развитию вторичной пористости. Значение пористости таких коллекторов превышает 20%, проницаемости – более 10×10^{-3} мкм².

Ко второму типу коллекторов были отнесены мелководные баровые песчаные тела. Они имеют отличную сортировку, минеральную и структурную зрелость. Однако, из-за

близости к центру впадины, коллекторы этого типа пострадали от сильного уплотнения и цементации. Помимо этого, отложения характеризуются незначительной мощностью. В связи с вышеперечисленными особенностями данный тип коллекторов уступает по своим ФЕС первому: значения пористости варьируют от 10% до 20%, проницаемости – от 1 до 100×10^{-3} мкм².

Третий тип коллекторов – это русла рукавов, прирусловые бары или валы, распределенные на фан-дельтовой равнине и средней части пролювиальных конусов выноса. Основной район распространения - окраина Пинфанван и запад Чэньцзячжуана. Осадки в этом районе выносились в процессе затопления, были менее отсортированы и менее зрелы. В седиментогенезе не было образовано большого количества первичных пор. Поступление кислых веществ в области распространения данных отложений протекало не активно, в связи с чем песчаники являются плохопреобразованными. Пористость изменяется от 10% до 15%, проницаемость – от 1 до 10×10^{-3} мкм².

Песчаные тела проксимальной части пролювиального конуса выноса, расположенные на краю впадины, отличаются самыми плохими коллекторскими свойствами из-за плохой сортировки и малой зрелости. Характерные значения пористости и проницаемости для данного типа коллекторов составляют менее 10% и менее 1×10^{-3} мкм² соответственно.

Для отложений в наиболее удаленной части фан-дельты (профан-дельта), где в условиях пониженной гидродинамики происходило отложение тонкой фракции осадочного материала, характерны тонкозернистые илистые осадки (алевриты и глины), что делает невозможным выделение этих отложений в качестве эффективных коллекторов (рис. 43).

Таблица 4

Типы песчаных коллекторов базальных отложений свит Кондянь-1 и нижняя часть Шахэдие-4

Тип коллектора	Пористость %	Проницаемость 10^{-3}мкм^2	Сортировка и зрелость	Фация	Субфация	Постседиментационные процессы
Хорошие (I тип)	>20	>10	Хорошие	Фронтальная часть фан- дельты	Подводные каналы, склон, устьевые, приустьевые бары	Уплотнение и цементация средние, растворение и коррозия сильные
Средне- хорошие (II тип)	10-20	1-100	Хорошие	Песчаные бары	-	Уплотнение и цементация сильные, растворение и коррозия средне- сильные
Средние (III тип)	10-15	1-10	Средние	Прибрежная дельтовая равнина и средняя часть пролювиальных конусов выноса	Русла рукавов, приустьевые бары или валы	Уплотнение и цементация средние, растворения и коррозия слабо-средние
Плохие (IV тип)	5-10	0.1-1	Плохой	Проксимальная часть пролювиальных конусов выноса	-	Уплотнение и цементация слабые, растворение и коррозия слабые

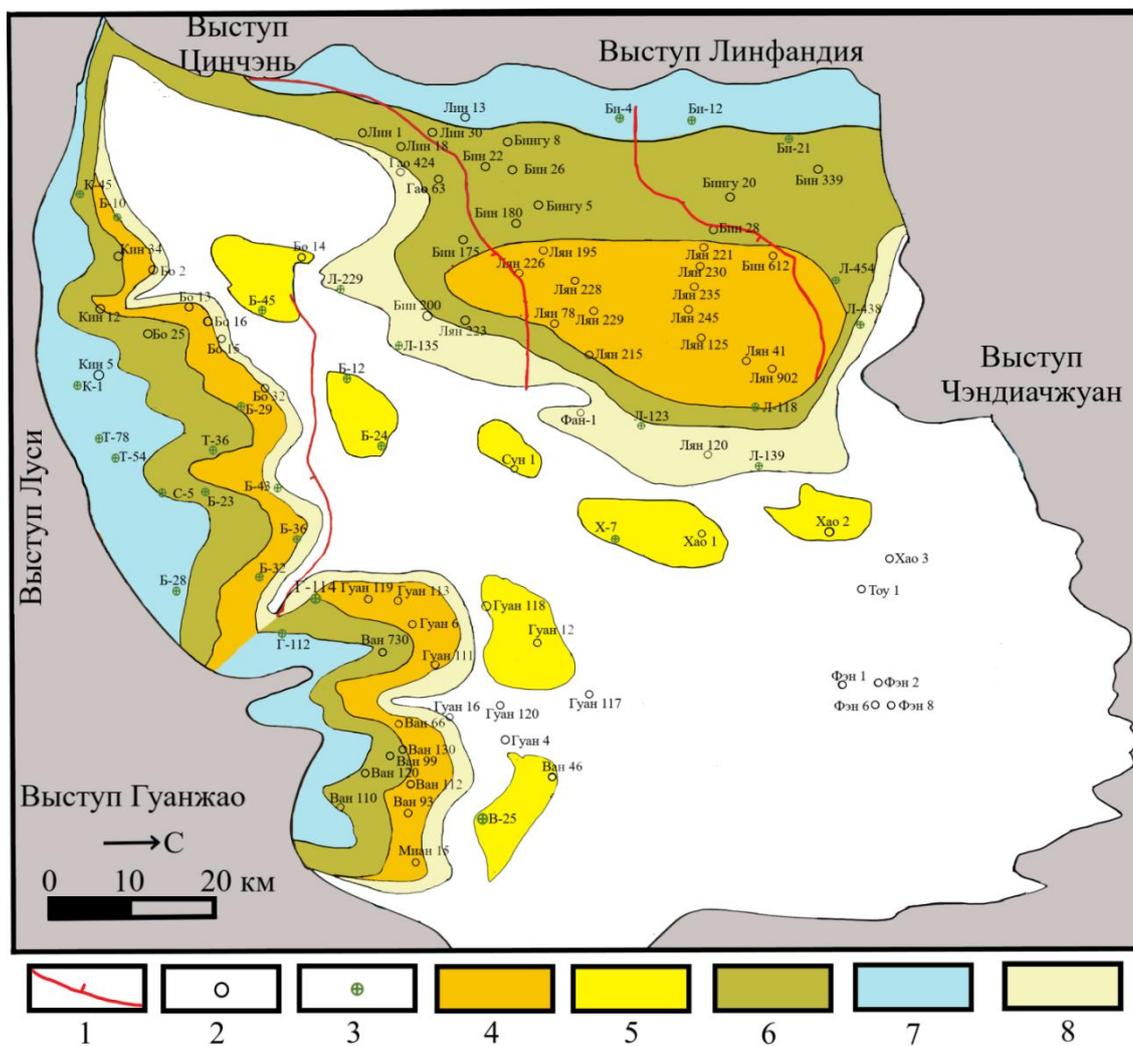


Рисунок 43. Схема относительного качества песчаных коллекторов интервала

Кондянь-1 – нижняя часть Шахэдие-4

Условные обозначения: 1 – тектонические нарушения; 2 – фактические данные по скважине, 3 - литературные данные по скважине; 4 – хорошие коллекторы; 5 – средне-хорошие коллекторы; 6 – средние коллекторы; 7 – плохие коллекторы; 8 – неколлектор

Выводы

1. На исследуемой территории выделены три основных типа песчаных тел: пролювиальные конусы выноса, фан-дельта и песчаные бары. Среди них песчаные тела фан-дельты и пролювиальных конусов выноса отличаются большей мощностью (между 70 и 300 м), по сравнению с баровыми песчаными телами, мощность которых обычно менее 100 м. Пустотное пространство изученных песчаных коллекторов, приуроченных к базальным отложениям нижнего эоцена, в основном представлено порами различного типа и трещинами, наиболее распространенным является сочетание межзерновых пор и пор растворения минералов.

2. Пористость и проницаемость постепенно уменьшаются с увеличением глубины, отмечается несколько зон улучшения фильтрационно-емкостных свойств. На глубинах 1000-1300 м значения ФЕС контролируются хорошей сортировкой зерен. В пределах глубин 1800-2200 м, значения ФЕС совместно контролируется содержанием цемента и растворением минералов. В пределах глубин 2700-3200 м и 3500-3800 м основным фактором, контролирующим ФЕС, являются процессы растворения полевых шпатов, кварца и карбонатного цемента.

3. По итогам работы песчаные коллекторы были разделены на четыре типа: первый тип представляет собой песчаные тела подводных каналов, склон, устьевых, приустьевых баров фронтальной части фан-дельты с пористостью более 20% и проницаемостью более 10×10^{-3} мкм². Второй тип – отложения песчаных баров, пористость которых варьирует в пределах 10%-20%, проницаемость – в пределах $1-100 \times 10^{-3}$ мкм². Третий тип коллекторов включает в себя песчаные тела, представленные отложениями русловых рукавов, прирусловых баров и валов на фан-дельтовой равнине и средняя часть пролювиальных конусов выноса с пористостью от 10% до 15% и проницаемостью от $1-10 \times 10^{-3}$ мкм². Песчаные тела проксимальной части пролювиального конуса выноса отличается самыми плохими коллекторскими свойствами: пористость менее 10%, проницаемость менее 1×10^{-3} мкм².

Заключение

В связи с достаточно хорошей степенью изученности неглубоких пластов и их высокими показателями добычи во впадине Цзиян, глубокозалегающие коллекторы нижнего эоцена становятся ценными объектами, способными обеспечить прирост запасов углеводородов в пределах области исследований. В ближайшее время нижнеэоценовые базальные отложения могут стать одним из основных объектов добычи нефти и газа в бассейне Бохайвань. Несмотря на то, что перспективы этих отложений оцениваются достаточно высоко, их освоение происходит крайне медленно, в связи с малой изученностью коллекторских свойств песчаных коллекторов и закономерностей их изменения.

Песчаники в отложениях базального комплекса юго-восточной части впадины Цзиян представлены аркозами, кварц-полевошпатовыми и полевошпатово-кварцевыми граувакками. Фильтрационно-ёмкостные свойства песчаников в районе исследования определяются преимущественно присутствием пор и трещин различного генезиса. На небольших глубинах залегания в породах-коллекторах преобладают первичные поры, с увеличением глубины все большую долю пустотного пространства начинают занимать вторичные поры (в основном поры растворения зерен кварца, полевых шпатов и карбонатных цементов). Трещины в основном обусловлены тектоническими и катагеническими процессами, их распространение наблюдается в отложениях на разных глубинах.

Основой для прогноза качества песчаных коллекторов являются литолого-фациальное районирование и интерпретация данных ГИС с применением фациального анализа. На процесс седиментации в районе исследований большое влияние оказали процессы затопления, разнообразие фациальных условий обусловило наличие различных литолого-фациальных комплексов в пределах толщи нижнеэоценовых отложений (пролювиальных, фан-дельтовых и песчано-баровых), предопределивших широкое распространение песчаных тел на пологом склоне и эвапоритов в центральной части района исследования. Среди песчаных тел района исследований песчаники подводных русел, склона, устьевых и приустьевых баров, расположенные во фронтальной части фан-

дельты отличаются высокой минералогической и структурной зрелостью и хорошей сортировкой.

Анализ влияния постседиментационных процессов на формирование коллекторов является ключом к уточнению прогноза качества песчаных коллекторов. Растворение карбонатных и кремнистых скелетов донных организмов, населявших области развития фан-дельтовых отложений, привело к заполнению крупных пор карбонатными и кремнистыми цементами. Активная цементация происходила в основном в нижних и в верхних частях песчаных тел, которые контактировали с карбонатно-глинистыми прослоями. В процессе увеличения глубины залегания большое количество органического вещества в НМП разлагалось с образованием кислых веществ, которые по разрывным нарушениям попадали в песчаные тела, образуя вторичные поры и улучшая коллекторские свойства песчаников.

По результатам анализа седиментационных процессов и постседиментационных преобразований песчаников базальных отложений был выполнен прогноз распространения песчаных коллекторов различного качества. По итогам работы песчаные коллекторы были разделены на четыре типа. Песчаные тела подводных каналов, склона, устьевых, приустьевых баров фронтальной части фан-дельты с пористостью более 20% и проницаемостью более 10×10^{-3} мкм² выделены в качестве наиболее перспективных коллекторов в районе исследования.

Результаты исследования позволяют выявить новые объекты для поискового бурения, что впоследствии может оказать положительное влияние на оптимизацию геологоразведочных работ в регионе.

Список использованной литературы

1. Баженова О.К., Бурлин Ю.К., Соколов Б.А., Хаин В.И. Геология и геохимия нефти и газа. — М.: Издательство МГУ. — 2004. — С. 412.
2. Безбородов Р. С. Краткий курс литологии: Учебник. — М.: Изд-во РУДН. — 1989.
3. Бурлин Ю.К., Конюхов А.И., Карнюшина Е.Е. Литология нефтегазоносных толщ. — М., "Недра". — 1992. — С. 282.
4. Высоцкий И.В., Оленин В.Б., Высоцкий В.И. Нефтегазоносные бассейны зарубежных стран. — М.: Недра. — 1981. — С. 479.
5. Жуковская Е.А., Недоливко Н.М., Ежова А.В. Глинистые минералы песчано-алевритовых пород юрских отложений юго-востока Нюрольской впадины // Матер. регион. конф. геологов Сибири, Дальнего Востока и Северо-Востока России. — Томск. — 2000. — Т. 1. — С. 214–216.
6. Жемчугова В.А. Природные резервуары в карбонатных формациях Печорского нефтегазоносного бассейна. — М.: Изд-во Московского государственного горного университета. — 2002.
7. Жемчугова В.А. Резервуарная седиментология карбонатных отложений. Курс лекций. — М.: Ред.-изд. центр ЕАГО. — Москва. — 2014.
8. Князев В.С., Кононова И.Б. Руководство к лабораторным занятиям по общей петрографии М. // Недра. — 1990. — С. 137-183.
9. Конюхов А.И. Чэнь Сяоцзюнь. Литология и условия формирования палеогеновых отложений во впадине Дунин (бассейн Бохайского залива, КНР), Литология и полезные ископаемые // издательство Наука (М.). — 2007. — № 6. — С.613-636.
10. Кузнецов В.Г. Литология. Осадочные горные породы и их изучение: Учеб.пособие для вузов. — М.: ООО «Недра-Бизнесцентр». — 2007. — С. 511.
11. Кузнецов В.Г. Эволюция карбонатакопления в истории Земли. — М.: ГЕОС. — 2003. — С. 262.
12. Лебедев Б.А. Геохимия эпигенетических изменений. — М.: Недра. — 1992. — С.126.
13. Лимонов А.Ф., Бурлин Ю.К. Строение, развитие и нефтегазоносность бассейна Бохай (КНР) // Геология нефти и газа. — 1988. — № 10. — С. 53-57.
14. Маслов А. В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных

данных. Учебное пособие. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ. — 2005. — С. 289.

15. Наливкин Д.В. Учение о фациях. В 2-х томах. — М.: Изд-во АН СССР. — 1956. — С. 534.

16. Сахибгареев Р.С. Вторичные изменения коллекторов в процессе формирования и разрушения нефтяных месторождений. — Л.: Недра. — 1989. — С. 260.

17. Смахов Е.М., Дорофеева Т.В. Вторичная пористость горных пород-коллекторов нефти и газа. — Л.: Недра. — 1987. — С.96.

18. Селли Р. Ч. Древние обстановки осадконакопления. — М.: Недра. — 1989. — С. 294.

19. Сулейманова С.Ф., Кадыров С.Н. Коллекторские свойства пород продуктивной толщи северо-западной части Бакинского архипелага и факторы, влияющие на них в зависимости от глубины залегания (Булла-дениз, Хамамдаг-дениз) // Геолог Азербайджана. Научный бюллетень. — 2002. — № 7. — С. 69-76.

20. Фролов В.Т. Литология. Кн. 2. — М.: Изд-во МГУ. — 1993. — С. 432.

21. Цзинь Чжицзюнь. Механизм образования залежей УВ и закономерности распределения средних и крупных нефтегазовых месторождений Китая. Диссертация на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Москва. — 2006. — С. 360.

22. Шванов В.Н. Петрография песчаных пород. —Л. — 1987. — С. 269.

23. Япаскурт О.В. Стадиальный анализ литогенеза. — М.: Изд-во МГУ. — 1995. — С. 138.

24. Cao Y, Wang J, Gao Y. et al. Sedimentary characteristics and model of red beds-gypsum salt bed of the Paleogene in Dongying sag, Jiyang depression // Journal of Palaeogeography. — 2011. — № 13(4). — P. 375-386.

25. Cao Y., Yuan G., Yang H., Wang Y., Liu K., Zan N., Xi K., Wang J. Current situation of oil and gas exploration and research progress of the origin of high-quality reservoirs in deep-ultra-deep clastic reservoirs of petroliferous basins // Acta Petroleisnica. — 2022. — № 43(1). — P. 113-140.

26. Chen J. Tectonic sequence of Tertiary in Jiyang depression and its evolution // Progress in Geophysics. — 2003. — № 18(4). — P. 700-706.

27. Cheng Q, Kou X, Huang S. Et al. The distributes and geologic environment characteristics of red beds in China[J] // Journal of Engineering geology. — 2004. — № 12(1). — P. 34-40.

28. Dong D., Ji J., Wang X., Shang L., Liu J. Reservoir characteristics and controlling factors of red bed of Kongdian Formation in eastern Dongying Depression, Bohai Bay Basin[J] // Journal of

China University of Petroleum. — 2017. — № 41(5). — P. 20-29.

29. Feng Y, Jiang S, Wang C. Sequence stratigraphy, sedimentary systems and petroleum plays in a low-accommodation basin: Middle to upper members of the Lower Jurassic Sangonghe Formation, Central Junggar Basin, Northwestern China // *Journal of Asian Earth Sciences*. — 2015. — № 105. — P. 85-103.

30. Gao Y. Fault development characteristics of red-bedding series in Dongying depression // *Fault-Block Oil & Gas Field*. 2011. — № 18(1). — P. 62-65.

31. Guo X., Shi X., Qiu X., et al. Characteristics of Cenozoic tectonic subsidence in Jiyang depression // *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*. — 2006. — № 30(3). — P. 6-11

32. Hou G., Qian X., Cai D. The tectonic evolution of Bohai Basin in Mesozoic and Cenozoic time // *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (Edition of Natural Science)*. — 2001. — № 37 (6). — P. 845-851.

33. Hou X., Wu Z., Li W. Development characteristics of Mesozoic negative inversion structures in Jiyang depression // *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*. — 2010. — № 34 (1). — P. 18-23.

34. Jiang Z. *Sedimentology*[M] // Beijing:Petroleum Industry Press. — 2003. — P. 236-242

35. Jiang Z, Liu H, Zhang S. Sedimentary characteristics of large-scale lacustrine beach-bars and their formation in the Eocene Boxing Sag of Bohai Bay Basin, East China // *Sedimentology*. — 2011. — № 58(5). — P. 1087-1112.

36. Jing Y. Paleogene flooded lake sediments in the southern part of the Jiyang depression[J] // *Geology in China*. — 2005. — № 32(4). — P. 655-662.

37. Lai J., Wang G., Wang S. Research status and advances in the diagenetic facies of clastic reservoirs // *Advances in Earth Science*. — 2013. — №.28(1). — P. 39-50.

38. Li J. Temporal-spatial evolution of diagenetic environment and diagenesis pore evolutionary process of red beds in the eastern Dongying sag, Bohai bay basin // *Oil & Gas Geology*. — 2017. — № 38 (1). — P. 90-97.

39. Li J., Jia G., Wang X. Application of geophysical facies to sedimentary facies study in the Eocene Red-beds, Dongying Sag[J] // *Well Logging Technology*. — 2016. — № 40(2). — P. 220-228.

40. Li J., Song G., Gao Y. Recovery of the palaeosedimentary environment in Eocene red formations and its geological significances for Dongying sag[J] // *Petroleum Geology & Oilfield Development in Daqing*. — 2013. — № 12(2). — P. 85-95.
41. Li T, Wang J. Chinese red beds and developing landform[J] // *Journal of Sichuan Normal University: Natural Science*. — 2002. — № 25(4). — P. 427-431.
42. Liu C., Han H. Main controlling factors of deposition, drocarbon accumulation and exploration potential of Paleogene red beds in Jiyang depression[J] // *Acta Petrolei Sinica*. — 2012. — № 33(sup 1). — P. 63-70.
43. Luo J., Li C., Lei C., Cao J., Song K. Discussion on research advances and hot issues in diagenesis of clastic-rock reservoirs. — 2020. — 22(6). — P. 1021-1040.
44. Lv H, Chen Z, Wang Z. et al. Distribution of high molecular weighthy hydrocarbons and genesis of high wax content oil from the south slop zone of the Dongying sag, the Jiyang depression[J] // *Oil and Gas Geology*. — 2008. — № 29(3). — P. 355-360.
45. Ni J., Liu J., Lin Y. et al. Style of deep faulting and its control on the Paleogene basin evolved into the western Huimin depression, Eastern China // *Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science)*. — 2011. — № 35(1). — P. 20-27
46. Niu S., Li J. Multiple diagenetic environments and evolutionary patterns of the Eocene red beds in the eastern Dongying Sag // *Oil&Gas geology*. — 2014. — № 35(5). — P. 662-669.
47. Peng H, Wu Z. A preliminary study on the characteristics and the distribution of red beds [J] // *Acta scientiarum naturalium Universitatis Sunyatseni*. — 2003. — № 42(5). — P. 109-113.
48. Peters K.E., Waters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide*, New York: Cambridge University Press. — 2005. — № 1, — P. 151-152.
49. Peters K.E., Waters C.C., Moldowan J.M. *The biomarker guide*, New York: Cambridge University Press. — 2005. — № 2. — P. 700
50. Song M. Diagenesis of the member 4 of the Shahejie Formation in the south slope of the Dongying Depression,China // *Journal of Chengdu University of Technology(Science &Technology Edition)*. — 2005. — № 32(3). — P. 239-245.
51. Song M., Wang Y., Hao X. An Tianxia. Petroleum systems and exploration potential in deep Paleogene of the Dongying Sag, Bohai Bay Basin // *Oil & Gas Geology*. — 2021. — № 42(6). — P. 1244-1254.

52. Tan X., Tian J., Li Z.. Diagenetic character and controlling factor of reservoir of Kongdian Formation of Paleogene in Dongying Basin // *Coal Geology and Exploration*. — 2010. — №. 17(6). — P. 33-40.
53. Tan X., Tian J., Zub. et al. Diagenesis evolution of fragmental reservoir in alkali sediment environment taking the member 4 of shahejie formation of steep-slope zone in Dongying sag, Shandong, China for example[J] // *Geological Bulletin of China*. — 2010. — № 29(4). — P. 535-543.
54. Wang J. Background for oil and gas accumulation of Es4 sub-salt reservoir in Dongying sag, Shandong[J] // *Geoscience*. — 2009. — № 23(2). — P. 31-318.
55. Wang J., Cao Y., Gao Y. Diagenesis and diagenetic facies of red beds reservoirs of Paleogene in Dongying depression[J] // *Journal of China University of Petroleum(Edition of Natural Science)*. — 2013. — № 37(4). — P. 23-29.
56. Wang J, Cao Y, Gao Y, et al. Diagenesis characteristics and formation mechanism of Paleogene red-bed reservoirs in Dongying sag // *Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), Acta Petrolei Sinic*. — 2013. — №. 34(2). — P. 283-292.
57. Wang Y., Cao Y., Chen S., et al. Clastic reservoirs characteristics and its control of Mesozoic in Jiyang depression[J] // *Journal of china university of Petroleum*, — 2007. — № 31(5). — P. 7 -11.
58. Wang Y., Qiu L., Yang Y., Wu W., Yang B., Qiao Y. Diagenesis and Pore Evolution of Permian Reservoirs in Yihezhuang-Dawangzhuang Area, Jiyang Depression, Bohai Bay Basin // *Xinjing petroleum geology* — 42(6). — 2021. — P. 676-682.
59. Wu Z., Li W., Zheng S. et al. Analysis on features and origins of the Mesozoic and Cenozoic faults in Zhanhua sag // *Geological Journal of China Universities* — 2004. — № 10(3). — P. 405-417.
60. Xian B, Wu Z, Jiang Z, et al. Research evolution and development direction in the early diagenesis // *Journal of the University of Petroleum, China*. — 2004. — №. 28(6). — P. 133-139.
61. Xu L., Cao Y., Wang Y. Genetic model of salt-gypsum rock of Paleogene in Dongying Depression and its relationship with hydrocarbon reservoir[J] // *Journal of China University of Petroleum*. — 2008. — № 32(3). — P. 30-36.
62. Yang C, Chen J. Petroleum genetic type sand in depth exploration potential in the Boxing subsag[J] // *Petroleum geology and recovery efficiency*. — 2004. — № 11(3). — P. 34-44.
63. Ye X., Wang W., Dai J., et al. Characteristics of fault activities of Sha-3 member and

Dongying periods in Dongying depression // Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science). — 2006. — № 30(4). — P. 7-11.

64. Yuan C, Xu S, Jia H. Et al. Characteristics of source rock of the Kongdian Formation in south slope of the Dongying sag, the Bohaiwan Basin[J] // Petroleum Geology & Experiment. — 2006. — № 28(2). — P. 177-181.

65. Yuan J., Yuan L., Yang X. et al. Diagenetic evolution modes of the deep formation of Jiyang sub-basin, Paleogene[J] // Acta sedimentologica sinica. — 2012. — № 30(2). — P. 231-238.

66. Zhang L, Kong X, Zhang C. et al. High quality oil source rocks in Jiyang depression[J] // Geochemistry. — 2003. — № 32(1). — P. 35-42.