Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук

D

На правах рукописи

# Алджабасини Мухаммад Диб Хиба

# ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ И СЕЙСМИЧЕСКАЯ АКТИВНОСТЬ РЕГИОНА НЕФТЕДОБЫЧИ ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА

25.00.01 – общая и региональная геология

ДИССЕРТАЦИЯ на соискание ученой степени кандидата геолого-минералогических наук

> Научный руководитель: Кандидат географических наук **Трихунков Я.И.**

Научный консультант: Кандидат геолого-минералогических наук Абрамов В.Ю.

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ
Глава 1. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА9
1.1. Географическая характеристика региона Персидского залива
1.2. Стратиграфическая характеристика отложений Месопотамского краевого
прогиба
1.3. Основные черты тектоники региона Персидского залива
1.4. Нефтегазоносность региона Персидского залива и сопредельных территорий 37
Глава 2. МЕТОДЫ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ 46
Глава 3. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И ИХ
ХАРАКТЕРИСТИКА В РАЙОНЕ РАБОТ 50
3.1. Анализ исторических землетрясений
3.2. Сейсмотектонические и сейсмологические характеристики очагов сильных
землетрясений Персидского залива в XX веке
3.3. Сейсмотектонические и сейсмологические характеристики очагов сильных
землетрясений Персидского залива в XXI веке
Глава 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРИЧИНЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ
АКТИВНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РЕГИОНА
ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА: ВЫЯВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОЧАГОВ 89
4.1. Сопоставление районов сейсмической активности с районами добычи нефти и газа
4.2. Определение тектонической обстановки и сейсмогенной опасности нефте- и
газодобычи на крупнейшем месторождении региона Гечсаран по данным
мониторинга землетрясений94
ЗАКЛЮЧЕНИЕ105
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ 108
СПИСОК РИСУНКОВ117
СПИСОК ТАБЛИЦ

### введение

#### Актуальность темы исследования

Регион Персидского залива характеризуется высокой сейсмической активностью. В частности, её всплеск в виде серии сильных землетрясений магнитудой М<sub>w</sub> 6,2 – 6,7 произошел в пределах Ирана в апреле-июне 2013 года. Это связано с тем, что при землетрясении магнитудой 7,8 на границе Ирана и Пакистана 16 апреля 2013 года не произошло полного выделения сейсмической энергии и часть сейсмических напряжений по системе продольных разрывных структур Загроса направилась из очаговой зоны этого землетрясения в зоны севернее и северо-западнее.

Очевидно, что ученые должны быть заинтересованы в детальной оценке сейсмологической обстановки региона Персидского залива и необходимы дальнейшие исследования по обеспечению достоверного прогноза сильных землетрясений, так как, например, авария на Бушерской АЭС при катастрофическом землетрясении в регионе может представлять экологическую угрозу как для Ирана, так и для соседних стран.

Помимо экологических проблем, которые могут возникнуть при повторных сильных землетрясениях, есть еще один аспект, напрямую связанный с экономикой стран Персидского залива и мира в целом – это добыча нефти.

По прогнозам Министерства энергетики США к 2022 г. потребление нефти в мире возрастет на 61% по сравнению с 2010-2015 годами. Если этот прогноз окажется верным, то значительная часть спроса может быть удовлетворена странами Персидского залива. Значение этого региона для мировой добычи нефти со временем будет все больше и больше возрастать. Следовательно, многие страны серьезно заинтересованы в долгосрочном и стабильном сотрудничестве со странами Ближнего Востока в области поставок нефти.

В пределах акватории Персидского залива выявлено более 70 нефтяных и 6 газовых месторождений, в том числе шельфовых; в пределах рассматриваемого района проходит несколько нефтепроводов. Оценка сейсмичности региона необходима при планировании разработки месторождении нефти и газа с целью проведения расчетов при строительстве и укреплении морских буровых платформ и нефтепроводов.

Помимо экономического и экологического аспектов, существует и третий, главный аспект: существенные человеческие потери. Так во всем мире за XX и XXI век при землетрясениях высокой магнитуды погибло по подсчетам автора около 2,5 млн. человек.

Предлагаемая диссертационная работа направлена на решение ряда фундаментальных проблем, определяющих природу сейсмичности региона Персидского залива, картирование зон повышенной сейсмической активности и прогноз положения возможных будущих опасных сейсмогенных процессов.

#### Цель исследования

Целью диссертационной работы является выявления причин и закономерностей проявлений сейсмической активности региона Персидского залива с учетом его региональной тектонической модели.

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

1. Выполнить анализ сейсмических каталогов землетрясений региона Персидского залива, изучить параметры сейсмических явлений в регионе.

2. Установить закономерности проявления сейсмичности в связи с новейшей тектонической структурой и историей развития региона Персидского залива.

3. Выделить зоны сейсмической активности и составить карту распределения очагов землетрясений с учетом схемы тектонического районирования региона.

4. Провести анализ сейсмичности в районах добычи нефти Персидского залива.

### Методы и материалы исследований

В основу диссертационного исследования автором положены материалы восьмидесяти восьми работ зарубежных и российских геологов и геофизиков. Проведен анализ данных сейсмических каталогов NEIC (The National Earthquake Information Center), сформированных Национальной геологической службой США (The United States Geological Survey) [89,91] и ряда других баз сейсмологических и тектонических данных.

### Положения, выносимые на защиту

1. Регион Персидского залива в XX и XXI веках характеризуется повторяемостью высокомагнитудных сейсмических событий (Mw>6) с периодом в среднем – 11,5 лет, колеблющимся в интервале 8–15 лет. Отмечены периоды сейсмического покоя средней продолжительностью 10 лет и периоды сейсмической активности – 2-3 года.

2. На протяжении XX и XXI веков сейсмические очаги сохраняют постоянное пространственное положение, а их механизмы подтверждают кинематику сейсмоактивных разломных зон: 65% землетрясений в регионе Персидского залива образовались во взбросо-надвиговых тектонических обстановках (крупнейшие взбросо-надвиги: Фронтальный Загросский разлом, Карех-Басский, Бориз, Лар); 25% землетрясений имеют сдвиговый механизм очага (крупнейшие правые сдвиги: Казерун-Боразджанский, Дена, Главный Современный Разлом Загроса (ГСРЗ), Сарвестан); остальные 9% землетрясений относят в равной степени к сбросам и взрезам.

3. На протяжении неоген-четвертичного времени сейсмическая активность мигрировала от наиболее древних к молодым тектоническим зонам по мере их вовлечения в состав складчатого сооружения Загроса: сейчас наименьшая активность наблюдается в Чешуйчатой зоне и возрастает в зоне Высокого Загроса; наибольшая сейсмическая активность характерна для зон Низкого Загроса и Предгорной и связана развитием взбросо-надвиговых деформаций в сочетании со сдвигами. Основная добыча нефти сконцентрирована в двух последних зонах, в связи с чем необходимы укрепляющие мероприятия для существующих и планируемых объектов инфраструктуры.

#### Научная новизна

 Проанализирована тектоническая структура региона Персидского Залива и Загроса.

5

- 2. Построена карта сейсмичности региона Персидского залива и прилегающих территорий, которая дополняет и уточняет карты, созданные ранее.
- Сделан анализ повторяемости сейсмических событий в период XX и XXI веков, установлены пространственно-временные взаимосвязи крупных сейсмических событий на территории Персидского залива в связи с тектоническим строением рассматриваемого района.
- 4. Впервые составлена карта плотности сейсмической энергии в пределах региона Персидского залива.
- 5. На основании данных сейсмических каталогов автором определена периодичность эпох тектонической активности и покоя региона Персидского залива в историческое время и в XX–XXI веках. Дана вероятностная оценка повторяемости высокомагнитудных сейсмических событий и приведены тектонические характеристики очагов землетрясений.

### Практическая значимость

По результатам проведенных вычислений выделения совокупной сейсмической энергии по годам представляется возможность учета повторяемости сильнейших сейсмических событий в регионе Персидского залива при долгосрочном прогнозе землетрясений.

По результатам пространственно-временно́го анализа распространения очагов сильнейших землетрясений XX – XXI вв. установлена связь проявлений сейсмичности с тектоническими факторами. Это является методической основой для мониторинга сейсмической активизации и прогнозирования времени и мест возникновения крупных землетрясений.

Установлено, что сейсмические события инструментального периода наблюдений (конец XX – XXI века) не повлияли непосредственно на добычу углеводородов в регионе Персидского залива. Однако разработчикам месторождений при планировании добычного потенциала следует учитывать фактор сейсмичности.

### Апробация результатов

Основные результаты исследования апробировались в виде докладов на конференциях:

1. Сейсмическая активность районов нефтедобычи Персидского залива // 6-я научно-практическая конференция «Тюмень 2019» при поддержке EAGE, г. Тюмень, 28 марта 2019 г.

2. Некоторые особенности сейсмической активности в пределах региона // Персидского залива // XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» на базе РГГУ им. С. Орджоникидзе (МГРИ), г. Москва, 5 апреля 2019 г.

3. Прогноз сейсмичности центральной и восточной частей Персидского залива // Научно-практическая конференция с международным участием «Инженерные системы – 2019» на базе Инженерной академии РУДН, г. Москва, 4–5 апреля 2019 г.

4. Сейсмичность в сейсмогенной зоне в районе Казерун-Боразджанского разлома (Иран, Загрос) // Научно-практическая конференция «Инженерная сейсморазведка и сейсмология – 2019», г. Москва, 28–30 октября 2019 г.

5. Связь сейсмичности с тектоническими процессами по результатам анализа крупных землетрясений, произошедших на территории Ирана в XX и XXI веках // «Инженерная и рудная геофизика 2020», г. Пермь, 14–18 сентября 2020 г.

По теме диссертации опубликовано 8 работ, включая 2 статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК, и 2 статьи в Scopus.

### Личный вклад

Автор лично провел анализ данных сейсмических каталогов по 2521 сейсмическим событиям для выявления периодов активизации и процессов пространственной и временной динамики очагов землетрясений.

Автор лично провел анализ фокальных механизмов очагов 70 землетрясений с целью уточнения кинематики современных тектонических движений в пределах региона Персидского залива.

### Структура и объем работы

Диссертационная работа включает в себя введение, четыре тематические главы и заключение, список литературы из 96 наименований. Объем работы составляет 120 страниц, работа содержит 53 рисунка и 8 таблиц.

### Благодарности

Автор выражает глубокую признательность и благодарность коллективу сотрудников лаборатории Неотектоники и современной геодинамики Геологического института РАН и, в первую очередь, д.г.-м.н. Трифонову Владимиру Георгиевичу, консультировавшему по вопросам тектонического районирования рассматриваемой в диссертации территории, и к.г.н. Трихункову Ярославу Игоревичу, руководившему заключительной стадией подготовки диссертации, что в конечном итоге значительно повысило ее качество. За ценные замечания и предоставление дополнительных материалов автор благодарит Бачманова Дмитрия Михайловича, к.г.-м.н., старшего научного сотрудника Лаборатории неотектоники и современной геодинамики.

Также автор выражает благодарность доценту Воронежского государственного университета, к.г.-м.н. Дубянскому Александру Игоревичу за ценные рекомендации и поддержку. Особую признательность автор выражает к.г.-м.н. Строму Александру Леонидовичу за консультации.

Автор выражает благодарность Абрамову Владимиру Юрьевичу за редакционные замечания и поддержку в процессе работы над диссертацией.

### Глава 1. ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РЕГИОНА

#### 1.1. Географическая характеристика региона Персидского залива

Персидский залив расположен между Иранским нагорьем и Аравийским полуостровом и является шельфовым бассейном, занимающим наиболее пониженную часть Месопотамского прогиба. Он соединяется Ормузским проливом с Оманским заливом и через него с Аравийским морем и Индийским океаном (Рис. 1). Странами, которые окружают Персидский залив, являются Катар, Объединённые Арабские Эмираты, Саудовская Аравия, Бахрейн, Кувейт, Оман, Ирак и Иран. В залив впадают реки Тигр и Евфрат, стекающие с севера и дренирующие Месопотамскую низменность. На рисунке 2 представлена обзорная карта района исследований, отмечена изучаемая область – Месопотамский Bce реконструкции краевой прогиб. тектонические В диссертационном исследовании приведены для этой структурной зоны.

Ниже представлены основные географические параметры Персидского залива:

- площадь залива 251000 км<sup>2</sup>;
- длина 989 км;
- ширина 56 км;
- средняя глубина 50 м, Максимальная 90 м.



Рис. 1. Географическое положение Персидского залива [95]



Рис. 2. Карта рельефа района исследований [27]

### 1.2. Стратиграфическая характеристика отложений Месопотамского краевого прогиба

Представленный диссертационном В исследовании литологостратиграфический разрез отложений Месопотамского краевого прогиба составлен на основе материалов ГИС и исследования керна в скважинах [27]. литолого-стратиграфический разрез представлен на Сводный рисунке 3. Значительный вклад в разработку стратиграфии бассейна Персидского залива, в том числе Месопотамского краевого прогиба, внесли иранские и иракские геологи: Аль-Хабба Ю. К., Абдула М., Алшаран А. С., Наирн А. Е. М., Бедуин 3. Р., Хуссейни М. И., Ибрагим М. В., Махмуд М. Д., Мошриф М. А. Также стоит отметить существенный вклад, который внесли в развитие геологического изучения Ирана и Ирака, Я. Грегори и Д. Макфауден, Ditmar V., Henson F. R. S, C. Болтон, Х. Даннингтон, М. Чаттон и Е. Харт, В. Поникаров, Г. Брев, Ф. Бендер, Р.



Поверс, Я. Стоклин, Г. Джамес, И. Алтинли, И. Кетин, М. Верма, С. Яссим, чехословацкие специалисты Т. Будай, М. Ванесек и другие.

Рис. 3. Сводный стратиграфический разрез верхней части осадочного чехла региона Персидского залива [27]

Осадочный чехол. залегаюший на поверхности кристаллического фундамента архей-протерозойского возраста, сложен породами палеозойского, мезозойского, кайнозойского (в том числе четвертичного) возраста. Максимальная мощность чехла достигает 12 км в наиболее погруженной части Месопотамского прогиба [19,77]. Региональная стратиграфическая схема представлена на Рисунке 4 [27].



Рис. 4. Сводный стратиграфический разрез нижней части осадочного чехла региона Персидского залива [78].

Возраст кристаллического фундамента по различным литературным данным оценивается как архей-протерозойский [1,2]. Породы фундамента обнажаются на дневной поверхности в районе гор Санандадж-Сирджан. Среди них наряду с докембрийскими могут присутствовать метаморфические породы палеозоя и раннего мезозоя. Также фундамент вскрыт отдельными скважинами глубокого бурения на территории Ирана и Саудовской Аравии. Возраст фундамента по различным литературным данным архей-протерозойский [53,57,58, 77]. Согласно геофизическим данным, поверхность фундамента имеет региональный наклон к северу и северо-востоку. Глубина залегания фундамента изменяется от 2 км до 10–13 км. В северо-западной части Месопотамского прогиба глубина залегания небольшая, около 2–3 км, к востоку фундамент погружается [27,53, 54, 55,77]. Породы фундамента представлены красновато-серыми, розовато-серыми, розовато-коричневыми, мелко- и средне-кристаллическими гранитами и гранитогнейсами [27].

### Палеозой (РZ)

Палеозойские отложения в пределах рассматриваемой территории обнажаются на северо-востоке Месопотамского прогиба в складчатой области Загроса. Максимальная мощность, установленная по данным геофизических исследований скважин, составляет около 2,6 км. В палеозойском разрезе выделяются отложения верхнего кембрия, нижнего и среднего ордовика, силура, нижнего и верхнего девона, нижнего карбона и перми [27].

*Кембрий – Ордовикская системы (° Э – О).* В основании данного этажа залегают вендские эвапориты формации Хормус (галитовые отложения), которые создают многочисленные соляные купола. Следует отметить, что по данным [78] отложения формации Хормус также охватывают низы кембрия, и внедряются в вышележащие слои в виде соляных диапиров. На них лежат мелководно-морские красноцветные косослоистые песчаники, доломиты И сланцы кембрийордовикского возраста. Взаимоотношения этого комплекса с нижележащими отложениями остаются невыясненными. В верхней части отложений ордовика породы ледникового происхождения. Они образовались в присутствуют оледенения, результате древнего повсеместно отмеченного В пределах палеоконтинента Гондваны, в состав которого рассматриваемая территория входила в палеозое [27,77]. Общая мощность кембрий-ордовикских отложений более 3000 м.

Силурийская система (S). Силурийский период для данной территории ознаменовался резким увеличением глубины моря и затоплением больших территорий, что привело к формированию мощных толщ черносланцевых отложений. Они характеризуются высоким содержанием органического вещества (4–12%), а также высокой радиоактивностью [27]. Большинством исследователей [51, 68, 79] граптолитовые сланцы формации Гахкум (Gachum) рассматриваются как основной источник углеводородов.

На рассматриваемой территории максимальная вскрытая скважинами мощность силурийских отложений составила 33 м.

В период с конца силура до начала пермского периода описываемая территория подверглась поднятиям и, как следствие, осушению, результатом чего явилось образование крупного перерыва в осадконакоплении и возникновение стратиграфического несогласия [27, 77].

Пермская система (P). Рассматриваемый регион в пермское время являлся частью шельфовой окраины, где накапливались карбонатные отложения. Пермские отложения залегают с несогласием на ордовикской толще; здесь преобладают карбонатные породы.

В основании трансгрессивно залегают конгломераты, светло-серые, коричневато-серые песчаники и голубовато-серые битуминозные аргиллиты формации Фаракхан (Faraghan). Её мощность, вскрытая скважинами, составляет 124 м.

Выше разрез пермских отложений представлен карбонатами (известняки, доломитизированные известняки и доломиты) с прослоями ангидритов формации Далан. В разрезе Далан выделяют три пачки: нижняя (Н. Далан), Нар и верхняя (В. Далан). Нижняя пачка состоит из темно-серого, коричневого доломита, белого и светло-серого известняка с прослоями зеленовато-серых аргиллитов. Средняя пачка представлена в основном белыми и светло-серыми ангидритами с прослоями глинистых доломитов и светло-серых известняков. Верхняя сложена темно-серыми, серыми, коричневыми глинистыми известняками и глинистыми доломитами. Встречаются прослои ангидритов. На месторождениях Сефид Бахон и Халеган отмечается частичная глинизация карбонатных отложений нижней пачки.

Отложения формации Далан газоносны. В них содержатся основные запасы газа. Прослои ангидритов могут выполнять роль внутриформационных покрышек, экранирующих газонасыщенные известняки и доломиты. Вскрытая мощность отложений формации Далан в скважинах составляет 517 –690 м.

### Мезозой (Mz)

Основную часть осадочного чехла слагают в рассматриваемом разрезе отложения мезозоя. Распространение их повсеместное. На дневную поверхность они выходят в пределах складчатого сооружения Загроса. Эта часть разреза также хорошо изучена глубоким бурением. Мощность отложений мезозоя варьирует от 750 м (северо-запад) до 5500 м (юго-восток). На северо-западе мезозойский разрез характеризуется неполнотой: тут отсутствуют отложения нижнего мела, верхней и средней юры, среднего и нижнего триаса. В погруженной юго-восточной части Аравийской плиты [27], где его мощность возрастает до 4000–5000 м, разрез вскрыт скважинами в полном объеме. В Месопотамском прогибе в разрезе присутствуют отложения всех трех систем: триасовой, юрской и меловой [27,77]. Более половины всей мощности мезозойского разреза приходится на отложения мелового возраста. В Омане и зоне Главного надвига Загроса присутствует офиолитовая серия, представляющая сутуру Неотетиса.

*Триасовая система (Т)*. Породы триаса залегают на эрозионной поверхности формации Далан и представлены в основном карбонатами и отчасти эвапоритами формаций Канган и Даштак [77, 82].

Формация Канган представляет нижний отдел триасовой системы. Отложения представлены белыми, светло-серыми (в верхней части разреза) известняками. В средней и нижней частях разреза залегают темно-светлокоричневые, черные, глинистые известняки, светло-серые доломиты с прослоями серых глин и сланцев. К отложениям формации Канган приурочены крупные залежи газа. Вскрытая скважинами мощность формации составляет 166 – 249 м.

Средний и верхний отделы (T2–T3) триасовой системы представлены отложениями формации Даштак. В основании прослеживаются темно-коричневые глины с прослоями темно- и светло-серых до коричневых доломитов и глинистых известняков. Основной литологический состав формации представлен белыми, серовато-коричневыми и серыми ангидритами, доломитизированными известняками, доломитами, и глинами. В свою очередь в составе формации выделяют несколько пачек, их иногда индексируют как A, B, C, D.

На месторождении Агхар открыты промышленные залежи газа в нижней части разреза. Эвапориты формации Даштак являются региональной покрышкой, изолирующей газовые залежи формаций Далан и Канган. Вскрытая скважинами мощность этой формации составляет 590–1000 м.

*Юрская система (J).* Отложения юры несогласно перекрывают нижележащие породы триаса и представлены всеми тремя отделами, однако четкие границы между ними проследить весьма проблематично.

Для раннеюрского времени характерен засолоненный морской бассейн с ограниченной циркуляцией вод, где накопилась толща эвапоритов. С повышением влажности климата эвапоритовое осадконакопление сменялось карбонатов с незначительным участием эвапоритов.

Нижний отдел юры (Liassic) представлен формацией Нейриз (Neyriz), состоящей в основном из темно-серого, зеленовато-серого, коричневато-серого известняка с прослоями глинистого известняка и кристаллического доломита. Вскрытая мощность изменяется от 63 м до 251 м.

B конце ранней юры на месте современного северо-западного Предзагросского района образовался внутренний шельфовый бассейн. В средней юре этот бассейн испытал широкомасштабное затопление. В начале карбонатное позднеюрского времени осадконакопление постепенно компенсировало общее поднятие уровня моря. В регионе вновь установилась мелководно-морская обстановка.

В Хузестане представлены отложения формации Сурме (Surmeh) нижневерхнеюрского возраста. Снизу-вверх выделяют четыре пачки. Нижняя пачка Литиотис Бед (Lithiotis Bed) представлена белыми, светло-серыми плотными известняками и доломитами. Пачка Сурмех (Surmeh Shale) состоит из прослоев пиритизированного, серого до зеленовато-серого сланца и светло-коричневого известняка. Иногда встречаются прослои светло-коричневого доломита. Кремовые известняки доломитового известняка и светло-коричневого глинистого известняка с прослоями зеленовато-коричневых и темно-коричневых сланцев слагают пачку Манд Мембер (Mand Member). Верхняя пачка Араб Зоун (Arab

16

Zone) состоит из прослоев белого кристаллического ангидрита, ангидритового доломита и доломитизированного известняка. Мощность изменяется от 850 м до 1323 м.

Фациальной разновидностью верхней юры является формация Хит (Hith), представленная доломитами ДО темно-коричневых, белыми OT светло кристаллическими ангидритами и темно коричневыми известняками. В разрезе частично встречены битуминозные известняки. Мощность В скважинах составляет от 49 м до 65 м, а в среднем -52 м.

Формация Фахлян (Fahliyan) завершает разрез юрских отложений, однако ее возраст точно не определен. В основании залегают светло-коричневые доломиты, выше серые и светло-серые глинистые известняки. Мощность, вскрытая скважинами, колеблется от 193 м до 228.5 м.

Меловая система (К). Нижний отдел (К1). В раннемеловое время (неоком) началась постепенная гумидизация климата с повсеместным отложением известняков, в том числе, глинистых.

Разрез меловых отложений начинается с формации Гадван (Gadvan), в которой прослеживают три пачки. Нижняя пачка Н. Gadvan в основном представлена светло-серыми и серыми глинистыми известняками и зеленоватосерыми глинами. Средняя пачка Хали Мембер (Khalij Member) состоит из коричневых битуминозных известняков со стилолитовыми швами. Верхняя пачка Большой Гадван (B. Gadvan) представляет собой переслаивание зеленовато-серых алевролитов, глин и коричневых пиритизированных известняков. Возраст отложений от барремского до аптского ярусов. Вскрытая мощность в скважинах составляет 60 м – 110 м.

Формация Дариян (Dariyan) сложена в основном кремовыми и светлокоричневыми известняками; встречаются стилолитовые швы. Также в некоторых скважинных разрезах вскрыты серые глины с прослоями кристаллического глинистого известняка аптского яруса. Мощность формации, вскрытая скважинами 106 м – 121 м.

17

К концу альба на большей части региона восстановилось преимущественно карбонатное осадконакопление. Каждуминская (Kazhdumi) формация альбского возраста со стратиграфическим несогласием перекрывает нижележащие отложения и представлена зеленовато-серыми глинами с незначительными прослоями светло-серого и светло-коричневого известняка. Вскрытая скважинами мощность изменяется от 58 м до 80 м.

Выше по разрезу залегают светло-серые и светло-коричневые известняки с прослоями темно-серых глинистых известняков и известковистых глин Сарвакской (Sarvak) формации альб-сеноманского возраста. Вскрытая скважинами мощность составляет 128 м – 145 м.

Верхний отдел (K2). Разрез верхнемеловых отложений начинается с Лаффанских глин (Laffan shale). К ним относятся темно-зеленые, коричневатосерые известковистые глины и глинистые, микрокристаллические, пиритизированные известняки сантонского яруса, со стратиграфическим несогласием перекрывающие отложения формации Сарвак (Sarvak). Вскрытая скважинами мощность колеблется от 8 м до 24 м.

Формация Сарвак надстраивается отложениями формации Илам (Ilam), представленными серыми и светло-коричневыми битуминозными известняками и серо-зелеными глинами в основании. Вскрытая скважинами её мощность 63–105 м.

Вышележащая формация Гурпи (Gurpi) представлена серыми и темносерыми, зелеными и коричневыми, пиритизированными глинистыми известняками с тонкими прослоями зеленовато-серых глин. Возраст отложений кампан-маастрихтский; мощность, вскрытая скважинами, составляет 83–634 м. К этому отделу мела приурочена офиолитовая серия – покровы или обломки офиолитов, которые принято связывать с сутурой Неотетиса [27,42,68].

### Кайнозой (Kz)

Кайнозойские отложения имеют наибольшее развитие в Месопотамском прогибе, где они характеризуются стратиграфической полнотой и максимальной мощностью (до 2500 м). В платформенной части Аравийской плиты мощность кайнозоя уменьшается до 1000 м, а на юго-востоке – до 700 м [27].

За исключением палеоцена в разрезе присутствуют все отделы палеогена и неогена (эоцен, олигоцен, миоцен и плиоцен). Местами кайонозойский отдел представлен только отложениями палеогенового возраста (Рис. 3).

Палеогеновая система (Р). На рубеже палеоцена и эоцена широкое развитие получили мелководно-шельфовые карбонатные фации. Область накопления глинистых отложений ограничилась центральной частью морского бассейна. Эпейрогенез на рубеже эоцена и олигоцена привел к широкомасштабному размыву и появлению стратиграфических несогласий. Сводный стратиграфический разрез палеогена представлен на рисунке 5. Он составлен по стратиграфическим описаниям, найденным в различных отчетах [27,42,77,79].

Отложения формации Пабде (Pabdeh) со стратиграфическим несогласием залегают на меловых отложениях и представлены переслаиванием темно-серых и светло-коричневых глинистых известняков, песчаников и алевролитов, а также пиритизированных известняков. В кровле отмечается светло-коричневый доломит и маломощный прослой темно-серой зеленоватой глины. Глины зачастую мергелистые, карбонатные (по данным рентгено-структурного анализа) [27]. Возраст отложений палеоцен-эоценовый, мощность, вскрытая скважинами, колеблется от 136 м до 347 м.

Олигоценовый размыв сменился почти повсеместным накоплением известняков формации Асмари. Формации Асмари и Джахром (Asmari&Jahrum) состоят из светло-кремовых, светло-коричневых, темно-серых и серо-коричневых известняков. В основании разреза отмечаются прослои желто-коричневого доломита и зеленых глин. Возраст олиго-миоцен. Провести границу между палеогеном и неогеном затруднительно. Мощность, вскрытая скважинами, составляет 132–272 м.

*Неогеновая система (N).* В конце раннего и в течение среднего миоцена в регионе преобладало эвапоритовое осадконакопление с образованием Гечсаранской (Gachsaran) формации [42, 52]. Она представлена кремовым известняком и серыми, зеленовато-серыми мергелями, с прослоями

кристаллического, белого ангидрита, светло-серого доломита и зеленовато-серых и коричневых глин. Вскрытая скважинами мощность составляет 263 –630 м.

Мишанская (Mishan) формация развита не повсеместно. На месторождении Агхар отсутствует. Возраст миоценовый. Формация представлена слоистыми кремовыми и светло-серыми известняками в верхней части разреза и серыми, темно-серыми мергелями в нижней. В подошве иногда встречаются маломощные прослои светло-серого, кремового доломита. Вскрытая скважинами мощность изменяется от 166 м до 240 м.

Плиоценовые отложения представлены молассой. Нижняя формация Агаджари – пестроцветные песчаники и глины с прослоями мергеля. Верхняя формация Бахтиари – грубообломочные континентальные и прибрежно-галечные отложения. Возраст этих формаций омолаживается на запад от конца миоцена до начала-середины плейстоцена из-за продвижения фронта орогенеза в сторону Предгорного прогиба [54].



Рис. 5. Сводный стратиграфический разрез палеогеновых отложений (составлено автором по данным [27]).

Условные обозначения:
- песчаники
- алевролиты
- алевролиты
- глины
- продуктивные
отложения

Четвертичная система (Q). Четвертичные отложения моложе 1 млн лет представлены глинами, суглинками, супесями с галечниками, валунами и обломками нижележащих пород. Суммарная мощность четвертичных отложений – до 100 м.

В четвертичный период сформировался комплекс морских и речных террас – в основном, за счет климатических циклов и эвстатического колебания моря» [27]. Их разрезы представлены галечниками, песками и почвенными образованиями.

Таким образом, в изучаемом регионе на докембрийском метаморфическом фундаменте залегает мощный осадочный чехол, включающий несколько соленосных горизонтов и серию нефтепродуктивных толщ и завершающийся молассой, обусловленной Загросской орогенией.

Стратиграфия в пределах всего Месопотамского краевого прогиба, несмотря на его протяженность, в различных частях схожа между собой, основные отличия связаны с тектоническим строением, которое будет рассмотрено ниже.

Схематичные геологические разрезы, иллюстрирующие геологическое и стратиграфическое строение рассматриваемой территории, представлены на Рисунках 6–8.

### Складчатая область Загроса

#### МЕСОПОТАМСКИЙ КРАЕВОЙ ПРОГИБ СЕВЕРО - ВОСТОЧНЫЙ СКЛОН АРАВИЙСКОЙ ПЛИТЫ ЮЗ В Г ПЛАТФОРМЕННЫЙ БОРТ СКЛАДЧАТЫЙ БОРТ АНТЕКЛИЗА РУТБА (ГААРА) I CALHI Махул в. мающен-четвертичины 2-1 ср. млюцен ср.-в. палеозой в. маюцен-четвертичные CD MOROTOR и палеозой B. MET -2-H. MET в. юра p. Ropi -4\_ xm D.-B. 228 и палеозой -3 TOKEMO -10 0 20 KM --12 834

Рис. 6. Геологический разрез региона Персидского залива по линии I-I' [27]



Рис. 7. Геологический разрез региона персидского залива по линии II-II' [27].



Рис. 8. Положение выбранных разрезов на карте активных разломов региона [57].

Отдел, Свита Основной состав. Система Ярус Серия подотдел (формация) переслаивающихся пород Верхний Ага-Джари Мергели, песчаники Неогенская миоцен Мишан Φapc Мергели, глинистые известняки Средний Ангидриты, соль, глинистые Гячсаран известняки, мергели миоцен Нижний Доломитизированные миоцен Асмари известняки, доломиты Талеогено Олигоцен Джахрум Известняки вая Эоцен-Известняки, глинистые палеоцен Пабдех известняки Гупри Маастрихт Глинистые известняки, мергели Верхний Илам Кампан Известняки Бангестан Известняки, глинистые Турон-Сарвак сеноман известняки Меловая Глинистые известняки. Альб Куждуми аргиллиты, песчаники Нижний Дарьян Глины, известняки Апт Хамн Известняки, аргиллиты, Гадван песчаники Неоком Фахлиян Глинистые известняки

Табл. 1. Положение продуктивных пластов в стратиграфической схеме Месопотамского краевого прогиба [18]

### 1.3. Основные черты тектоники региона Персидского залива

В тектоническом плане рассматриваемая территория располагается в пределах древней Африкано-Аравийской платформы, а северная и северовосточная ее части – в альпийском складчатом поясе в пределах Иранского нагорья (Складчатое сооружение Загроса, Центрально-Иранская микроплита) [60, 61]. Основными тектоническими элементами региона Персидского залива являются на западе погруженный край Аравийской плиты, на севере и северовостоке область альпийской складчатости – горные сооружения Тавр в Турции и Загрос в Иране. Перед горной системой Загроса расположен Месопотамский краевой прогиб. Поверхность древнего фундамента полого погружается на платформенном склоне бассейна Персидского залива от 1,0 до 4–4,5 км и затем, в восточной его части круто углубляется до 10–14 км, формируя впадину Месопотамского прогиба (Рис. 9).



Рис. 9. Сейсмический разрез в направлении юго-запад – северо-восток (через Месопотамский прогиб [81]).

На рисунке 10 представлена карта поверхности кристаллического фундамента. Прогиб протягивается с юго-востока на северо-запад, практически вдоль Персидского залива.



Рис. 10. Структурная карта поверхности кристаллического фундамента в пределах региона Персидского залива [79]

В общем виде подвижный пояс Загроса является областью распространения линейных складок различного размера от крупных до мелких, нарушенных разрывами и простирающихся на северо-запад.

Центрально-Иранская микроплита включает в себя Западный Центрально-Иранский и Восточный Центрально-Иранский блоки, разделенные Деште-Кевирским разломом северо-восточного простирания. С востока микроплиту ограничивает Лутский блок, вдоль которого простираются разломы зоны Урало-Оманского линеамента [54,56, 76]. Лутский блок имеет меридиональное простирание. По результатам палеомагнитных исследований он, скорее всего, имеет самостоятельную историю развития; он примкнул к Центральному Ирану лишь к олигоцену. Выделяются горные зоны – Санандадж-Сирджан и Загросская. Горные зоны идут параллельно друг другу. Санандадж-Сирджан имеет то же простирание, что и Загрос, только расположен восточнее – на границе с Центральным Ираном. Обе структурные зоны имеют свое окончание на востоке напротив Ормузского пролива, утыкаются в разлом Макран [61, 76] (Рис. 11).

Загросский хребет имеет протяженность до 1200 – 1300 км. Ширина хребта составляет 200–250 км, в отельных участках он сужается до 100 км. Высота хребта над уровнем моря составляет достигает местами 4,5 км.

В неогене перед фронтом Загросской складчатой системы возник Месопотамский передовой прогиб, внутреннее крыло которого было дислоцировано и втянуто в общее поднятие Загроса в конце плиоцена. В связи с этим, осевая зона Загроса и его юго-западный макросклон сформированы вследствие срыва и складчато-надвиговых деформаций осадочного чехла прогиба.

Месопотамский краевой прогиб, как было сказано выше, сложен мощным, до 8 – 10 км, комплексом отложений палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста. Породы смяты в крупные складки протяженностью до 350 км. Стоит отметить, что простирание складок меняется от юго-восточного до восточного на юге [25, 26,54]. Это хорошо видно как на космоснимках, так и на серии структурных карт [54]. Главные тектонические деформации в пределах

27

рассматриваемой территории берут начало своего развития в миоцене, а потом сила деформаций нарастает до конца плиоцена.



Рис. 11. Тектоническая схема Ирана [58].

Примечание. 1 – третичные и четвертичные вулканиты (местами включая верхнемеловые); 2 – интрузии гранитов и диоритов, в основном мезозойские и третичные; 3 – верхнемеловые и палеоценовые офиолиты и офиолитовый меланж («цветной меланж); 4-5 – офиолитовый пояс Загроса-Омана: 4 – мезозойские офиолиты, частично, возможно, более древние, 5 – океанские отложения, в основном радиоляриты и турбидиты; 6 – палеозойские офиолиты подвижных поясов, ассоциированные с палеозойскими метаморфическими комплексами; 7 – Северо-Иранская сутура – палеозойская граница плит. Разломы: GKF – Большого Кевира; HaF – Герирудский; HF – Гиндукушский; NBF – Наин-Бафт.

Передовой прогиб Загроса в северо-западном направлении вырождается. Происходит его замыкание перед сводом Рутба в Сирии – погребенным выступом Аравийско-Нубийского щита [31, 58,59].

Рассматриваемая территория является одной из самых сейсмически активных в мире. Это место, где пересекаются крупнейшие разломные зоны

Альпийского подвижного пояса. Перемещения трех тектонических плит (Аравийская, Евразийская, Индостанская) и одного меньшего тектонического блока (Анатолийская плита) ответственны за сейсмичность данного региона [44]. Аравийская плита движется в северном направлении, взаимодействуя с Евразийской плитой, оказывает значительное влияние на причины возникновения землетрясений в рассматриваемом регионе. Скорость ее движения оценивается группой исследователей Ph. Vernant в 3 см/год [88]. Одновременно с этим, Индостанская плита движется на северо-восток со скоростью примерно 5 см/год, в то время как Иранская плита движется на север с меньшей скоростью 2 см/год [46,88]. Разные скорости движения плит приводят к дополнительным деформациям на их стыке (Рис. 12), который приходится как раз на регион Персидского залива и на территорию Ирана.

Рассмотрим детально историю формирования Месопотамского краевого прогиба. Горно-складчатое сооружение Загроса образовалось вследствие деформации части прогиба вдоль коллизионной зоны [35,45]. Формирование происходило после закрытия мезозойского океана Неотетис [32,33, 39, 43,54]. Период его развития охватывает значительный отрезок времени от триаса до палеогена. Основным источником сноса терригенного материала в краевом прогибе становились растущий горный массив Загроса (Рис. 11). Толщи пород осадочного чехла подвергались сильному сжатию. Это привело к формированию крупных антиклиналей, осложненных надвигами. Антиклинальные структуры вытянуты вдоль осевой части прогиба, это хорошо отражается на тектонических схемах и структурных картах.

29





Главный современный разлом Загроса имеет юго-восточное простирание. Это правый сдвиг глубокого заложения с компонентой взброса [15,16,54].

Разлом Дена является юго-восточным продолжением Главного Современного разлома (Рис. 13). Этот разлом тянется на юг, а затем отгибается на юго-восток. Северная часть разлома характеризуется правосдвиговыми смещениями, в южной части разлома преобладает надвигание, сопряженное с ростом антиклинали [15,16].

Далее от разлома Дена на юг ответвляются две разломные зоны: Казерун-Боразджанская и Карехбасская (Рис. 13). Обе они характеризуются правосдвиговыми смещениями. Первая разломная зона имеет скорость сдвига около 5 мм/год [88,92]. Казерун-Боразджанская зона пересекает ороген в меридиональном направлении и сочленяется на юге с надвиговой Фронтальной разломной зоной, особенно активной в провинции Фарс. Вторая разломная зона, Карехбасская, в северной части является также сдвигом меридионального направления. Южнее она переходит во флексурно-надвиговую структуру. Она имеет юго-восточное простирание с поднятым северо-восточным крылом. Разломы на северо-западе, следующие вдоль границы Аравийской плиты, характеризуются правосдвиговыми смещениями. С этими разломами сочетаются структуры складчато-надвигового характера. Для четвертичного периода характерно поперечное сокращение складчатого пояса. Скорость сокращения отложений достигает нескольких миллиметров в год [52,61].

Таким образом, в тектоническом плане для Месопотамского краевого прогиба характерно сочетание и взаимодействие двух тектонических обстановок – сдвиговые деформации и развитие надвиговых структур.

Стоит отметить, что в зоне Главного Загросского надвига, примерно параллельного Главному современному разлому, зафиксированы мезозойские офиолиты и относительно глубоководные палеоцен-эоценовые отложения. Это деформированные следы субдукции Неотетиса [24,34,36]. Обломочный материал поступал с северо-восточного крыла надвига, из Санандадж-Сирджанской зоны Центрального Ирана (Рис. 11). Северо-восточная часть Аравийской плиты, начиная с венда, устойчиво опускалась, и мезозойско-палеогеновые отложения платформенного прогиба постепенно сменились отложениями Неотетиса. Этим обусловливается постепенность перехода от субдукции к коллизии. Плавный, сглаженный переход от утонённой континентальной коры к океанической – это результат такого постепенного перехода [53,58].



Рис. 13. Активные разломы в пределах Аравийско-Иранского сегмента Альпийско-Гималайского подвижного пояса, с дополнениями автора [58]

Примечание. СВАЗ – Северо-Восточно-Анатолийская зона разломов, САЗР – Северо-Анатолийская зона разломов, ГСРЗ – Главный современный разлом Загроса (правый сдвиг), ФЗРЗ – Фронтальная зона разлома Загроса, РД – Разлом Дена (правый сдвиг и надвиг), КБЗР – Казерун-Боразджанская зона разлома (правый сдвиг), КБР – разлом Карех-Бас (правый свдиг), ФЗРЗ – Фронтальная зона разлома Загроса, ИЗ – Ипакская зона, Ст – Северо-Тегерансканский разлом, Д – провинция Дезфул, Ф – провинция Фарс, Ч – Чешуйчатая, В – Высокий Загрос, Н – Низкий Загрос и П – Предгорная. 1 – сбросы, 2 – раздвиги, 3 – надвиги и взбросы, 4 – сдвиги, 5 – флексуры, 6 – поверхностное продолжение зон субдукции, 7 – разломы с неизвестным типом смещения, 8 – разломы, активные в среднем плейстоцене с предполагаемыми фрагментарными проявлениями активности в позднем плейстоцене и голоцене. Цифры на карте (р. – разлом, з.р. – зона разломов): 1 – Амударьинский р., 2 – Апшеронского порога з.р., 3 – Араксская з.р., 4 – Ахурянский р., 5 – Балыкгельский р., 6 – Владикавказский р., 7 – Восточно-Анатолийская з.р., 8 – Восточного фланга Талышской дуги з.р., 9 – Гарнийская з.р., 10 – Гермабская з.р., 11 – Главный Копетдагский р., 12 – Главный современный разлом Загроса, 13 – Гудермесская з.р., 14 – Гяурсдагский р., 15 – Даште-Байазский р., 16 – Дена р., 17 – Дорунехская (Большекевирская) з.р., 18 – Ипакская з.р., 19 – Исак-Челекенская з.р., 20 – Казбек-Цхинвальский р., 21 – Казерун-Боразджанская з.р., 22 – Калмард р., 23 – Карех-Бас р., 24 – Кипрская дуга, 25 – Кух-Банан р., 26 – Левантская з.р., 27 – Моша р., 28 – Назранская з.р., 29 – Найбанд р., 30 – Нальчикская (Армавир-Невинномысская) з.р., 31 – Памбак-Севанский р., 32 – Равар р., 33 – Сальян-Ленгибизский (Аджичайский) р., 34 – Северного ограничения Бухарской ступени р., 35 – Северо-Анатолийская з.р., 36 – Северо-Восточно-Анатолийская зона, 37 – Северо-Тегеранский р., 38 – Тебризский (Северо-Тебризский) р., 39 – Фронтальная з.р. Загроса, 40 – Ханарасарский р., 41 – Центрально-Устюртский р., 42 – Черногорская флексура, 43 – Шахрудский р.

Граница Аравийской плиты неровная, и при сокращении остаточного прогиба Неотетиса разные части континентальной коры достигли зоны коллизионного контакта с Санандадж-Сирджанской зоной в различное время. В результате надвигание последней происходило не одной линии, и поэтому Главный надвиг Загроса представляет собой серию сменяющих друг друга надвигов общей юго-западной вергентности [58].

В прилегающей к Персидскому заливу части Загроса выделяются северозападный сегмент Дезфул с континентальной корой и юго-восточный сегмент Фарс, где кора была значительно тоньше и, возможно, более мафической. Оба сегмента – Дезфул и Фарс – имеют вергентную на юго-запад складчато-надвиговую структуру [16]. По характеру деформаций с северо-востока на юго-запад выделены четыре зоны: Чешуйчатая, Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорная (Рис. 14). Зоны различаются между собой по степени и возрасту тектонических деформаций [16,57]. Чем раньше начались деформации, тем выше степень дислоцированности. Наибольшая степень деформаций характерна для Чешуйчатой зоны, гле «деформации и рельефообразование начались в среднем-позднем миоцене, сразу после начала коллизии, и продолжались до плиоцена. В Высоком Загросе они начались в конце миоцена – начале плиоцена» [57,65,66,71], в Низком Загросе – с позднего плиоцена – начала плейстоцена, а в Предгорной зоне – с конца раннего – начала среднего плейстоцена. Выделенные зоны Загроса нанесены автором на карту. По степени деформаций на геоморфологической карте также видны различия в описанных выше зонах. Чешуйчатая зона и зона Высокого Загроса имеют более ярко

выраженные деформации на дневной поверхности, в том числе более высокие абсолютные отметки над уровнем моря. Предгорная зона и Низкий Загрос, напротив, расположены ниже по абсолютным отметкам над уровнем моря, и характеризуются менее дислоцированной поверхностью.



Рис. 14. Зональность Месопотамского краевого прогиба. [96, с дополнениями автора].

*Примечание*. Ч – Чешуйчатая зона, В – Высокий Загрос, Н – Низкий Загрос, П – Предгорная впадина. КБР – Казерун-Боразджанская зона, КБР – Карех-Бас (составлено автором).

В таблице 2 сведены основные характеристики выделенных зон. Предгорная и зона Низкого Загроса характеризуются наибольшим количеством землетрясений, при этом данные зоны формировались в более позднее время по сравнению с Зоной Высокого Загроса. Отсюда вывод: чем моложе главная фаза деформаций тектонической зоны, тем сейсмически активнее эта зона в настоящее время.

Табл. 2. Различия по степени деформаций тектонических зон Месопотамского краевого прогиба (составлено автором)

Зона	Время формирования, млн.лет	Степень деформации	Количество землетрясен ий, %
Чешуйчатая зона	средний- позлний миоцен	100	1
Высокий Загрос	5,3-4,9		21
Низкий Загрос	3,1-2,3		35
Предгорная зона	1,2-0,7		43

Коллизия и сжатие в зоне Главного надвига начались с возникновения перед фронтом в Чешуйчатой зоне пологих складок типа тех, что сейчас его развиваются в Предгорной зоне. По мере увеличения складчатых изгибов началось скольжение осадочного чехла по отдельным плоскостям, которые постепенно сливались в общий срыв в базальной вендской Ормузской формации эвапоритов. При этом интенсивность роста складчатой зоны возрастала. Отслоенный фундамент, утолщаясь и воздымаясь при сжатии, продолжал пододвигаться в зоне Главного надвига. Наконец, потенциал сжатия Чешуйчатой зоны исчерпался. Произошло её изостатическое поднятие. Одновременно глубинное пододвигание сместилось во фронт Чешуйчатой зоны. Перед ним началась такая же последовательность деформаций, приведшая к формированию Высокого Загроса, после чего аналогичные процессы происходили в Низком Загросе, а затем начались в Предгорной зоне. В сегменте Дезфул, где Ормузские эвапориты сокращены в мощности, масштабы срыва чехла и ширина складчатых зон меньше, чем в сегменте Фарс [58]. Это указывает на то, что Фарс более тектонически осложнен.

Таким образом, активная тектоника рассматриваемого региона определяется тектоническими движениями по разломам, простирающимся на север или северозапад, а на юге также на восток. На севере преобладают субширотные активные нарушения [58,71]. Вдоль Загроса протягивается ряд разломов, имеющих наряду со взбросовой еще и правосдвиговую компоненту смещений. Для рассматриваемой территории характерно преимущественно меридиональное направление горизонтального сжатия и укорочения.

Геологическое развитие рассматриваемой территории делится на два основных периода.

В первый период она находилась в составе древней континентальной окраины океана Неотетис.

Второй период – это период развития Месопотамского передового прогиба и орогена Загроса (коллизионный этап).

Первый период намного длительнее второго. Он включает палеозой, мезозой и палеоцен-эоценовое время, второй представляет олигоцен, миоцен, плиоцен и четвертичное время. Второй период характеризуется коллизионным типом развития. Коллизионный этап делится в свою очередь на две стадии. Ранняя происходила с конца эоцена до начала позднего миоцена. Поздняя продолжается с конца миоцена до голоцена. Стадии характеризуются различными термодинамическими и тектоническими условиями. Различные геодинамические условия определяют стиль деформаций и напряжений. На ранней стадии происходили латеральные перемещения тектонически расслоенной земной коры. Расслоению способствовал прогрев коры, который выражался в проявлении вулканизма на соседних территориях. На поздней стадии интенсивного уменьшилась степень перемещений блоков, произошло воздымание территории, что привело к образованию наряду со сдвигами взбросовых структур. На поздней стадии доминировали две тектонические обстановки – сдвиговая и взбросовая.

Современные тектонические движения в пределах рассматриваемой территории является результатом многофакторного процесса (Рис. 15). В этот процесс входит коллизионное столкновение плит и различных тектонических блоков, глубинные структурные трансформации, связанные с отслоением осадочного чехла и верхней части земной коры. Все эти факторы определяют интенсивность землетрясений в пределах региона Персидского залива. Наиболее тектонически осложнена провинция Фарс, по сравнению с провинцией Дезфул.

36


Рис. 15. Схема тектонического строения региона Персидского залива [56, с дополнениями автора].

1- осадочный чехол, 2 – Ормузская формация в основании осадочного чехла, 3 - кристаллическая часть земной коры, 4 — фундамент Санандадж-Сирджанской зоны Центрального Ирана. Буквенные обозначения. АП — Аравийская плита, СС – Санандадж-Сирджан

Тектонические зоны: ПЗ – Предгорная зона, НЗ – Низкий Загрос, ВЗ – Высокий Загрос, ЧЗ – Чешуйчатая зона. Цифры в кружочках: 1 – Главный надвиг Загроса, 2 – Фронтальная зона разлома Загрос.

# 1.4. Нефтегазоносность региона Персидского залива и сопредельных территорий

Персидский нефтегазоносный бассейн является областью огромного нефтегазового потенциала, по своим запасам данный регион уникален. Здесь сосредоточено 65% мировых разведанных запасов нефти и 35% запасов природного газа. С первой половины XX века рассматриваемый регион занимает лидирующее положение среди нефтедобывающих регионов мира [30]. Начальные извлекаемые запасы нефти оцениваются в 53,6 млрд т, начальные извлекаемые запасы газа – в 26,7 трлн м<sup>3</sup>.

Первое нефтяное месторождение Месджеде-Солейман открыто в 1908 году, в разработке – с 1911 года. Первое газовое месторождение Парс открыто в 1965. К настоящему моменту выявлено порядка 400 нефтяных и газонефтяных и около 50 газовых месторождений [21,27]. Из них непосредственно «в пределах региона Персидского залива насчитывается порядка 55 нефтяных, 6 газонефтяных и 3 газовых месторождения, в т.ч. 36 нефтяных и 6 газовых месторождений-гигантов с начальными извлекаемыми запасами свыше 300 млн т нефти и 500 млрд м<sup>3</sup> газа. Крупнейшие нефтяные месторождения: Большой Бурган (9140 млн т), Гавар (10 136 млн т); Румайла и Северный Румайла (3783 млн т), Саффания-Хафджи (3451 млн т); газовые – Кенган (820 млрд м<sup>3</sup>), Парс (2120 млрд м<sup>3</sup>), Северное (до 6000 млрд м<sup>3</sup>)» [21,29, 72]. Основные месторождения региона Персидского залива представлены в таблице 3.

N4	Group	Нач. геол. запасы	
месторождение	Страна	нефти, млрд.т	
Гавар	Саудовская Аравия	11,9	
Ага-Джари	Иран	10	
Большой Бурган	Кувейт	9,3	
Эс-Саффания	Саудовская Аравия	3,5	
Киркук	Ирак	3	
Румайла	Ирак	2,8	
Раудатайн	Кувейт	2	
Абкайк	Саудовская Аравия	1,6	
Гечсаран	Иран	1,5	
Марун	Иран	1,4	
Ферейдун-Марджан	Ирак	1,3	
Ахваз	Иран	1,2	
Катиф	Саудовская Аравия	1,2	
Биби-Хекиме	Иран	1,1	
Зубайр	Ирак	1	
Даммам	Саудовская Аравия	0,8	
Берри	Саудовская Аравия	0,8	
Хусания	Саудовская Аравия	0,8	
Абу-Хадрия	Саудовская Аравия	0,8	
Вафра	Кувейт	0,7	
Мурбан	ОАЭ	0,6	
Духан	Катар	0,6	
Месджеде-Солейман	Иран	0,5	
Бу-Хаза	ОАЭ	0,5	

Табл. 3. Геологические запасы нефти крупнейших месторождений Персидского залива (составлено автором)

Нефти Персидского нефтегазоносного бассейна преимущественно легкие и малосернистые. Плотность нефти месторождений изменяется в диапазоне 0,8–0,91 г/см<sup>3</sup>, в среднем 0,85 г/см<sup>3</sup>, содержание серы от 1 до 4%, в среднем 2%. Глубина залегания продуктивных пластов – от 1000 м до 4000 м.

Средний дебит нефти на месторождениях в Саудовской Аравии [78], Иране, Ираке, Кувейте составляет 800 т в сутки, тогда как в среднем для мира данный показатель – всего 3 т/сут. На месторождениях Гавар и Большой Бурган запускные дебиты нефти составляет 500–600 т/сут, а отдельные скважины дают 1500–2000 т/сут.

Персидского В пределах региона залива нефтегазоносные районы располагаются как на севере Ирана (Центрально-Иранский бассейн), так и в южной пределах складчатого борта Месопотамского части, В прогиба нефтегазоносного бассейна Персидского залива (Рис. 16).

Помимо уже открытых месторождений и введенных в разработку в пределах рассматриваемой территории выделяются небольшие по площади впадины, которые рассматриваются в качестве возможно нефтегазоносных бассейнов. Эти объекты находятся на стадии разведочных работ. Среди них Лутский блок и Макранская зона.

В диссертационном исследовании подробно рассмотрены месторождения Предзагросского района [72]. Здесь нефтегазоносные продуктивные пласты приурочены к стратиграфическому интервалу от верхней перми до миоцена включительно (Рис. 17). Глубина этажа нефтеносности составляет в среднем 3 км, данный параметр нужен будет при анализе глубины очагов землетрясений. К важнейшим верхнепермско-триасовый, комплексам относятся: средневерхнеюрский, нижнемеловой, альб-верхнемеловой олигоцен-И нижнемиоценовый.



Рис. 16. Схема расположения основных месторождений нефти и газа в пределах региона Персидского залива и его северо-восточного побережья [90]



Рис. 17. Схема стратиграфического положения основных нефтегазовых комплексов Персидского залива [18]

Верхнепермско-триасовый комплекс содержит почти половину выявленных в бассейне запасов газа. Как было сказано выше, верхнепермско-триасовые отложения преимущественно представлены доломитами и известняками. В конце ранней перми произошла крупная морская трансгрессия, обмеление бассейна, что привело к крупному осаждению известняков и доломитов в пределах рассматриваемой территории (Рис. 18).



Рис. 18. Схема распространения карбонатов (известняк) и эвапоритов в Месопотамском прогибе [79]

Коллекторы представлены доломитизированными известняками и доломитами формаций Далан и Канган. Залежи экранируются триасовыми эвапоритами формации Даштак [18, 21].

Средне-верхнеюрский комплекс содержит скопления УВ в коллекторских горизонтах формации Араб, сложенных шельфовыми оолитовыми известняками. Залежи экранируются эвапоритами формации Хит (верхняя юра, титон). Ловушки приурочены к антиклиналям, облекающим соляные штоки.

Нижнемеловой комплекс присутствует в 33 месторождениях и содержит скопления как нефти, так и газа. Выявлено несколько продуктивных пластов, приуроченных к формациям Фахлиян и Дарьян, сложенным известняками. Основной покрышкой служат глинистые сланцы и глины формации Каждуми, а также глины формации Гадван, разделяющей известняки Фахлиян и Дарьян.

Альб-верхнемеловой комплекс содержит скопления УB 52 в месторождениях. На долю этого комплекса приходится почти четверть запасов нефти около 8% газа. Основные горизонты-коллекторы, И сложенные известняками, приурочены к формациям Сарвак и Илам. Флюидоупором служат глины формации Гурпи. Ловушки представляют собой антиклинали, как правило, асимметричные или принадвиговые. Не исключено присутствие литологических ловушек, связанных с локальным замещением пористых разностей известняков массивными непроницаемыми.

Олигоцен-нижнемиоценовый комплекс присутствует в 50 месторождениях и содержит 60% запасов нефти и около 20% запасов газа.

Коллекторы сложены мелководно-шельфовыми известняками формации Асмари. Надежным флюидоупором служат эвапориты формации Гечсаран. Единственный тип ловушек – структурный. Ловушки представляют собой классические антиклинали, часто асимметричные, с крутыми юго-западными крыльями [21].

Предзагросской области Ловушки В приурочены В основном К поднадвиговым антиклиналям, а В пределах Персидского залива к антиклиналям, облекающим соляные купола и поднятия фундамента. Это основополагающий критерий для их поиска.

Высокий нефтеносный потенциал региона Персидского залива связан с его стратиграфическими и тектоническими особенностями [11]. В соответствии с парадигмой органического происхождения В. С. Шеина, нефтегазоносность обусловлена, прежде всего, осадконакоплением, то есть чем больше мощность, объем осадков, скорость их накопления, чем более благоприятны условия захоронения и преобразования органического вещества, тем больше вероятность нефтегазообразования И нефтегазонакопления [68]. В соответствии С нефтегазоносных концепциями геодинамики регионов, образование седиментационных бассейнов и приуроченных к ним нефтегазоносных регионов обусловлено дрейфом плит и изостатическим выравниванием отдельных их частей [18] (оно обнаруживается обычно после процессов тектонического

совмещения блоков литосферы при столкновении плит, при расколе континентов в результате потери тепла новообразованной корой, а также при лавинном осадконакоплении). Формирование нефтегазоносных бассейнов зависит от характера проявлений тех или иных геодинамических обстановок в регионе.

По мнению В. Е. Хаина [65, 66], Л. Э. Левина [38], глобальные пояса нефтегазоносности приурочены к пассивным окраинам континентов – современным и древним (Рис. 19). Персидский бассейн относится к современным. Этот тип бассейна характеризуется высокой скоростью седиментации – до 5–10 см/10<sup>3</sup> лет. Термический режим здесь выглядит так: на глубине 5–7,5 км устанавливается температура до 100 градусов по Цельсия.



Рис. 19. Генерация углеводородов в зонах поддвига океанических плит под островные дуги и активные окраины континента: 1 – пути миграции углеводородов из зоны поддвига плит в структуры надвигаемой плиты; 2 – образовавшиеся залежи углеводородов [65]

Подводя итог главе 1, можно сделать следующие выводы:

1. Ловушки нефти и газа в пределах региона Персидского залива приурочены в основном к принадвиговым антиклиналям, а в пределах Персидского залива – к антиклиналям, облекающим соляные купола и поднятия фундамента. Это основополагающий критерий для их поиска месторождений нефти и газа [14,18].

2. Залежи нефти и газа находятся на глубине не более 3000 м.

3. Эвапоритовые покрышки контролируют размещение в пределах территории Персидского залива значительных запасов и ресурсов УВ.

4. Ловушки, сформированные в тектоническом режиме сжатия, имеют больше запасов, чем ловушки, сформированные в условиях растяжения.

5. Тектоническое строение региона Персидского залива – результат многофакторного процесса. В него входит коллизионное столкновение плит и различных тектонических блоков, глубинные структурные, фазовые И вещественные преобразования, обусловленные влиянием на литосферу потоков активной астеносферы, а также структурные трансформации, связанные с отслоением осадочного чехла по плоскостям солевых пластов и верхней части земной коры. Широтные активные нарушения преобладают на севере [56]. Кулисный ряд разломов наряду со взбросовой составляющей характеризуется активными правосдвиговыми смещениями. Он протягивается вдоль Загроса. Для рассматриваемого региона характерно преимущественно меридиональное направление горизонтального сжатия и одновременно укорочения земной коры. Казерун-Боразджанская группа разломов разделяет территорию на своего рода блоки: провинцию Фарс и провинцию Дезфул, различающиеся характером тектогенеза и историей развития.

6. Соляные пласты играют огромную роль в латеральных перемещениях тектонически расслоенной земной коры, что приводит к преобладанию в регионе надвиговых деформаций. Соляные диапиры и небольшие купола представляют собой значительные деформации, усиленные тектоническими движениями. Они возникают в процессе погружения осадков под действием нагрузки вышележащих толщ, особенно в условиях латерального сжатия.

# Глава 2. МЕТОДЫ СЕЙСМОТЕКТОНИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В основу работы автором положен обширный геологический материал. Проведен анализ и оценка порядка 831 землетрясений по сейсмическим каталогам: 1) NEIC (The National Earthquake Information Center), сформированных Национальной геологической службой США (The United States Geological Survey) [89]; 2) IRIS (Incorporated research institutions for seismology) [91]. В сейсмических каталогах IRIS по каждому сейсмическому событию есть сейсмограммы.

Из сейсмических каталогов для анализа брались данные по интенсивности, происхождению и глубине очага. Строились различные статистические графики распределения различных параметров землетрясений.

землетрясений. Анализировались Это механизмы очагов один ИЗ важнейших параметров, характеризующих сейсмическое событие. Он связывается внезапной подвижкой горных пород, сопровождающейся излучением с волн по поверхности ослабленной прочности, сейсмических И отражает одновременно пространственную ориентацию осей главных напряжений, возможных плоскостей разрывов и подвижек в очаге землетрясения [41,48, 50].

Введен тензор сейсмического момента. Обсуждается кинематика сейсмического источника и связанные с этим проблемы, рассматриваются спектр и параметры источника. Представлены различные шкалы величин и взаимосвязи между величинами и сейсмической энергией.

Метод модели повторяемости – важнейшая особенность при оценке сейсмической опасности, обусловленная большими землетрясениями. График повторяемости характеризует сейсмический режим, его стабильность и интенсивность. В конце 1930-х – начале 1940-х был открыт закон повторяемости землетрясений Ишимото-Аида, а также Гутенберга-Рихтера:

log10 N = a - bM, (1) где N – количество событий определенной магнитуды; а и b – параметры графика, соответственно уровень прямой при M=0 и угол ее наклона.

Исходными материалами для расчета графика повторяемости являются каталоги землетрясений, составленные по данным сети сейсмических станций. Также привлекаются данные доинструментального и раннеинструментального периодов, полученные на основании архивных, палео- и макросейсмических материалов. Для многих регионов, в том числе и для территории Загроса период инструментальных наблюдений достаточно короткий, а исторические данные весьма фрагментарны и охватывают небольшой интервал времени, в то время как период повторения сильнейших событий во многих регионах составляет сотни и даже тысячи лет. Таким образом, неполнота сейсмостатистического материала заставляет нас для определения верхнего уровня сейсмической активности пользоваться палеосейсмогеологическим методом [47]. Палеосейсмология дополняет исторические и инструментальные сведения о сейсмичности путем описания и датирования крупных палеоземлетрясений.

«Палеосейсмогеологический метод обладает рядом как достоинств, так и недостатков. По мнению В. П. Солоненко он позволяет: определить высшую степень сейсмической активности для конкретных локальных районов; перейти от общего к детальному сейсмическому районированию, даже для тех территорий, сейсмостатистический где материал отсутствует; определить высшую макросейсмическую балльность землетрясений в районах с недостаточным количеством сейсмостатистических данных; использовать все многообразие геологических явлений, связанных с землетрясениями, развитием рельефа, осадконакоплением» [47]. Палеосейсмолог может исследовать только те землетрясения, которые вызывают различимые деформации (деформированные элементы разреза, смещенные формы рельефа, сейсмогенные отложения).

Помимо перечисленных методов автор привлекал информацию базы данных активных разломов Евразии, созданной Д. М. Бачмановым, А. И. Кожуриным, В. Г. Трифоновым в Лаборатории неотектоники и современной геодинамики Геологического института РАН. «База данных об активных разломах

Евразии (БД), интегрировала в едином формате материал, накопленный к настоящему времени многими исследователями. Она вмещает более 30 тыс. географически привязанных объектов – разломов, зон разломов и связанных с ними структурных форм с признаками последних перемещений в позднем плейстоцене и голоцене. Масштаб, в котором составлена БД, – 1:500000, а базовый демонстрационный масштаб – 1:1000000» [92].

Каждый объект БД снабжен двумя видами характеристик (атрибутов) – обосновывающими и оценочными. Обосновывающие атрибуты содержат сведения об объектах – их названия, данные о морфологии и кинематике, амплитуды смещений за разные отрезки времени, рассчитанные по ним скорости движений, возраст последних зафиксированных признаков активности, проявления сейсмичности и палеосейсмичности, соотношения объектов с параметрами коровых землетрясений и другие характеристики, а также сведения об источниках информации, список которых приложен к БД. Оценочные атрибуты – это система индексов, отражающих кинематику разломов согласно принятой в структурной геологии типизации, ранг скорости позднечетвертичных движений (три градации) и степень достоверности выделения структуры как активной (четыре градации). Индексы позволяют сопоставлять объекты по любому из атрибутов компьютерным способом между собой и с любыми другими информации с помощью любой ГИС-программы. видами оцифрованной Разработанная ГИН РАН база данных дает возможность получения сведений о разломах и решения более общих задач – тематического картографирования, определения параметров современных геодинамических процессов, оценки сейсмической и других геодинамических опасностей, тенденций тектонического развития на последнем, плиоцен-четвертичном, этапе развития Земли. Формат БД допускает ее постоянное пополнение и коррекцию с появлением новых сведений [92].

Также автором собран и проанализирован большой материал по определению сейсмичности – порядка 85 работ зарубежных и российских геологов и геофизиков, что легло в основу диссертационного исследования.

Изучению активных разломов и палеосейсмичности в целом посвящена обширная литература. Подробно история становления этого направления тектонических исследований описана В. Г. Трифоновым [56,57]. Существенный развитие методики изучения активных вклад В разломов В разных геодинамических регионах и ситуациях внесли российские ученые: А. В. Ваков, А. В. и С. Г. Аржанниковы, А. В. Чипизубов, А. Л. Стром, В. И. Макаров, В. С. Буртман, В. С. и Л. П. Имаевы, Е. А. Рогожин, К. Е. Абдрахматов, Н. В. Лукина, О.В. Лунина, О.П. Смекалин, Р.М. Лобацкая, С.И. Шерман, С.Ф. Скобелев, Т. П. Иванова и др. Среди зарубежных исследователей активных разломов отметим монографии: «Геология землетрясений» Р. Йейтса и соавт. [Yeats et al., 1997], «Механика землетрясений и разломов» К. Шольца [Scholz, 2002], «Палеосейсмология» (под ред. МакКалпина, 2012) [47].

Таким образом, в работе применялись современные сейсмотектонические методы – анализ сейсмических каталогов, анализ тектонических и геоморфологических схем.

# Глава 3. АНАЛИЗ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СЕЙСМИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ И ИХ ХАРАКТЕРИСТИКА В РАЙОНЕ РАБОТ

Землетрясение – это резкие сотрясения участков земной поверхности, в результате которых происходят нарушения сплошности горных пород, разрывы и изменения рельефа поверхности земли. Причины землетрясений различны и определяют их природу. Различают следующие причины землетрясений. Тектонические причины «обусловлены высвобождением энергии, возникающей вследствие деформаций толщ горных пород. Вулканические причины связаны с обрушением движением магмы, взрывом И вулканических аппаратов. Денудационные причины связаны с поверхностными процессами (крупными обвалами, обрушением сводов карстовых полостей). Техногенные причины связаны с деятельностью человека (добыча нефти и газа, ядерные взрывы и пр.)» [10]. В настоящем исследовании рассматриваются землетрясения, вызванные тектоническими причинами. Землетрясения происходят под действием импульсов из глубинных слоев земной коры.

Изучение и прогнозирование природных явлений – одна из сложных и востребованных научно-прикладных задач. Землетрясения влекут за собой колоссальные человеческие жертвы, разрушение зданий и сооружений вследствие колебаний земной коры. Страны, расположенные в зонах повышенной сейсмической опасности, несут огромные экономические потери.

В настояшее время накоплен значительный опыт по изучению геодинамических обстановок различных районов, которые характеризуются различной природой сейсмической опасности. Систематизированы теоретические материалы по развитию сейсмического процесса в очаговой области, которые сопровождаются различными предвестниками землетрясений [63], накоплен огромный инструментальный опыт. На базе комплексирования разномасштабных данных становится возможным прогноз сейсмических событий. Комплексный подход позволяет минимизировать ущерб при возникновении катастрофических природных катаклизмов.

Детальное сейсмотектоническое районирование на основе регионального анализа с использованием комплекса геолого-геофизических и сейсмологических данных позволяет картировать потенциальные сейсмические очаги, а также оценить максимальную прогнозируемую магнитуду землетрясений региона [50, 64].

Распространение на земном шаре землетрясений неравномерно. «Одни места характеризуются высокой сейсмичностью, а другие – практически асейсмичны. Зоны образуют концентрации эпицентров протяженные пояса» [64,67], крупнейшими из которых на суше являются Тихоокеанский, и Средиземноморско-Трансазиатский. Последний проходит через территорию Персидского залива и в своей западной протягивается перпендикулярно части OH Срединно-Атлантическому хребту. В геотектоническом плане ему отвечает Альпийско-Гималайский складчатый пояс. Этот пояс еще называют широтным, так как он тянется параллельно экватору. Тихоокеанский пояс окружает Тихий океан. В своей восточной части протягивается перпендикулярно Средиземноморско-OH Трансазиатскому поясу (Рис. 20). Повышенной сейсмичностью отличаются также зоны океанического спрединга. Закономерное распространение землетрясений объясняется современной теорией тектоники литосферных плит.



#### Рис. 20. Карта сейсмических поясов Земли [93]

Теория тектоники литосферных плит тесно связана с фактом, что земная кора находится в напряженно-деформированном состоянии. В глобальном масштабе стресс определяется движением ПЛИТ И особенно наглядно отображается на картах сейсмической зональности и рассчитанных сейсмических движений (Рис. 21). На рисунке 21 показано, что ряд землетрясений связан с процессом дивергенции (зоны серой заливки, соответствующие океаническим хребтам), тогда как другие связаны с зонами конвергенции (зоны «точечной» заливки, отвечающие активным окраинам и современным горным цепям). Стрелками схематически показано направление движения. Рассматриваемый регион относится к зоне конвергенции. При конвергенции может возникать субдукция, в процессе которой литосферная плита погружается на большие глубины, а затем – коллизия с надвигами и орогенезом, что и происходит в рассматриваемом регионе. (Рис. 21). Напряжения в литосферных плитах могут вызывать деформации растяжения, либо сжатия, а также сдвиговые перемещения.



Рис. 21. Современное поле напряжений по данным сейсмичности. Пояснения к рисунку даны в тексте [32].

Таким образом, в общем виде рассматриваемый регион с тектонической точки зрения – это результат сближения (конвергенции) литосферных плит,

приводящего к усилению и сложному перераспределению тектонических напряжений. Режим сближения плит оказывает значительное влияние на причины возникновения землетрясений в рассматриваемом регионе.

#### 3.1. Анализ исторических землетрясений

С целью прогнозирования землетрясений, влекущих катастрофические разрушения, осуществляется анализ и мониторинг исторических данных по сейсмотектоническим и сейсмологическим характеристикам, проводится ретроспективный анализ событий и основных показателей очагов землетрясений. Ретроспективный анализ – это анализ данных с учетом изменения во времени, начиная от прошедшего времени к текущему.

На основе анализа и систематизации литературных, и, в частности, архивных материалов об исторических землетрясениях, данных палеогеографии и тектоники выявлены геодинамические причины сейсмической активности Персидского залива.

В данном разделе приводятся сведения об исторических землетрясениях на Ближнем Востоке. Для анализа взят период Средневековья. Сведения о катастрофических природных явлениях при соотнесении их с современными событиями 2005–2018 годов позволяют определить основные закономерности сейсмической активности региона. Метод аналогии от прошлого к настоящему, «применение различных математических и статистических методов обработки значительного массива данных дают объективную оценку периодичности землетрясений» [64]. Этот метод позволяет выявить периодичность фаз сейсмической активизации в течение длительных временных отрезков и установить определенные закономерности в повторяемости сейсмических событий.

В ходе изучения архивных материалов установлено, что основные описания землетрясений на Ближнем Востоке датируются ранним средневековьем. В работах известного азербайджанского исследователя 3. М. Буниятова [20] сведена и описана информация о землетрясениях, наблюдавшихся в средние века на территории Ближнего и Среднего Востока. «В раннем средневековье наиболее частые землетрясения зафиксированы на территории современного Ирака. Ниже будет показано, что в настоящее время землетрясения происходят в основном на территории Ирана. В течение VI и VII вв. стихийных бедствий в виде землетрясений на территории Ирака не зафиксировано в летописях. Найдены записи о том, что первые катастрофы происходили в 716–717, 846–847, 859–860, 871–872, 881, 902, 922, 958, 974, 977–978, 979, 986 гг. Первое из них относится к VIII в., четыре произошло в IX в., семь – в X в, всего 12 крупных землетрясений. На территории Ирана землетрясения были отмечены 10 раз – в 580, 819, 839–840, 855, 856, 864, 894, 942–943, 956–957, 968 гг. Еще один раз – в 848/849 гг., землетрясение отмечено в Герате в пределах современного Афганистана [89].

На рисунке 22 показана динамика землетрясений по векам. Всего за рассматриваемый период произошло 12 землетрясений [67]. Видно, что в период средневековья наибольшая тектоническая активность проявляла себя в IX–X веке. Период VI–VIII характеризовался стабильным режимом. По количеству землетрясений Иран и Ирак примерно сопоставимы между собой.



Рис. 22. Динамика землетрясений Ближнего Востока в раннем средневековье (составлено автором)

При анализе исторических летописей установлено, что тектонические движения и афтершоки при крупных землетрясениях продолжались до нескольких месяцев. «В VIII веке сотрясения, связанные с землетрясением в

Ираке, длились два месяца, их длительность установлена по летописным материалам. По другим летописям толчки в VIII веке продолжались полгода. Скорее всего, это был период высокой сейсмической активности. Вот как говорится в источнике: в 819 г. в Хорасане произошло мощное землетрясение, продолжавшееся 70 дней. В 855 г. в иранском городе Рее произошло мощное землетрясение. Рухнули жилища, под которыми погибло много людей. Толчки продолжались 40 дней» [67, 70]. По данному описанию в соответствии с сейсмической шкалой Института Физики Земли РАН можно предположить, что магнитуда составила 6–8.

Самое крупное землетрясение произошло в Иране в IX веке. Оно случилось 22 декабря 856 года н.э. Землетрясение имело магнитуду около 7,9, не менее 200000 человек погибло. Ситуация осложнилась окружающей геологической обстановкой, увеличившей зону сотрясений максимальной разрушительной силы, которая простиралась приблизительно на 350 км в восточной части Эльбурса, включая области Табаристана и Горгана. Эпицентр землетрясения, как было установлено, находился близко к городу Дамгану, который в то время был столицей персидской провинции Кумис. Землетрясение считается шестым по количеству человеческих жертв во всей истории землетрясений. В этом регионе несколько лет продолжались повторные толчки после основного землетрясения, а один особенно сильный повторный толчок в западном Хорасане вызвал еще большие разрушения.

«Во время землетрясения 871–872 гг. в Саймаре рухнула большая часть строений города, обвалились городские стены. Погибло более 20 тысяч жителей города. В 922 г. в Ираке земля разверзлась в 17 местах. Самая большая расщелина имела ширину в тысячу локтей, самая малая – двести локтей. В эти расщелины провалилось 1300 селений» [67]. Такие разрушения свидетельствуют о том, что магнитуда землетрясений в X веке достигала 8 или 11-12 баллов по шкале Меркалли.

Анализируя найденную информацию по имеющимся названиям городов, можно установить следующую закономерность. Зона эпицентров расположена в

горной цепи Эльбурс, где сжатие земной коры обусловлено комбинацией надвига и левого сдвига [52], то есть в условиях интегрального воздействия двух направлений тектонических сил.

Выводы: в летописях выделены только крупнейшие землетрясения, повлёкшие катастрофические разрушения. Судя по степени разрушений, можно предположить, что магнитуда могла достигать 7-8. Анализируя данные IX и X веков, на которые пришелся пик сейсмической активности, можно сделать следующий вывод. Средняя периодичность крупных разрушений – один раз в 15 лет. В тектоническом плане для исторических землетрясений характерны тектонические деформации двух типов – сдвиговые и надвиговые. Приведенные выше магнитуды средневековых землетрясений следует учитывать при анализе периодичности современных землетрясений прогноза будущих И ДЛЯ катастрофических сейсмических событий.

## 3.2. Сейсмотектонические и сейсмологические характеристики очагов сильных землетрясений Персидского залива в XX веке

В XX веке землетрясений в районе Персидского залива магнитудой M<sub>w</sub> > 8 зафиксировано не было (Рис. 23). Единственное крупное землетрясение было на берегу Аравийского моря в Карачи в 1945 году магнитудой M<sub>w</sub>=8. Глубина очага составила 15 км.

В настоящем исследовании землетрясения XX века анализировались укрупненно, с целью выявления основных закономерностей, соотнесения их с древними историческими событиями и экстраполяции на последние события 2005– 2018 годов.

Всего в период XX века в районе Персидского залива зафиксировано 1659 землетрясений магнитудой М<sub>w</sub>>4,5. Средняя глубина очага составляла 32 км, по результатам сейсмических каталогов. Столь малое количество землетрясений, отнесенное к 10-летнему интервалу, связано, скорее всего, с тем, что до 1940 года мониторинг сейсмической активности проводился слабо. Только в 1935 году американским сейсмологом Чарльзом Рихтером была предложена шкала магнитуд.

Средняя магнитуда с начала к концу века уменьшается, но это связано скорее не с тем, что во второй половине века произошло снижение сейсмической активности, а с тем, что в первой половине XX века фиксировались только крупные землетрясения с магнитудой М<sub>w</sub>=6-7 и выше (Рис. 23), что обусловлено несовершенством технической аппаратуры в первой половине XX века.



Рис. 23. Динамика землетрясений по годам в XX веке в регионе Персидского залива (составлено автором). Оранжевая линия – средние магнитуды землетрясений, столбцы – количество землетрясений.

В связи с последовательным усовершенствованием технической и измерительной аппаратуры XX век был разбит для анализа на три части: период 1900–1950, 1950–1970 и 1970–2000 года. В первый период произошло 8 землетрясений магнитудой от 5,9 до 7,3 (Рис. 24, 25). Средняя глубина очага составляла 15 км. Периодичность между землетрясениями составила в среднем 5–6 лет. Землетрясение с магнитудой 7,3 произошло в 1909 году.



Рис. 24. Динамика землетрясений 1950–1970 года в пределах Персидского залива. Красный пунктир – разбиение по годам (составлено автором)

В период 1950–1970 годы зафиксировано 56 очагов сейсмической активности (по 3 землетрясения в год) с магнитудой от 4,5 до 7,1 в среднем 5,6. Средняя глубина очага 19 км по данным сейсмических каталогов. Периодичность землетрясений магнитудой выше 6 не равномерна. Можно выделить три периода с проявлениями землетрясений магнитудой выше 6: 1956 г, 1958–1961 годы и 1968 год. Если сопоставить с первым периодом 1900–1950, то промежуток между двумя крупными проявлениями сейсмической активности с магнитудой выше 6 составил 47 лет.

В третьем периоде зафиксировано значительно больше землетрясений – 1595. Это связано, в том числе, и с развитием центров мониторинга за сейсмической активностью на Земле. График (Рис. 25) подтверждает этот тезис: до 1974 года фиксировалось 3–4 землетрясения в год, и средняя магнитуда была выше 5,6. После 1973 года в среднем фиксировалось по 50 землетрясений в год [73]. Средняя магнитуда составила 4,8. Средняя глубина очага – 32 км.



Рис. 25. Распределение землетрясений по годам 1970–2000 (составлено автором). Оранжевая линия – магнитуды, столбцы – количество землетрясений.

Если анализировать количество землетрясений по годам [12], начиная с 1970 года, то характер их распределения неравномерный (см. Рис. 25). Выделяется три пика – период 1975–1981, период 1988–1990, период 1997–1999. Промежуток между периодами максимальной сейсмической активности (между периодами проявления однотипных сейсмических явлений) составляет в среднем 7-10 лет.

Таким образом, в период XX века можно установить следующие временные закономерности и сделать выводы:

1) Активный сейсмический мониторинг землетрясений начался после 1973 года;

2) Промежуток между периодами с интенсивной сейсмической активностью (Mw - 6-8) составляет в среднем 7-10 лет;

3) Средняя магнитуда составляет 4,8, среднее количество землетрясений в год с Mw>4.5 – 50.

На Рис. 26 представлено расположение очагов землетрясений ХХ-го века.







Рис. 26. Распространение очагов землетрясений региона Персидского залива в XX веке (составлено автором)

### 3.3. Сейсмотектонические и сейсмологические характеристики очагов сильных землетрясений Персидского залива в XXI веке

Нами проанализированы данные сейсмических каталогов за 2005-2018 гг. XXI-го века. К сожалению, данных о сейсмической активности региона за 2001-2004 годы нам получить не удалось.

В период с 2005 по 2018 год в Персидском заливе произошло 862 землетрясений магнитудой выше 4,5 по шкале Рихтера, в среднем 60-70 землетрясений в год. Количество землетрясений в год в XXI веке примерно сопоставимо с XX веком: 50-60 землетрясений в год. На рисунке 27 представлено распределение землетрясений по годам. В рассматриваемый период выделяются три промежутка с наибольшим количеством землетрясений – это 2005–2006, 2013-2014 года и 2017-2018 года. Период 2005-2006 г выделен условно, в нем зафиксировано количество землетрясений чуть выше среднего, в то время как в 2007–2010 гг. количество землетрясений составило около 40–50 в год. В периоды сейсмической активизации 2013–2014 и 2017–2018 гг. максимальная магнитуда доходила до 6–7,3. Если сопоставить с предыдущим рассматриваемым периодом ХХ века, то установленный промежуток между периодами с интенсивной сейсмической активностью в 6-8 лет подтверждается. Промежуток между последними двумя пиками сейсмической активностью (2013-2014 и 2017-2018) составил меньшее время – 4 года. Средняя магнитуда в течение 2005–2018 не менялась и оставалась на уровне 4,7–4,8.



Рис. 27. Распределение землетрясений по годам в пределах Персидского залива в период 2005–2018 гг. (составлено автором). Оранжевая линия – магнитуды,

столбцы – количество землетрясений.

Одной из важнейших характеристик при анализе землетрясений является график повторяемости землетрясений. В 1935 г. Ч.Ф. Рихтер разработал шкалу магнитуд, после чего выявлять различные пространственно-временные закономерности землетрясений стало проще. Также в конце 1930-х годов был открыт закон повторяемости Гутенберга, который выглядит следующим образом:

$$LgN = a - b * M, \tag{2}$$

где *N* – число событий с магнитудой M;

*а* и *b* – константы, константа *b* – обычно равняется 1 для районов с высокой сейсмической активностью.

Для периода 2005–2018 годов построены графики повторяемости (Рис. 28). При построении графиков учитывались землетрясения как выше 4,5, так и с меньшей магнитудой.

Для Персидского залива коэффициент **b** составляет в среднем 2.28, причем наблюдается его увеличение к 2017 году с 1,9 до 3,17. При таком высоком значении коэффициента **b** для региона характерны «рои» землетрясений, где преобладает большее количество малых землетрясений по отношению к крупным. Таким образом, по построенным графикам можно сделать вывод, что к 2017 году количество мелких землетрясений возрастает, и их доля значительно увеличивается к общему количеству всех землетрясений региона.





Рис. 28. Графики повторяемости сейсмических событий в период 2005–2017 гг. на территории Персидского залива (составлено автором)

Вариация коэффициента **b** зависит от:

- напряжения земных пород;

– глубины;

- фокального механизма;

- гетерогенной прочности пород.

В 30-40 разрабатываются последние лет различные методики землетрясений Mw>5, прогнозирования сильных с а также методики прогнозирования сильных землетрясений, среднесрочного основанные на мониторинге величины наклона графика повторяемости [13,17]. Отмечено, что перед сильным землетрясением наклон статистически значимо изменяется.

Для Персидского залива по построенным графикам константа a варьирует от 10 до 19 и в среднем составляет 13,29, коэффициент b варьирует от минус 1,4 до минус 3,6 и в среднем составляет минус 2,28 (Табл. 4). Анализируя полученную таблицу, можно сделать следующий вывод: при увеличении сейсмической активности наклон графика сильно увеличивается, то есть значение коэффициента b по модулю также увеличивается. Таким образом, можно утверждать следующую закономерность: коэффициент b – это индикатор высокой сейсмической активности. Чем выше его значение по модулю, тем выше сейсмическая активность.

Табл. 4. Значения констант а и b для региона Персидского залива по годам, определенные по графикам повторяемости Гутенберга (составлено автором)

Год	Α	В	Ν			
2005	11,2	, -1,9	65			
2006	11,8	-1,91	72			
2007	17,7	i -3,29	49			
2008	10,8	-1,72	57			
2009	8,6	<b>`</b> , -1,4	39			
2010	10,23	-1,64	46			
2011	9,98	-1,6	61			
2012	11,17	-1,79	91			
2013	13,63	-2,23	104			
2014	14,68	-2,41	98			
2015	16,51	/ -2,97	38			
2016	19,47	-3,63	32			
2017	16,96	-3,17	91			
Среднее	13,29	-2,28				
Период повышенной						

сейсмической активности

## Совокупность выделившейся энергии

В результате обработки данных посчитана по формуле энергия каждого события и сделана оценка суммарной выделившейся энергии по годам с 1900 по 2017 год (Табл. 5).

Построен график распределения сейсмической энергии в пределах региона Персидского залива (Рис. 28).

$$M = \frac{2}{3} (l_g E - 4, 8), \tag{3}$$

где Е – энергия землетрясений в Джоулях.

Стоит отметить, что Е – это только количество энергии, излучаемой от землетрясения в виде сейсмических волн.

Год	Е, Джоуль	Год	Е, <mark>Д</mark> жоуль	Год	Е, Джоуль
1909	5,62341E+15	1971	2,4664E+14	1997	5,76626E+15
1911	3,54813E+14	1972	5,32885E+14	1998	6,20026E+14
1923	1E+15	1973	6,51208E+13	1999	8,83659E+14
1927	1,77828E+14	1974	2,73755E+13	2000	3,84828E+13
1933	1,25893E+14	1975	1,42545E+14	2005	4,11606E+14
1934	3,54813E+14	1976	1,27765E+14	2006	3,00077E+14
1941	1,77828E+14	1977	1,93988E+15	2007	5,85887E+13
1947	4,46684E+13	1978	8,1285E+15	2008	2,01326E+14
1950	4,47744E+13	1979	4,15143E+15	2009	7,15173E+13
1951	7,02137E+13	1980	3,02923E+14	2010	8,93168E+14
1953	3,54813E+11	1981	3,58674E+15	2011	1,86846E+14
1955	1,58489E+13	1982	7,89613E+13	2012	1,54044E+14
1956	3,61906E+14	1983	1,30702E+14	2013	2,45201E+14
1957	1,65586E+13	1984	4,33562E+13	2014	3,89989E+14
1958	7,98619E+14	1985	5,0597E+13	2015	5,49548E+13
1960	9,86783E+13	1986	8,60823E+13	2016	2,80784E+13
1961	3,05274E+14	1987	1,03151E+14	2017	5,86852E+15
1962	9,3576E+13	1988	2,84932E+14	2018	4,54786E+14
1963	6,34505E+13	1989	2,15128E+14		
1964	8,97976E+13	1990	6,00622E+14		
1965	4,46684E+13	1991	8,20406E+13		
1966	2,23872E+13	1992	5,42523E+13		
1967	8,91251E+13	1993	6,15286E+13		
1968	3,07017E+15	1994	2,30993E+14		
1969	5,01187E+14	1995	3,64047E+13		
1970	4,78265E+13	1996	4,17669E+13		

Табл. 5. Совокупность выделившейся сейсмической энергии с 1900 по 2017 гг. (составлено автором).

На рисунке 29 выделяется 5 крупных периодов сейсмической активизации: 1909 (продолжительность не установлена), 1966–1969 (продолжительность три года), 1977–1981 (продолжительность 4 года), 1996–1999 (продолжительность три года), 2017–2018 (продолжительность пока что не установлена – нет итоговых данных на 2019 год). Вторая большая активизация в период 1966–1981 гг. совпадают с сейсмической активизацией, отмечающейся для всего мира в 1960–



Рис. 29. График распределения по годам выделившейся совокупной сейсмической энергии за период с 1900 по 2018 годы (составлено автором)

Продолжительность периодов повышенной сейсмичности составляет в среднем 2-3 года. Промежутки затишья между всплесками сейсмичности составили в среднем 8–15 лет.

Распределение гипоцентров по глубинам. Это важная характеристика сейсмотектонического режима территории. Анализ распределения гипоцентров землетрясений по глубинам дает сведения о глубинах залегания слоя земной коры, влияющего на сейсмоактивность. Сопоставление со стратиграфическим разрезом дает понимание природы распространения сейсмичности [80]. В период 2005–2018 годов наблюдается изменение максимальной глубины очага. При этом средняя глубина в течение всего периода была постоянной и составляла 15 км, исключение – 2005 год, где средняя глубина очагов землетрясений составила 20 км (Рис. 30). На территории Персидского залива в период 2005–2018 г. 850 землетрясений характеризовались мелко-фокусной глубиной очага (до 70 км), что составило 99% всех землетрясений. Лишь 1% (12 землетрясений) имели глубину

очага больше 70 км (до 108 км), что относится к промежуточной глубине очага по принятой классификации. Принятая классификация выглядит следующим образом:

- мелко-фокусные (<70 км);
- промежуточные (70–300 км);
- глубокофокусные (свыше 300 км).



период 2005–2018 гг. (составлено автором)

В период повышенной сейсмической активности 2013-2014 максимальная глубина гипоцентров доходила до 100 км. В аналогичный период 2017-2018 наблюдается рост максимальной глубины очага землетрясения до 108 км (Рис. 31). Глубина очага наиболее интенсивных землетрясений магнитудой выше 6 в среднем составляет 13 км (до 19 км), причем наблюдается прямо пропорциональная зависимость: чем больше глубина очага, тем выше магнитуда (Рис. 32).

На территории Персидского залива кристаллический фундамент залегает на глубинах 5–8 км (до 10 км). Таким образом, получается, что всего 7% землетрясений имели зарождение своего очага в осадочном чехле, основная масса землетрясений (68%) зарождалась в более глубоких частях Земли, в верхней части

кристаллической коры – в интервале 10–20 км (Рис. 33). Всего 16 землетрясений (4%), произошедших в период 2005–2017 гг., произошло на уровне этажа нефтеносности (глубина очагов землетрясений не превышает 3 км).



Рис. 31. График динамики изменения максимальных глубин очагов землетрясений за период 2005–2018 гг. (составлено автором)



Рис. 32. График зависимости магнитуды от глубин очагов крупнейших землетрясений Мw>6. Коэффициент корреляции – 0,7 (составлено автором)



Рис. 33. График зависимости распределения магнитуд и глубин очагов землетрясений в период 2005–2018 гг. (составлено автором).



Рис. 34. Распределение количества землетрясений по глубине очагов землетрясений (составлено автором).

На рисунке 35 показано положение очагов землетрясений на геологическом разрезе. Видно, что очаги землетрясений приурочены к разломным зонам. Так как очаги землетрясений находятся в основном на глубинах 10–20 км, они оказываются ниже эвапоритового горизонта, который играет роль волновода – своего рода «сдерживающего» фактора для проникновения разломов в верхние горизонты осадочного чехла. Во время землетрясений большинство разломов до поверхности не доходят, благодаря чему обеспечивается сохранность залежей углеводородов.



Рис. 35. Разрез по линии Аравийская плита – Персидский залив – хр. Загрос с нанесением ключевых землетрясений и привязкой к схеме тектонического районирования (составлено автором) [27].

На основании вышесказанного нами было сформулировано первое защищаемое положение диссертации: Регион Персидского залива в XX и XXI веках характеризуется повторяемостью высокомагнитудных сейсмических событий (Mw>6) с периодом в среднем – 11,5 лет, колеблющимся в интервале 8–15 лет. Отмечены периоды сейсмического покоя средней продолжительностью 10 лет и периоды сейсмической активности – 2-3 года.

# Пространственное положение очагов землетрясений и их связь с активными разломами региона Персидского залива

Помимо распределения очагов землетрясений по времени и по глубине в работе анализировалось их пространственное положение и связь с активными разломами региона. Стоит отметить, что пространственное положение зон
расположения эпицентров землетрясений остается неизменным при увеличении или при существенном уменьшении количества землетрясений. В качестве примера на рисунке 36 приведены схемы расположения эпицентров сейсмических событий в период 2005–2017 года.





Рис. 36. Распределение очагов землетрясений в период 2005–2018 года (по данным сейсмических каталогов)

Примечание. Красной звездочкой отмечены очаги землетрясений с самой большой магнитудой

На основе данных карты активных разломов и данных о распределении сейсмических очагов автором составлена сейсмотектоническая карта региона Персидского залива (Рис. 37).

В пределах рассматриваемого региона выделено 13 крупных разломов, данные взяты из базы активных разломов Геологического института РАН [92]. «В базе данных фигурируют активные разломы – тектонические нарушения, перемещения по которым происходили в недавнем прошлом и поэтому могут ожидаться в ближайшем будущем. Основанием предполагать, что подвижки в будущем возможны, являются следы движений за ближайший к современности отвечающий максимальному известному интервал времени, периоду повторяемости сильных коровых землетрясений, т.е. примерно за последние 30 тыс. лет» [53, 54, 61]. «Поскольку во многих областях подвижки этого времени трудно отделить геологическими и геоморфологическими методами от подвижек более ранних стадий позднего плейстоцена, активным считается разлом, по которому зарегистрированы проявления движений в течение позднего плейстоцена и голоцена, т.е. за последние ~130 тыс. лет» [54].



Рис. 37. Сейсмотектоническая карта региона Персидского залива (составлено автором по материалам Базы активных разломов Геологического института РАН [92]. Оранжевыми пунсонами обозначены землетрясения с Мw>6.

На основе анализа составленной карты можно выявить закономерную приуроченность очагов сильных землетрясений к основным разломам региона. Большинство очагов крупных землетрясений приурочено к надвигам: видна четкая закономерность расположения очагов землетрясений вдоль надвиговых пластин. Вторым типом мест локализации очагов землетрясений являются зоны сочленения разломов разных кинематических типов: Казерун-Боразджанского и Высокого Загроса; Высокого Загроса и фронтального Загросского.

Фронтальный Загросский разлом, Карех-Басский, разлом Бориз, разлом Лар имеют надвиговую природу. Казерун-Боразджанский разлом, а также его продолжение – разлом Дена, Главный Современный Разлом Загроса (ГСРЗ), разлом Сарвестан характеризуются правосдвиговой компонентой движения.

Кинематика основных разломов региона подтверждается данными полевых работ коллектива исследователей лаборатории Неотектоники и современной геодинамики ГИН РАН.



Рис. 38. Правосдвиговые смещения оврагов по разломам в северном сегменте Казерун-Боразджанской разломной зоны, вблизи поселка Тенге-Таркан [74].

В поддержку правосдвиговой компоненты Казерун-Боразджанской разломной зоны приведен рисунок 38, на котором показаны сдвиговые деформации овражной сети в пределах разломной зоны. Измеренные амплитуды позднеплейстоцен-голоценовых правосдвиговых смещений здесь составляют: 3-5, 12-14 и 25-30 м. Взбросовые смещения достигают 1-2 м. Разломы нарушают поверхность террасы позднечетвертичного возраста.



Рис. 39. Зарисовка стенки канавы поперек разлома в южном сегменте Казерун-Боразджанской разломной зоны, юго-восточнее города Ахрам [74].

Также в качестве примера кинематики Казерун-Боразджанской разломной зоны приведена зарисовка канавы поперек разлома. Наблюдается взбросонадвиговое смещение пролювиальных отложений позднеплейстоценголоценового возраста. Вертикальная амплитуда достигает нескольких метров. Горизонтальная правосдвиговая компонента смещения поперечна плоскости данного обнажения.

Фронтальный Загросский разлом имеет взбросо-надвиговую природу.



Рис. 40. Зарисовка стенки канавы поперек Мишанской флексурно-разломной зоны, вблизи Фронтальной зоны Загроса [74].

На рисунке 40 показана зарисовка стенки канавы поперек Мишанской флексурно-разломной зоны, вблизи Фронтальной зоны Загроса. Наблюдаются признаки трех последовательных взбросовых подвижек (сейсмических событий), последняя из которых, вероятно, соответствует землетрясению 1972 года.



Рис. 41. Разрез через флексурно-разломную зону Раге-Сафид, входящую во Фронтальную зону Загроса [74].

На рисунке 41 наблюдается взбросовое смещение и изгиб поверхности позднечетвертичной террасы во флексурно-разломной зоне Раге Сафид, относящейся ко Фронтальной зоне Загроса. Здесь зафиксирована суммарная вертикальная амплитуда деформаций верхнечетвертичных отложений – 100-120 м, а нижнечетвертичных – до 200-250 м.

Таким образом, весь Месопотамский краевой прогиб можно разделить на две зоны по своим тектоническим подвижкам (с юго-запада на северо-восток): система разломов во фронтальных частях Загроса с преобладанием надвигов, и система разломов в тыловых частях Загроса с доминирующим правым сдвигом или сочетанием взброса и правого сдвига, что отображается в Главном Загросском разломе.

## Механизмы очагов землетрясений

«Землетрясение представляет собой разрывный сдвиг по некоторой плоскости. Если предел прочности по всем направлениям одинаков, то разрыв произойдет вдоль той плоскости, на которой сдвиговые напряжения превзойдут этот предел, т.е. вдоль плоскости максимальных сдвиговых напряжений. Чаще всего разрывы происходят вдоль ослабленных и нарушенных зон, вблизи крупных тектонических разломов в земной коре». [47,69]. В ослабленных зонах уже существующих разломов уменьшена прочность пород, поэтому там и происходят подвижки, вызывающие землетрясения. При анализе напряжений во время землетрясений следует учитывать тектонические карты, карты разломов, построенные по сейсмическим данным (например, 3D сейсморазведка), данные космоснимков (выделение линеаментов), а также современный рельеф изучаемой территории (современные реки могут течь по древним разломам) [9].

Для классификации механизмов очагов землетрясений в исследовании использовались данные по 75 землетрясениям с магнитудой выше 5. Основой этих данных послужили сейсмические каталоги USGS (U.S. Geological Survey) [89]. Рассмотрено 75 стереограмм фокальных механизмов, по которым определены кинематические типы механизмов очагов землетрясений (Рис. 42). Стереограммы фокальных механизмов в таких зонах служат указателями поля современных тектонических напряжений [40]. По фокальным диаграммам можно определить направления перемещения по разлому при землетрясении или серии землетрясений, установить кинематический тип разлома.



Рис. 42. Силовая модель очага землетрясения – двойная пара сил и диаграмма направленности для продольных волн (Р-волн) [11]. Положение эпицентра и фокальный механизм землетрясения. Типы смещений по разломам и соответствующие им стереограммы фокальных механизмов

Ось максимального главного напряжения – это ось растяжения (T), а ось минимального – это ось сжатия (P).

На рисунке 43 представлено распределение тектонических обстановок, определенных по фокальным диаграммам, в пределах региона Персидского залива. 65% землетрясений на территории Персидского залива образовывались во взбросо-надвиговых тектонических обстановках и 25% землетрясений можно отнести к землетрясениям сдвигового механизма. Остальные 9% землетрясений относят в равной степени к сбросовым деформациям и взрезам.





Рис. 43. Распределение решений по фокальным механизмам очагов землетрясений 2005–2018 гг (Мw>5) (составлено автором)

Из анализа карты сейсмотектоники и рисунка 43 видно, что область находится под воздействием горизонтальных сжимающих напряжений северовосточного направления. Такие напряжения связаны с коллизией Африкано-Аравийской платформы и Иранской микроплиты, приведшей к поддвигу платформы под зоны Альпийско-Гималайского пояса и к преобладанию надвиговых структур во фронтальной зоне. Общий северный вектор движения Аравийской платформы и диагональное расположение Загроса с северо-востока по отношению к ней вызывают также формирование правосдвиговой компоненты смещений. При этом следует отметить, что роль этой компоненты нарастает при пересечении горной системы с юго-запада на северо-восток. Наиболее крупным правым сдвигом является Главный Современный разлом Загроса. В нём также присутствует взбросовая компонента, однако вергентность разлома меняется на разных участках в связи с его субвертикальным заложением. Скорость тектонических подвижек в пределах рассматриваемой территории составляет в настоящий момент – 5–7 мм/год [88].

В Таблице 6 представлено распределение тектонических обстановок по годам. В период с 2010 по 2013 года наблюдается появление взрезовых и сбросовых компонент в механизмах очагов землетрясений.

Табл. 6. Характеристики очагов землетрясений (составлено автором)

Год	взброс	взрез	сброс	сдвиг
2005	7	1		1
2006	8			1
2007	4			2
2008	8			1
2009	3			
2010	3	1	1	2
2011	4	1		6
2013	3		1	5
2014	2			
2015				1
2016	1			
2017	6		2	

На рисунке 44 показана карта положения очагов землетрясений с установленными механизмами. Также фокальные диаграммы соотнесены с тектонической картой рассматриваемого района (Рис. 45).

Выделено шесть кластеров:

1) кластер Калмард (взбросовая компонента);

2) кластер в районе Казерунского разлома (сдвиговые компоненты);

3) кластер – тектоническая провинция Фарс (сдвиговые и надвиговые деформации);

4) кластер Кузестан (сдвиговая компонента);

5) кластер прогиб Дезфул (сдвиг и надвиг);

6) Кластер – разломная зона Диба (сдвиг).



Рис. 44. Тектоническая карта с фокальными механизмами землетрясений и выделением кластеров (составлено автором)



Рис. 45. Карта механизмов очагов землетрясений в период 2005–2017 гг. Красные цифры – это глубины очагов землетрясений (в км) (составлено автором). Условные обозначения показаны на Рисунке 13.

Красным прямоугольником помечены кластеры, которые характеризуются более высокими магнитудами сейсмических событий в период 2005–2018 год (максимальные магнитуды в этих кластерах доходят до 6-7). Это кластер Диба, кластер Казерунский разлом, Кластер Дезфул.

К югу и юго-западу от Казерунского разлома преобладают фокальные механизмы с надвиговым и сдвиговым типом механизма очага – кластер Фарс, что согласуется с тектонической разломно-блоковой моделью региона. Кластер Дезфул характеризуется также сдвиго-надвиговыми смещениями. В районе разлома Калмард преобладают взбросовые компоненты. Казерунская разломная зона характеризуется сдвиговыми механизмами очага землетрясений. С таким типом фокальной диаграммы выявлено 10 землетрясений. Видно, что сдвиговая компонента Казерунского разлома согласуется с фокальными диаграммами землетрясений, что говорит о постоянной сейсмической активности этого разлома. Более того, именно этот разлом наиболее отчетливо дешифрируется на аэрофотоснимках и выражен смещениями молодых форм рельефа, что говорит о его большой роли.

Кластер Диба включает в себя такие разломы, как Диба, Дена. Тектонический механизм землетрясений, проявляющихся в данной зоне, носит сдвиговый и надвиговый характер, изредка проявляются взбросы. Это также отражается в тектоническом районировании региона. Таким образом, полученные механизмы очагов хорошо коррелируют с тектоническим строением региона.

Геодинамика исследуемого региона, находящегося в пределах области сопряжения тектонических провинций Фарс и Дезфул, определяется ее принадлежностью к западному окончанию зоны сдвига, которая представлена серией меридиональных сдвигов, которые простираются от Загроса к побережью. Механизмы очагов землетрясений, происходивших в пределах кластеров Фарс и Дезфул подтверждают вышеописанную геодинамическую характеристику. Кластер Фарс характеризуется сдвиговыми и надвиговыми характеристиками, Кластер Дезфул – преобладает сдвиговая компонента.

84

Поперечные разломы характеризуются сдвиговыми деформациями. Фронтальная зона разлома Загрос сопряжена с надвиговыми тектоническими движениями (Рис. 46). Решения фокальных механизмов по 70 землетрясениям подтверждает тезис о том, что в тектоническом плане для Месопотамского краевого прогиба характерны две тектонические обстановки – сдвиговые деформации и развитие надвиговых структур. Эти тектонические деформации и определяют повышенную сейсмичность в регионе. Сочетание деформаций двух типов приводило к перераспределению тектонических напряжений, что в свою очередь обусловило сейсмическую активность в пределах региона Персидского залива.

По базе данных активных разломов Геологического института РАН выполнен детальный анализ Фронтальной зоны разломов Загроса (Рис. 46, 47). Основное наполнение базы данных – активные разломы и разломные зоны, по которым в недавнем прошлом происходили движения. Соответственно, такие перемещения могут ожидаться в ближайшем будущем и быть своего рода индикатором возможных сейсмических явлений. В пределах рассматриваемого участка детально изучено 7 землетрясений, по фокальным механизмам очагов землетрясений определен кинематический тип разломов. Разлом Дена и Казерун-Боразджанский разлом характеризуются правосдвиговыми деформациями, это главная компонента движения. Второстепенная компонента характеризуется взбросовым типом смещений. Северо-восточное крыло поднято. Также эта зона разломов характеризуется высокой скоростью тектонических движений – 5 мм/год. Фронтальная зона разломов характеризуется более низкой скоростью тектонических движений – 1–5 мм/год и менее 1 мм/год. Глубина очагов землетрясений здесь больше – 20–30 км, по сравнению с районом Дена и Казерун-Боразджанским, где этот показатель составляет – 10–15 км. В районе Фронтальной разломной зоны по фокальным диаграммам определено преобладание надвиговых тектонических движений. Поднятое крыло – также северо-восточное. Разлом Минаб, который имеет похожее направление с разломами Дена и Казерун-Боразджанским, характеризуется движениями 1-5

85

мм/год. Тут скорость движений выше, чем в районе Фронтальной разломной зоны. Поднятое крыло также северо-восточное.



Рис. 46. Анализ фронтальной зоны разломов Загроса (составлено автором)



Рис. 47. Тектоническая характеристика фронтальной зоны Загроса (составлено автором)

Положение поднятого крыла подтверждает региональную коллизию Аравийской плиты и Альпийско-Гималайского пояса. При сдвиговых

деформациях современная скорость движений толщ выше, чем при надвиговых. Это является косвенным признаком того, что сдвиги более сейсмически активны по сравнению с надвигами, однако данный тезис требует количественного подтверждения и в данном исследовании не рассматривается.

Подводя итог главе 3, можно сделать следующие выводы:

1. Активный сейсмический мониторинг землетрясений начался после 1973 года. В период XX и XXI веков количество землетрясений в среднем было постоянной величиной и составляло 50–70 землетрясений в год, что говорит о стабильном фоне общей сейсмичности.

2. Сейсмоактивный слой залегает на глубине 10–30 км. При этом за столетний временной промежуток наблюдается понижение средней глубины очагов землетрясений с 15 до 30 км.

3. Для землетрясений с магнитудой выше 6 выявлена закономерность: чем больше глубина очага, тем сильнее землетрясение, что согласуется с общепланетарной закономерностью.

4. В XXI веке выделены три периода сейсмической активизации – 2005– 2006, 2013–2014 и 2017–2018 года. Регион Персидского залива характеризуется повторяемостью серий высоко-магнитудных сейсмических событий.

5. Определен временной промежуток между периодами повышенной сейсмической активности, который составил 8-15 лет.

6. Установлена пространственная закономерность расположения очагов землетрясений. При увеличении или при существенном уменьшении количества землетрясений пространственное положение их эпицентров остается неизменным.

7. Анализ фокальных диаграмм показывает, что 65% землетрясений в регионе Персидского залива образовались во взбросо-надвиговых тектонических обстановках, 25% землетрясений можно отнести к землетрясениям со сдвиговым механизмом очага. Остальные 9% землетрясений относят в равной степени к сбросовым деформациям и взрезам.

8. Для Месопотамского краевого прогиба, как основного региона нефтедобычи, характерно сочетание надвиговых и сдвиговых тектонических

обстановок. Эти тектонические деформации и определяют повышенную сейсмичность в регионе. Сочетание деформаций двух данных типов приводило к перераспределению тектонических напряжений и деформаций, что в свою очередь обусловило сейсмическую активность в пределах региона Персидского залива.

9. Большинство очагов крупных землетрясений приурочено к надвигам: видна четкая закономерность расположения очагов землетрясений вдоль надвиговых пластин. Вторым типом локализации очагов землетрясений являются области сочленения сдвигов с разломами другой кинематики: Казерун-Боразджанского и Высокого Загроса; Высокого Загроса и Фронтального Загроского. При пересечении с северо-востока на юго-запад от тыловых частей орогена Загроса в сторону Персидского залива наблюдается закономерное увеличение сейсмической активности от минимальной в Чешуйчатой зоне до максимальной в Предгорной. В пределах бассейна Персидского залива сейсмическая активность резко убывает и сходит на нет на юго-западном побережье залива.

На основании данных, представленных в главе 3, нами также было сформулировано второе защищаемое положение диссертации: На протяжении XX и XXI веков сейсмические очаги сохраняют постоянное пространственное положение, а их механизмы подтверждают кинематику сейсмоактивных разломных зон: 65% землетрясений в регионе Персидского залива образовались во взбросо-надвиговых тектонических обстановках (крупнейшие взбросонадвиги: Фронтальный Загросский разлом, Карех-Басский, Бориз, Лар); 25% землетрясений имеют сдвиговый механизм очага (крупнейшие правые сдвиги: Казерун-Боразджанский, Дена, Главный Современный Разлом Загроса (ГСРЗ), Сарвестан); остальные 9% землетрясений относят в равной степени к сбросам и взрезам.

## Глава 4. ЗАКОНОМЕРНОСТИ И ПРИЧИНЫ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ НЕФТЕГАЗОНОСНОГО РЕГИОНА ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА: ВЫЯВЛЕНИЕ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОЧАГОВ

Сейсмическим районированием называют деление территории на районы с разной интенсивностью сотрясений от ожидаемых землетрясений и составление на этой основе карт сейсмической опасности разного масштаба. По построенным картам делается оценка возможных сейсмических сотрясений и их повторяемости в том или ином районе или пункте.

Данные сейсмического районирования используются при проектировании и строительстве сейсмостойких сооружений и решении других практических задач на сейсмически опасной территории. В этом заключается прикладной аспект сейсмического районирования. Для составления карт сейсмического районирования, сотрясений, т.е. оценки возможных составляется сейсмотектоническая основа – карта потенциальных зон возникновения очагов землетрясения (зон ВОЗ) с различными параметрами, а именно максимальными возможными магнитудами землетрясений, их повторяемостью и глубинами гипоцентров. Затем рассчитывается сотрясаемость разных частей территории от потенциальных землетрясений, которые могут возникать за те или иные временные интервалы в зонах ВОЗ рассматриваемого и соседних регионов. Для картирования и параметризации зон ВОЗ анализируются и сопоставляются с помощью современного цифрового оборудования сейсмические каталоги, исторические, геолого-тектонические и геофизические данные. Проведенные исследования дают представление о связи сейсмичности с региональной тектоникой и имеют научно-прикладное значение при прогнозе будущих сейсмических событий.

По проведенному анализу на основе данных сейсмических каталогов, в пределах региона Персидского залива построена карта распределения сейсмической активности (Рис. 48). Выделены зоны высокой сейсмической активности, средней, низкой и крайне низкой. Карта соотнесена с тектоническим районированием территории. Концентрация очагов землетрясений наблюдается вдоль главных разрывных зон. Анализ пространственного распределения землетрясений XXI века (2005-2017) показал следующее. В Чешуйчатой зоне произошло 8 землетрясений, что составляет лишь 1% от всех землетрясений в регионе. В зоне Высокого Загроса произошло около 20% землетрясений. Повышенной сейсмичностью характеризуются области Предгорной впадины и Низкого Загроса. Здесь произошло порядка 80% всех землетрясений рассматриваемого временного промежутка. Представленное распределение землетрясений ПО зонам согласуется с неотектоническим развитием Месопотамского краевого прогиба. Чешуйчатая, Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорная зоны различаются между собой по степени тектонических деформаций и их времени. Чем раньше начались деформации, тем выше их суммарная интенсивность. Наибольшая степень деформаций характерна для Чешуйчатой зоны, и ее деформации происходили раньше остальных. Наименьшая степень деформаций и самый молодой их возраст – в Предгорной зоне. Таким образом, в регионе Загроса и Персидского залива устанавливается следующая закономерность: чем древнее деформации и выше их степень, тем меньшее количество землетрясений характерно для зоны.

Литолого-стратиграфическое строение рассматриваемого региона напрямую влияет на его сейсмичность. Изменения в литологии, а именно, наличие солевых пластов, и, как следствие, изменение реологических характеристик основных слоев разреза изучаемого региона, являются причиной изменения термодинамических условий. Наиболее пластичная соленосная формация Хормуз в основании чехла выступает в качестве поверхности срыва надсолевых горизонтов разреза. В связи с этим усиливается интенсивность тектонических движений по разломным зонам в рассматриваемом регионе, что сказывается на возникновении землетрясений.

90



Рис. 48. Карта сейсмотектонического районирования в пределах региона Персидского залива совместно картой расположения объектов нефтегазодобычи. Составлено автором на основе данных [58, 89]

# 4.1. Сопоставление районов сейсмической активности с районами добычи нефти и газа

Активная добыча нефти в пределах региона Персидского залива берет свое

начало с 1947 года. В Таблице 7 представлены основные месторождения нефти,

находящиеся в активной фазе разработки или на стадии разведки.

Табл. 7. Месторождения нефти в пределах региона Персидского залива, находящиеся в стадии активной разработки

Месторождение	Год открытия	Сейсмичность
Хафт Кель – Асмари	1928	Средняя
Большой Бурган	1938	Средняя
Дукан – Араб	-	Низкая
Агаджари	1938	Высокая
Анаран	2005	Средняя

Ахваз	1958	Низкая					
Беби-Хекиме	1961	Средняя					
Марун	1963	Высокая					
Пазенан	1938	Средняя					
Реги-Сефид	1964	Низкая					
Фереидун-Марджан	1966	Средняя					
Хангиран	1960	Средняя					
Южный Парс	1990	Средняя					
Ядараван	2003	Высокая					
Абкайк – Ханифа	1940	Средняя					
Хафизи	-	Низкая					
Даште-Абадан	2003	Средняя					
Хешт	2007	Средняя					
Гечсаран	1927	Высокая					
Азадеган	1999	Низкая					
Джофейр	2008	Средняя					
Сардар-Милли	2008	Средняя					
Фердоус	2003	Средняя					

Из 23 месторождений только 5 месторождений находятся по карте сейсмотектонической активности в зоне низкой сейсмичности, 4 месторождения находятся в зоне высокой сейсмичности, в том числе одно из старейших месторождений – Гечсаран. Остальные 14 месторождений расположены в зонах со средним уровнем сейсмичности.

Выделенные выше зоны высокой, средней, низкой, крайне низкой и слабой сейсмической активности сопоставлены с картой нефтегазоносности в пределах региона Персидского залива и наложены на тектоническую основу (Рис. 48). Западный борт Персидского залива характеризуется слабой сейсмической активностью: здесь не зафиксированы землетрясения магнитудой выше 4,5. Тектоническая обстановка относительно спокойная, поскольку это окраинная часть Аравийской плиты. Специальных инженерных укреплений буровых установок и морских платформ производить также не требуется. Сюда относятся следующие месторождения: Хафджи, Манифа, Эль-Катиф, Саффания, Эль-Бурка, Абкайк, Гавар.

Наибольшему сейсмическому риску подвергаются районы нефте-

газодобычи, относящиеся к Предгорной зоне (в особенности зоне Фронтального разлома Загроса) и зоне Низкого Загроса. В данном районе зарегистрировано подавляющее большинство умеренных землетрясений магнитудой 4,5-5. Очаги землетрясений локализованы вдоль фронтальной зоны Загроса, в Предгорной зоне и области Низкого Загроса. В зону высокой степени сейсмической активности попадает 21 месторождение нефти и газа, причем 17 из них – шельфовые, большими разработка которых сопряжена с рисками И капитальными вложениями. Среди них месторождения Сирри, Салман, Мандус, Мубаррак, Байк, Ум-Аль-Дал, Ресалат, Далма и другие. В данном районе при строительстве морских платформ необходимо учитывать его сейсмическую характеристику. Также необходим постоянный мониторинг действующих морских платформ на предмет сейсмогенных деформаций и воздействия волн цунами; разработка технологий строительства укрепленных сейсмостойких морских платформ, воздействиям. Разработка устойчивых к сейсмическим месторождений, попадающих в данную зону, сопряжена с колоссальными денежными затратами, что следует учитывать при оценке их рентабельности.

Зона Высокого Загроса и Чешуйчатая зона относятся к зоне низкой сейсмичности, провинция Дезфул – к зоне средней, а провинция Фарс – к зоне высокой и средней сейсмической активности. Данный вывод хорошо согласуется с ранее выявленным фактом, что Фарс более тектонически осложнен в отличии от провинции Дезфул. К провинции Фарс относятся такие месторождения, как: Гечсаран, Марун, Парси и др. Морские месторождения единичны (2 месторождения): Эсфендияр и Ферейдун.

Помимо областей повышенной сейсмичности на карте (Рис. 48) прослеживаются области пониженной сейсмичности. Одна из таких областей протяженностью около 30 км трассируется между Карех-Басским разломом и разломом Дена с 55.0 по 57 гр. ю.ш. Обращает на себя внимание тот факт, что в районе выделенной зоны не зафиксированы землетрясения, несмотря на то, что она непосредственно примыкает к южной части разлома Дена, который характеризуется повышенной сейсмичностью. Возможно, это является признаком

93

готовящихся сильных землетрясений. Здесь разрабатываемых месторождений нефти и газа нет, поэтому потерь в добыче нефти и газа при возможном сейсмогенном разрушении нефтепроводов в данной области ожидать не следует. В районе необходимо проводить инженерные ланном мероприятия по укреплению существующих строительных сооружений. Сделанный в диссертации прогноз позволяет принять ряд профилактических мер по подготовке к сильным землетрясениям, что поможет сократить возможные ожидаемым человеческие жертвы и материальный ущерб, однако, разумеется, не позволяет предотвратить сами разрушительные землетрясения.

## 4.2. Определение тектонической обстановки и сейсмогенной опасности нефте- и газодобычи на крупнейшем месторождении региона Гечсаран по данным мониторинга землетрясений

Гечсаран является одним из крупнейших нефтяных центров Ирана. Здесь расположены десять месторождений нефти с суммарной ежегодной добычей около 500 тыс. т. нефти, а также газовые месторождения. Крупнейшее из них – одноименное месторождение Гечсаран (Рис. 49). Это месторождение отличается самой высокой добычей нефти в пике. Кроме того, в Гечсаранском центре нефтедобычи проходит один из крупных магистральных нефтепроводов.



Рис. 49. Схема расположения модельного участка (г. Гечсаран) *Примечание*. Слева – общая географическая карта. Справа – зональность Загросского складчатого пояса. Ч – Чешуйчатая зона, В – Высокий Загрос, Н – Низкий Загрос, П – Предгорная зона, КБЗР – Казерун-Боразджанская разломная зона, КБР – Карех-Бас. Составлено с использованием данных [77,80] с дополнениями автора

Гечсаран расположен в южной части Ирана и относится к Предгорной зоне и зоне Низкого Загроса. Основная сейсмогенерирующая структура района – меридиональный Казерун-Боразджанский разлом (КБР) ориентирован диагонально по отношению к складчатому поясу Загроса.

На рисунке 50 показана сейсмичность в пределах Загросского складчатого пояса с учетом магнитуд сейсмических событий, желтыми пунсонами показаны самые крупные землетрясения магнитудой больше 6.5. Отмечено местоположение Гечсаранского района.



Рис. 50. Оценка сейсмичности района Гечсаран

Примечание. Желтые пунсоны – очаги крупных землетрясений. КБР – Казерун-Боразджанский разлом, ФЗР – Фронтальный Загросский разлом. Составлено автором на основе данных [92]

Установлено, что рассматриваемый участок расположен в зоне концентрации сейсмоактивных разломов, и землетрясения различной магнитуды

являются обычным явлением. Очаги землетрясений, особенно крупные, приурочены к зонам главных разрывных дислокаций.

Рассматриваемый район нефтедобычи характеризуется умеренной по энергии сейсмичностью с землетрясениями магнитудой 4.0 – 5.8 [77]. В геологогеоморфологическом плане землетрясения происходили в зоне сочленения складчатой системы Загроса и зоны Предгорной равнины. Месторождение приурочено к асимметричной антиклинальной складке размером около 70 км в длину и в ширину от 6 до 15 км. В исследовании участвовали сейсмические события с магнитудой выше 4, происходившие в период с 2000 по 2019 год. Всего за указанный период в пределах рассматриваемой территории произошло 46 сейсмических событий. Глубина очага изменялась в пределах от 10 до 66,7 км, при средней величине 21 км.

В таблице 8 представлены характеристики очагов землетрясений с определением их кинематических типов: из 46 землетрясений такие данные есть по десяти сейсмическим событиям. Основой этих данных послужили сейсмические каталоги USGS (U.S. Geological Survey). Определены следующие типы деформаций в очаге: 3 сдвиговых, 4 взбросового типа, две взбросовые со сдвигом и одна сбросовая со сдвигом, вероятно диагонального направления по отношению к основным линейным складчато-разрывным структурам Загроса. Фокальные решения представлены на рисунке 51.



Рис. 51. Очаги землетрясений в пределах рассматриваемой территории в сопоставлении с магнитудой и фокальными решениями. Составлено автором на основе данных [77]

Установлена приуроченность очаговой зоны землетрясений к важнейшей структурной линии Загросской складчатой области – Казерун-Боразджанскому разлому сложной кинематики. Диаграммы фокальных механизмов землетрясений позволили изучить внутреннюю структуру этой разломной зоны. КБР разделяется на два сегмента: северный Казерунский и южный Боразджанский [74]. По данным решений фокальных механизмов землетрясений в южном сегменте преобладают взбросо-сдвиговые механизмы (очаги 3, 4, 5, 9). Северный сегмент КБР характеризуется преимущественно сдвиговыми сейсмическими деформациями (очаги 6, 7).

Наличие взбросо-сдвиговой компоненты подтверждается региональной тектонической обстановкой: область находится под воздействием горизонтальных сжимающих напряжений северо-восточного направления вследствие коллизионных процессов.

В тектоническом плане для рассматриваемого участка характерны две тектонические обстановки – сдвиговые деформации и развитие надвиговых и взбросовых структур. Это также подтверждается сопоставлением осей напряжений растяжения (Т) и сжатия (Р) (Рис. 52). Для механизмов очагов землетрясений, произошедших в районе г. Гечсаран, с увеличением углов осей растяжения наблюдается уменьшение углов осей сжатия.



Рис. 52. График зависимости углов главных осей напряжений растяжения (Т) и сжатия (Р) землетрясений, произошедших в районе г. Гечсаран, за период 2000–2019 гг. (составлено автором)

Определенные по графику тектонические деформации еще раз подтверждают ранее сделанные выводы о том, какие тектонические деформации определяют повышенную сейсмичность в регионе. Согласно проведенным исследованиям, подвижка в очагах большинства землетрясений, происходивших в районе Казерун-Боразджанского разлома, представляла правый сдвиг по крутопадающей к северо-востоку плоскости север-северо-западного простирания с небольшим взбросовым поднятием восточного крыла.

Таким образом, большинство (до 90%) решений механизмов очагов в пределах исследуемой территории отражают доминирующие кинематические обстановки, предопределенные особенностями строения и геодинамического развития орогенной системы Загроса. Преобладание сдвиговых фокальных механизмов очагов землетрясений района Гечсаран соответствуют общей обстановке транспрессии в зоне коллизионного взаимодействия Аравийской плиты и складчатого сооружения Загроса.

Автором проанализировано соотношение графика нефтедобычи месторождения Гечсаран и сейсмической активности в его районе за период



инструментальных сейсмологических наблюдений XX века (Рис. 53).

Рис. 53. История разработки месторождения Гечсаран [82]

В районе месторождения Гечсаран в период XX века и начала XXI века (1976-2018 г.) произошло 65 землетрясений с магнитудой выше 4.5, основные из них нанесены на профиль добычи нефти месторождения. Видно, что рост добычи или ее падение связаны с двумя причинами: либо с проведением геолого-технических мероприятий, повышающих эффективность разработки (например, закачка газа в 1975 году, начало бурения горизонтальных скважин в либо 1992 г.), С политическими событиями, в частности, ирано-иракской войной 1979-1988. График, представленный на рисунке 53, позволяет сделать следующий вывод: произошедшие за исследованный период природные сейсмические события не повлияли на уровень добычи нефти на месторождении Гечсаран. Однако поскольку Гечсаранский модельный участок расположен в пределах глубинной сейсмоактивной Казерун-Боразджанской взбросо-сдвиговой зоны, здесь можно ожидать крупных сейсмических событий магнитудами более 6. Их влияние на безопасность хозяйственной деятельности и, в частности, на добычу нефти может быть катастрофическим. Это необходимо учитывать при дальнейшей нефтедобыче и эксплуатации хозяйственной инфраструктуры Гечсаранского нефтяного центра.

Подводя итог главе 4, можно сделать следующие выводы:

1. Землетрясения группируются вдоль главных разрывных дислокаций, что согласуется с неотектоническим развитием региона. Большинство землетрясений происходит в Предгорной зоне и Низком Загросе, именно эти районы характеризуются повышенной сейсмичностью, соответственно необходимы укрепляющие мероприятия для существующих сооружений, а также разработка укрепляющих мероприятий в проектах новых строительных сооружений.

Данный вывод находит отражение в таблице 2, где Предгорная зона и зона Низкого Загроса характеризуются повышенной сейсмичностью: более 70% всех землетрясений происходят здесь, из чего следует второй вывод.

2. При пересечении с северо-востока на юго-запад от тыловых частей орогена Загроса в сторону Персидского залива наблюдается закономерное увеличение сейсмичности от минимальной в Чешуйчатой зоне, до максимальной во фронтальной Предгорной зоне складчатого пояса. В пределах бассейна Персидского залива сейсмичность резко убывает и сходит на нет на юго-западном побережье залива. Следует также отметить, что описанное увеличение сейсмичности при пересечении Загроса с северо-востока на юго-запад соответствует уменьшению возраста его тектонических структур.

3. Природные сейсмические события XX века не повлияли на уровень добычи нефти крупнейшего нефтегазового месторождения региона – Гечсаран. Следовательно, применявшиеся в тот период времени укрепляющие мероприятия и технологии можно считать адекватными сейсмическим рискам. Однако в перспективе в пределах глубинной сейсмоактивной Казерун-Боразджанской зоны можно ожидать крупных сейсмических событий магнитудами более 6. Их влияние на безопасность хозяйственной деятельности и, в частности, на добычу нефти может быть катастрофическим, что необходимо учитывать при дальнейшей нефтедобыче и эксплуатации хозяйственной инфраструктуры Гечсаранского нефтяного центра.

4. Выявленные закономерности указывают на единую природу позднекайнозойских тектонических и сейсмических процессов. Это открывает новые возможности для долгосрочного прогноза сильных землетрясений в

пределах региона Персидского залива. К таким закономерностям, прежде всего, выявленные В диссертационном исследовании особенности относятся В последовательности возникновения землетрясений в интервалах магнитуд M=5.0±0.2 и 4.5±0.2. Установлена приуроченность сейсмической активности к наиболее ярко выраженным тектоническим структурам рассматриваемой территории. Полученные выводы в исследовании позволяют определять интервалы времени (годы) и районы возникновения предстоящих крупных землетрясений.

На основе данных, представленных в главе 4 нами было сформулировано Ha третье защищаемое положение диссертации: протяжении неогенчетвертичного времени сейсмическая активность мигрировала от наиболее древних к молодым тектоническим зонам по мере их вовлечения в состав складчатого сооружения Загроса: наименьшая активность наблюдается в Чешуйчатой зоне и возрастает в зоне Высокого Загроса; наибольшая сейсмическая активность характерна для зон Низкого Загроса и Предгорной и связана развитием взбросо-надвиговых деформаций в сочетании со сдвигами. Основная добыча нефти сконцентрирована в двух последних зонах, в связи с чем необходимы укрепляющие мероприятия как для существующих здесь объектов инфраструктуры, так и для планирующихся в перспективе.

					Магни- туда		Оси главных напря				іжені	ий	Модальные плоскости						
Лата	Впемя	IIIunoma	Полгота	Глубина		Tun		Т	-	N		Р		Np1		Np2			Кинематический
Дити	Бремя	Широти	долеоти	очага		магнитуды	PL	Az	PL	Az	PL	Az	STK	DP	Sup	STK	DP	Slip	тип очага
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2000-05-03	09:01	29,7	50,8	33	5,1	mwc	40	145	44	290	19	39	277	77	44	174	47	162	взброс со сдвигом
2000-05-03	09:06	29,6	50,8	33	4,8	mb													
2001-03-28	16:34	29,8	51,2	33	5,3	mwc	54	245	7	146	35	52	327	80	97	112	12	56	взброс
2001-05-23	14:31	30,0	51,2	33	4,7	mb													
2001-09-26	18:04	30,0	51,0	33	4,5	mb													
2002-05-09	19:33	30,2	50,9	33	4,5	mb													
2002-06-01	16:12	29,6	51,2	33	5	mwc	23	121	58	347	20	220	261	58	2	170	88	148	взброс со сдвигом
2002-06-06	09:29	29,3	51,4	33	4,5	mb													
2002-06-16	22:30	29,9	50,8	33	4,5	mb													
2002-08-29	09:53	30,2	51,6	33	4,7	mb													
2002-09-09	07:56	29,4	51,3	33	4,7	mb													
2003-01-11	17:45	29,59	51,47	33	5,2	mwc	15	155	59	272	27	57	104	83	-31	199	60	-171	сдвиг
2003-05-27	10:30	29,60	51,31	33	5,3	mwc	39	160	44	301	21	52	290	79	45	189	46	165	сброс со сдвигом
2003-10-05	23:08	30,2	50,6	33	4,6	mb													
2003-12-18	07:34	29,5	50,7	33	4,6	mb													
2003-12-18	10:35	30,3	50,9	33	4,5	mb													

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2004-01-22	21:19	29,6	51,2	25,1	4,7	mb													
2004-05-08	04:39	29,9	51,5	66,7	5	mb													
2006-09-14	02:25	29,3	51,4	13,1	4,9	mb													
2010-05-14	18:49	29,3	51,5	10	5,1	mb													
2010-10-28	09:22	30,0	51,2	10	4,5	mb													
2010-12-01	19:55	30,14	51,61	21,1	4,9	mwc	10	310	67	64	21	217	355	68	-172	262	82	-22	сдвиг
2011-01-07	23:53	30,1	51,6	29,9	5	mwc	7	116	73	2	15	208	252	74	-6	343	84	-164	сдвиг
2011-03-05	11:24	30,02	51,16	10	4,3	mwc	85	189	2	304	4	34	302	49	87	126	41	93	взброс
2011-03-20	21:53	29,9	51,2	5,3	4,5	mb													
2011-05-08	22:17	29,8	51,0	42,1	4,9	mb													
2012-06-06	19:55	29,7	50,8	5	4,5	mb													
2012-06-06	20:10	29,8	50,8	19,8	4,6	mb													
2012-06-08	16:15	29,8	50,7	14,6	5	mb													
2013-09-30	23:44	29,3	51,4	11,2	4,7	mb													
2013-11-28	13:51	29,32	51,31	8	5,8	mwb	47	346	35	124	22	230	5	39	156	114	75	54	взброс
2013-11-28	15:56	29,2	51,3	10	4,7	mb													
2014-01-15	23:57	29,4	51,3	5	4,6	mb													
2014-05-21	09:46	29,57	50,89	11	5,2	mwb	83	80	5	309	5	219	303	40	83	133	50	96	взброс
2014-05-21	10:29	29,6	50,9	12,6	4,5	mb													
2014-05-21	10:51	29,6	50,9	15,2	5	mb													

1	Ω	Δ
1	v	т

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
2014-06-20	22:54	29,9	50,9	10	5	mb													
2016-07-02	03:49	29,3	51,3	10	4,8	mb													
2016-12-18	14:43	29,5	50,8	10	4,6	mb													
2017-01-02	06:43	29,7	50,8	10	4,5	mb													
2017-01-17	10:41	29,6	51,5	10	4,8	mb													
2017-01-20	22:58	29,7	51,5	10	4,5	mb													
2018-03-19	04:30	29,6	50,7	10	5	mb													
2018-06-18	08:59	30,3	50,9	10	4,5	mb													
2019-01-01	16:39	29,4	51,3	10	4,6	mb													
2019-01-02	07:57	29,4	51,3	10	4,9	mb													

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Тектоническое развитие региона Персидского залива – многофакторный процесс. В него входят коллизионное столкновение плит и более мелких тектонических блоков, глубинные структурные трансформации, связанные со срывом осадочного чехла по плоскостям солевых пластов и поэтапным развитием сложных сдвиго-надвиговых деформаций верхней части земной коры. Все эти факторы определяют интенсивность землетрясений в пределах региона.

Проведенные исследования позволили впервые для рассматриваемой территории получить следующие выводы:

1. Регион Персидского залива в XX и XXI веках характеризуется повторяемостью высокомагнитудных сейсмических событий (Mw>6) с периодом в среднем – 11,5 лет, колеблющимся в интервале 8–15 лет. Можно установить следующие пространственно-временные закономерности происходивших в XX и XXI веках землетрясений:

1.1. В пределах региона Персидского залива происходит 60-70 землетрясений Мw>4,5 в год;

1.2. Средняя глубина очага составляет 10–13 км, 99% землетрясений относится к мелкофокусным; сейсмоактивный слой залегает на глубине 10–30 км.

1.3. Для землетрясений магнитудой выше 6 подтверждена закономерность: чем сильнее землетрясение, тем больше глубина его очага.

2. На протяжении XX и XXI веков сейсмические очаги сохраняют пространственное положение, а их постоянное механизмы подтверждают кинематику сейсмоактивных разломных зон: 65% землетрясений в регионе Персидского залива образовались BO взбросо-надвиговых тектонических обстановках (крупнейшие взбросо-надвиги: Фронтальный Загросский разлом, Карех-Басский, Бориз, Лар); 25% землетрясений имеют сдвиговый механизм очага (крупнейшие правые сдвиги: Казерун-Боразджанский, Дена, Главный Современный Разлом Загроса, Сарвестан); остальные 9% землетрясений относят в равной степени к сбросам и взрезам.

3. При пересечении с северо-востока на юго-запад от тыловых частей орогена Загроса в сторону Персидского залива наблюдается закономерное увеличение сейсмичности от минимальной в Чешуйчатой зоне, до максимальной во фронтальной Предгорной зоне складчатого пояса. В пределах бассейна Персидского залива сейсмичность резко убывает и сходит на нет на юго-западном побережье залива. Описанное увеличение сейсмичности при пересечении Загроса с северовостока на юго-запад соответствует уменьшению возраста его тектонических структур.

4. В пределах наиболее сейсмически активных Предгорной зоны и зоны Низкого Загроса сдвиговые перемещения по разломам глубокого заложения сочетаются с развитием надвиговых деформаций. Данные зоны характеризуются наименьшим периодом повторяемости землетрясений, в том числе, сильных, а также наибольшей величиной выделившейся сейсмической энергии. Именно в этих зонах сконцентрирована основная нефте- газодобыча региона Персидского залива, в связи с чем необходимы укрепляющие мероприятия как для существующих объектов инфраструктуры, так и для планирующихся в перспективе.

5. Сейсмические события XX века не повлияли на уровень добычи нефти крупнейшего нефтегазового месторождения региона – Гечсаран. Следовательно, применявшиеся в тот период времени укрепляющие мероприятия и технологии можно считать адекватными сейсмическим рискам. Однако в пределах глубинной Казерун-Боразджанской зоны можно ожидать крупных сейсмических событий (Mw>6), влияние которых на безопасность хозяйственной деятельности и, в частности, на добычу нефти может быть катастрофическим. Это необходимо учитывать при дальнейшей эксплуатации Гечсаранского нефтяного центра.

Установленные закономерности указывают на единую природу позднекайнозойских тектонических и сейсмических процессов и открывают новые возможности для долгосрочного прогноза сильных землетрясений в пределах региона Персидского залива. К таким закономерностям, прежде всего, относятся

106

выявленная в диссертационном исследовании повторяемость землетрясений в интервалах магнитуд Mw=5,0±0,2 и 4,5±0,2. Аналитические выводы, следующие из проведенной работы, позволяют определить пространственно-временные закономерности возникновения крупных землетрясений.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрамов В.Ю., **Хиба Алджабасини.** Некоторые особенности стратиграфии и тектонического районирования сейсмически активного Загросского краевого прогиба в пределах акватории Персидского залива // Вестник РУДН Серия: «Инженерные исследования», 2019 Том 20 № 1. С. 57-65.

2. Алджабасини Хиба, Абрамов В.Ю., Дубянский А.И. Оценка сейсмичности центральной и восточной частей Персидского залива и связь с нефтегазоносностью региона. Сборник трудов конференции РУДН «Инженерные системы–2019». С. 421-427.

3. Алджабасини Хиба, Абрамов В.Ю. Некоторые особенности сейсмической активности в пределах акватории Персидского залива. XIV Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле» МГРИ–РГГРУ. С. 6-8.

4. Алджабасини Хиба. Некоторые аспекты неотектонического районирования Загорского краевого прогиба в связи с сейсмической активностью региона // Астраханский вестник экологического образования № 4 (52) 2019 С. 48 – 53.

5. Алджабасини Хиба. Абрамов В.Ю., Дубянский А.И. Сейсмотектонические особенности района расположения центра нефтедобывающей промышленности Ирана. // Геология, география и глобальная энергия. 2020. №1 (76) С. 9–15.

6. Абрамов В. Ю., Алджабасини Хиба. Сейсмическая активность районов нефтедобычи Персидского залива. www.earthdoc.org (DOI: 10.3997/2214-4609.201900543).

7. Алджабасини Хиба, Абрамов В.Ю., Дубянский А.И. Особенности характера сейсмичности центральной и восточной частей Персидского залива // Геофизика, 2019 – №3, С. 10–14.

8. Аль-Гурейри Ахмад С. Ясин. Неотектоническое районирование и структурно-геоморфлогическое строение территории Иракских пустынь // Диссертация на соискание степени к.г.-м.н. Москва, 2019, с. 102.
9. Аммар О. Особенности геологического строения Северо-Западной Сирии и оценка ресурсов подземных вод с помощью данных дистанционного зондирования: Дис. канд. геол.-минер. наук. М., 1993. 156 с.

10. Аплонов С.В. Геодинамика: Учебник. – Спб.: Изд-во С.-Петерургского университета. 2001–360 с.

11. Артюшков Е.В. Физическая тектоника. М.: Наука, 1993. 457 с.

12. Архипова Е.В. Корреляция временного хода сейсмичности районов Кавказско-Копетдагского сегмента Альпийского Средиземноморского пояса // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2004. Т. 79, вып. 1. С. 27–32.

13. Архипова Е.В. Тектоника и сейсмичность Аравийско-Евразиатской коллизионной области: Дисс. канд. геол.минерал. наук. М.: ИФЗ РАН, 2006. 178

14. Асланов Б.С. Нефтегазоносные провинции Персидского залива и Южного Каспия -реликтовые остатки палеотетиса // Каротажник. – 2012. –№ 10. – С. 4–11.

15. Бачманов Д.М., Зеленин Е.А., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. Использование Базы данных активных разломов Евразии при решении тектонических задач // Геодинамика и тектонофизика. 2019. Т. 10. № 4. С. 971-993.

16. Бачманов Д.М. Новейшая тектоника и геодинамика центральной части Внешнего Загроса (юго-западный Иран) // Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2002. 24 с.

17. Белашев Б.З. Анализ распределений сейсмических событий каталога «NEIC». – Труды Карельского научного центра РАН. 2013 – №1. С. 4–11.

18. Бернард Бижу-Дюваль. Седиментационная геология. – М. – Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2012. – 704 с.

19. Брянцева Г.В., Костенко Н.П. Некоторые особенности строения позднеорогенного рельефа Ирана // Тез. докл. науч. конф. «Ломоносовские чтения». 23–27 апр. 1997 г. М.: Моск. ун-т. 1997. С. 84–85.

20. Буниятов З. М. Сведения о землетрясениях в некоторых арабских источниках // Известия АН Азерб. ССР. Сер : наук о земле. 1977а. С. 93–99.

21. Высоцкий И.В. Геология нефти. Справочник. Том 2, книга 2 Нефтяные месторождения зарубежных стран. Недра, Москва, 1968 г., 804 стр.

22. Дубянский А.И., **Хиба Алджабасини**. Способы оценки сейсмичности территории Сирии // Вестник РУДН. Серия: «Инженерные исследования», 2019 Том 20 № 1.

23. Дубянский А.И., Алджабасини Хиба. Некоторые оценки режима сейсмичности территории Сирии. Материалы 43-й сессии Международного научного семинара им. Д. Г. Успенского. 2016.

24. Ершов А.В., Никишин А.М., Брунэ М.-Ф., Спакман В. Позднекайнозойская геодинамика Кавказского региона: данные численного моделирования и сейсмотомографии // Тектоника неогея: Общие и региональные аспекты. М.: ГЕОС, 2001. С. 230–235. (Материалы XXXIV тектонич. совещ.; Т. 2.).

25. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И. Палеогеодинамика. М.: Наука, 1993.

26. Зоненшайн Л.П., Кузьмин М.И., Натапов Л.М. Тектоника литосферных плит территории СССР. В 2 т. М.: Недра, 1990.

27. Ирак. Геологическое строение, нефтегазоносность и состояние нефтегазовой промышленности, обработка и интерпретация сейсмических материалов по лицензионным блокам в южной и центральной частях Западной Пустыни, оценка прогнозных ресурсов нефти и газа. ООО «Совгеоинфо». Том 1. 2009. – 158 с.

28. Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализации. М.: Наука, 2006. 254 с.

29. Истратов И.В. Нефтегазоносность и ресурсный потенциал основных осадочных бассейнов Мирового океана. // Научно-технический сборник – Вести газовой науки. 2013 – №5 (16) – стр. 32–42.

30. Кеннет Дж.П. Морская геология. В 2 т./ Пер. с англ. М.: Мир, 1987.

31. Кокс А., Харт Д. Тектоника плит/ Пер. с англ. М.: Мир, 1989.

110

32. Копп М.Л. Тектоника Восточного Ирана (в свете новейших геологических и космофотографических данных) // Изв. вузов. Геол. и разведка. 1974. № 12. С. 44–56.

33. Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе // Тр. Геол. ин-та РАН. Вып. 506. М.: Научный мир, 1997. 313 с. Костенко Н.П. Развитие складчатых и разрывных деформаций в орогенном рельефе. М.: Недра, 1972. 320 с.

34. Короновский Н.Б., Брянцева Г.В., Архипова Е.В., Анисимова О.В. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность Иранского региона. // Бюл. Моск. о-ва испытателей природы отд. геол. 2017. Т. 92. В. 3. Стр. 12–22.

35. Короновский Н.В., Дёмина Л.И. Модель коллизионного вулканизма Кавказского сегмента Альпийского пояса // Докл. РАН. 1996. Т. 350, № 4. С. 519–522.

36. Короновский Н.В., Дёмина Л.И. Коллизионный этап развития Кавказского сектора Альпийского складчатого пояса: геодинамика и магматизм // Геотектоника. 1999. № 2. С. 17–35.

37. Кочарян Г.Г. Геомеханика разломов. Российская академия наук; Институт динамики геосфер; Российский научный фонд. – М.: ГЕОС, 2016, с.424

38. Левин Л.Э. Некоторые новые черты геологии и минерагении плиоценплейстоценовых отложений // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного приода. – №54. 1985. С. 3–9.

39. Леонов Ю.Г. Коллаж гондванских и палеозойских элементов в инфраструктуре альпид Среднего Востока // Геотектоника. 1993. № 1. С. 23–32.

40. Литовченко И. Н., Чалова В. С. Гипотезы возникновения и модели очагов землетрясений // электронный pecypc: http:// www.sciteclibrary.ru/texsts/ rus/ stat/ st3835.pdf.

41. А.А. Лукк, Ю.Л. Ребецкий. Современная геодинамика и фокальные механизмы землетрясений в окрестностях Бушерской АЭС. Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17, №3. С. 90–108.

42. Макаревич В.Н., Нехаев А.А. Литолого-стратиграфические особенности и палеогеографические условия седиментации осадочного чехла провинции Dezful (Иран) // Нефтегазовая геология. Теория и практика – 2012. – Т.7. – №3.

43. Милановский Е.Е., Короновский Н.В. Орогенный вулканизм и тектоника Альпийского пояса Евразии. М.: Недра, 1973. 280 с.

44. Милановский Е.Е. Новейшая тектоника Кавказа. М.: Недра, 1968. 483 с.

45. Нугманов А.Х. К методике анализа аномально высоких пластовых давлений // Сб.: Вопросы геологии и тектоники нефтегазоносных областей Узбекистана. – Ташкент: САИГИМС, 1978. – Вып. ХХХІ. – С. 39–55.

46. Обручев В.А. Основные черты кинематики и пластики неотектоники // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1948. № 5. С. 13–24.

47. Палеосейсмология. Под редакцией Джеймса П. Мак-Калпина. 2012, 560 с.

48. Ребецкий Ю.Л. и др. Определение фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана. // Геодинамика и тектонофизика. – 2017. Том №8, выпуск 4, стр. 971–988.

49. Рогожин Е. А., Богачкин Б. М. Альпийская и новейшая тектоника района Рачинского землетрясения // Физика Земли. –1993. – № 3. – С. 3–11.

50. Рогожин Е.А. Сейсмотектонические особенности Ахрамского землетрясения 24 сентября 1999 года (Иран, Загрос). Геотектоника, 2012, №5, с. 63–74.

51. Соловьёв Н.Н. О причинах уникальной концентрации нефти (и газа) в Персидском нефтегазоносном бассейне // Геология нефти и газа. – 1980. –№ 8. – С. 48–54.

52. Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез // Тр. Геол. ин-та АН СССР. Вып. 361. М.: Наука, 1983. 224 с.

53. Трифонов В.Г., Трубихин В.М., Аджамян Ж., Джаллад З., Эль-Хаир Ю. Левантская зона разломов на северо-западе Сирии // Геотектоника. 1991. № 2. С. 63–75.

54. Трифонов В.Г. Особенности развития активных разломов // Геотектоника. 1985. № 2. С. 16-26.

55. Трифонов В.Г., Кожурин А.И. Проблемы изучения активных разломов // Геотектоника. 2010. № 6. С. 79–98.

56. Трифонов В.Г. Неотектоника подвижных поясов. Труды геологического института. – М.: Геос, 2017. – 180 с.

57. Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М. Эволюция центральной части Альпийско-Гималайского пояса в позднем кайнозое // Геология и геофизика. 2012. Т. 53, № 3. С. 289–304.

58. Трифонов В.Г. Неотектоника: учебник. – Дубна: Гос. У-т. «Дубна», 2016. – 310 с.

59. Трифонов В.Г. Коллизия и горообразование. Геотектоника. 2016. Т. 50, №1. С. 1–20.

60. Трифонов В.Г., Иванова Т.П., Бачманов Д.М. Новейшее горообразование в геодинамической эволюции центральной части Альпийско-Гималайского пояса // Геотектоника. 2012. № 5. С. 3-21.

61. Трифонов В.Г., Бачманов Д.М., Иванова Т.П., Имаев В.С. Принципы и технология использования геологических данных для оценки сейсмической опасности (на примерах Сирии и Фенноскандии) // Инженерные изыскания. 2010. № 4. С. 44-51.

62. Уломов В.И. Глубинная структура земной коры сейсмоактивной территории Западного Узбекистана // Глава 1. Сейсмичность Западного Узбекистана. Ташкент: ФАН. 1972. С. 6–18.

63. Уломов В.И. Сейсмогеодинамика и сейсмическое районирование Северной Евразии // Вулканология и сейсмология. 1999. № 4–5. С. 6–22.

64. Уломов В.И. Волны сейсмогеодинамической активизации и долгосрочный прогноз землетрясений // Физика Земли. 1993б. № 4. С. 43–53.

65. Хаин В.Е. Региональная геотектоника. Альпийский средиземноморский пояс. М.: Недра, 1984. 344 с.

66. Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов. – Москва: научный мир, 2001. – 601 с.

67. Худяков Ю.С. Сравнительный анализ сведений из арабских, персидских и китайских источников о необычных природных явлениях и катастрофах, происходивших на ближнем, среднем востоке и в центральной Азии с раннем средневековье. Вестник НГУ. Серия: история, филология. 2011. Том 10, выпуск 5: Археология и этнография. С. 247–253.

68. Шеин С.В. Геология и нефтегазоносность России [Текст] = Geology and Oil-gas-potential of Russia / В. С. Шеин ; М-во природных ресурсов и экологии Российской Федерации, Федеральное агентство по недропользованию, Всероссийский научно-исслед. геологический нефтяной ин-т (ВНИГНИ). – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва: ВНИГНИ, 2012. – 844 с.

69. Шень То. Сейсмическая активизация восточного Тибета в начале 21 века и сейсмотектоническая роль литосферного блока Баян-Хара. Диссертация на соискание степени кандидата к.г.-м.н. Москва – 2018, с. 167.

70. Ambraseys N.N., Melville C.P [1982]. A history of Persian earthquakes. Cambridge University Press, Cambridge, England.

71. Berberian, M., and G. C. P. King [1981], Towards the paleogeography and tectonic evolution of Iran, Can. J. Earth Sci., 18, 210 – 265.

72. Bordenave M.L. Gas prospective areas in the Zagros Domain of Iran and in the Gulf Iranian Waters. Search and Discovery Article #10040a (2003).

73. Dewey J.W., Crantz A [1973]. The Ghir earthquake of April 10, 1972 in the Zagros mountains of southern Iran: seismotectonic aspects and some results of field reconnaissance. Seismological Society of America Bulletin, 63, 2071.

74. D.M. Bachmanov, V.G.Trifonov, Active faults in the Zagros and central Iran. Tectonophysics. 380 (2004), p. 221–241.

75. **Hiba Mhd Dib Aljabasini**, the relationship of seismicity with tectonic processes according to the analysis of large earthquakes that occurred on the territory of

Iran int the XX and XXI centuries. Geomodel, inzhenernaya i rudnaya geofizika-2020. DOI: <u>10.3997/2214-4609.202051023</u>

76. Zaman Malekzade, Olivier Bellier, Mohammad Reza Abbassic, Esmaiel Shabanian, Christine Authemayou. The effects of plate margin inhomogeneity on the deformation pattern within west-Central Zagros Fold-and-Thrust Belt // Elsevier, Tectonophysics, №126928.

77. James, G.A., and Wynd, J.G., 1965, Stratigraphic nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area, AAPG Bulletin, v. 49, p. 2182–2245.

78. Jaechong Ko. Petroleum geology of Iran. J. Korean Soc. Miner. Energy Resour. Eng. Vol.54, No. 5 (2017) pp. 549-606. https://doi.org/10.12972/ksmer.2017.54.5.549.

79. Konert et al., Paleozoic Stratigraphy and Hydrocarbon Habitat of the Arabian Plate. AAPG,2001, 6(3):407–442

80. Rawaa Dakkak, Maen Mreish, Mohamad Daoud, George Hade. Seismological Research Letters (2005) 76 (4): 437–445.

81. Saffa Fouad. Tectonic and structural evolution of the Mesopotamia foredeep, Iraq. Iraqi bulletin of Geology and Mining. Vol.6, N2, 2010, p. 41-53.

82. Szabo, F. and Kheradpir, A. (1978) Permian and TRIASSIC Stratigraphy, Zagros Basin, Southwest Iran. Journal of Petroleum Geology, 1, 57–82.

83. Trifonov V.G., Çelik H., Simakova A.N., Bachmanov D.M., Frolova P.D., Trikhunkov Ya.I., Tesakov A.S., Titov V.M., Lebedev V.A., Ozherelyev D.V., Latyshev A.V., Sychevskaya E.K. Pliocene – Early Pleistocene history of the Euphrates valley applied to Late Cenozoic environment of the northern Arabian Plate and its surrounding, eastern Turkey // Quaternary International. 2018. vol. 493. p. 137-165.

84. Trifonov V.G., Çelik H., Ozherelyev D.V., Simakova A.N., Bachmanov D.M., Trikhunkov Ya.I., Frolov P.D., Tesakov A.S. The Pliocene-Quaternary evolution of the Euphrates valley in the northern surrounding of the Arabian Plate // INQUA–SEQS Section on European Quaternary Stratigraphy Workshop 03–11 September, 2016. Bridging Europe and Asin: Quaternary stratigraphy and Paleolithic human occupation in Armenia and Southern Georgia. Program & Abstracts. Yerevan. 2016. P. 16.

85. Trifonov V.G., Bachmanov D.M., Ali O., Dodonov A.E., Ivanova T.P., Syas'ko A.A., Kachaev A.V., Grib N.N., Imaev V.S., Ali M., Al-Kafri A.M. Cenozoic tectonics and evolution of the Euphrates valley in Syria // Geological development of Anatolia and the Easternmost Mediterranean. Geological Society. London. Spec. Publ. 2013. Vol. 372. No. 1. P. 615-635 (GSP Spec. Publ. Vol. 372).

86. Trifonov V., Ammar O., Dodonov A., Ivanova T., Karakhanian A., Minini
H., Bachmanov D., Al-Kafri A. et al. Neotectonics and recent geodynamics of Syria.
6th Intern. Symposium on Eastern Nediterranean Geology. Amman, Jordan, Abstracts.
2007. P.19.

87. Whitney, J.W. – Saudi Arabia's stable sand seas. In: Anonymous (ed), The Geological Society of America, 94th annual meeting. Abstracts with Programs Geological Society of America, 13 (7), 580, 1981.

88. Vernant Ph.et al [2004]. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East costrained by GPS measurement in Iran and northern Oman. Geophysical Journal International, 157, pp. 381–398.

89. https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/

- 90. https://rogtecmagazine.com/иран-ждет-высоких-технологий/?lang=ru
- 91. https://www.iris.edu/hq/
- 92. http://neotec.ginras.ru/index/database/database\_01.html
- 93. https://pandia.ru/text/80/617/images/img1\_33.jpg
- 94. <u>https://www.ccreservoirs.com/</u>
- 95. <u>www.zvo.su</u> (Зарубежное военное обозрение)
- 96. https://www.dakairanmasasi.com/discover-iran/genel-bakis/cografya-ve-

<u>iklim</u>

## СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 1. Географическое положение Персидского залива (стр. 9)

Рис. 2. Карта рельефа района исследований (стр. 10)

Рис. 3. Сводный стратиграфический разрез верхней части осадочного чехла в пределах региона Персидского залива (стр. 11)

Рис. 4. Сводный стратиграфический разрез нижней части осадочного чехла региона Персидского залива (стр. 12)

Рис. 5. Сводный стратиграфический разрез палеогеновых отложений (стр. 21)

Рис. 6. Геологический разрез региона Персидского залива по линии I-I' (стр. 23)

Рис. 7. Геологический разрез региона персидского залива по линии II-II' (стр. 24)

Рис. 8. Положение выбранных разрезов на карте активных разломов региона (стр. 24)

Рис. 9. Сейсмический разрез в направлении юго-запад – северо-восток через Месопотамский прогиб (стр. 26)

Рис. 10. Структурная карта кристаллического фундамента в пределах региона Персидского залива (стр. 26)

Рис. 11. Тектоническая схема Ирана (стр. 28)

Рис. 12. Региональная тектоническая обстановка рассматриваемой региона (стр. 30)

Рис. 13. Активные разломы в пределах Аравийско-Иранского сегмента Альпийско-Гималайского подвижного пояса (стр. 32)

Рис. 14. Зональность Месопотамского краевого прогиба (стр. 34)

Рис. 15. Схема тектонического строения региона Персидского залива (стр. 37)

Рис. 16. Схема расположения основных месторождений нефти и газа в пределах региона Персидского залива и его северо-восточного побережья (стр. 40)

Рис. 17. Схема стратиграфического положения основных нефтегазовых комплексов Персидского залива (стр. 41)

Рис. 18. Схема распространения карбонатов (известняк) и эвапоритов в Месопотамском прогибе (стр. 42)

Рис. 19. Генерация углеводородов в зонах подвига океанических плит под островные дуги и активные окраины континента (стр. 44)

Рис. 20. Карта сейсмических поясов земли (стр. 51)

Рис. 21. Современное поле напряжений по данным сейсмичности (стр. 52)

Рис. 22. Динамика землетрясений Ближнего Востока в раннем средневековье (стр. 54)

Рис. 23. Динамика землетрясений по годам в XX веке в регионе Персидского залива (стр. 57)

Рис. 24. Динамика землетрясений 1950–1970 годов в пределах Персидского залива (стр. 57)

Рис. 25. Распределение землетрясений по годам 1970-2000 годов (стр. 58)

Рис. 26. Распространение очагов землетрясений региона Персидского залива в XX веке (стр. 59)

Рис. 27. Распределение землетрясений по годам в пределах Персидского залива в период 2005–2018 (стр. 60)

Рис. 28. Графики повторяемости сейсмических событий в период 2005–2017 на территории Персидского залива (стр. 62–63)

Рис. 29. График распределения по годам выделившейся совокупной сейсмической энергии за период с 1900 по 2018 года (стр. 67)

Рис. 30. График динамики изменения средних глубин очагов землетрясений за период 2005–2018 (стр. 68)

Рис. 31. График динамики изменения максимальных глубин очагов землетрясений за период 2005–2018 гг (стр. 69)

Рис. 32. График зависимости магнитуды от глубин очагов крупнейших землетрясений M > 6 (стр. 69)

Рис. 33. График зависимости распределения магнитуд и глубин очагов землетрясений в период 2005–2018 гг. (стр. 70)

Рис. 34. Распределение количества землетрясений по глубине очагов (стр. 71)

Рис. 35. Разрез по линии Аравийская плита – Персидский залив – хр. Загрос с нанесением ключевых землетрясений и привязкой к схеме тектонического районирования (составлено автором) (стр. 72)

Рис. 36. Распределение очагов землетрясений в период 2005–2018 года (стр. 73–74)

Рис. 37. Сейсмотектоническая карта региона Персидского залива (стр. 75)

Рис. 38. Правосдвиговые смещения оврагов по разломам в северном сегменте Казерун-Боразджанской разломной зоны, вблизи поселка Тенге-Таркан (стр. 76)

Рис. 39. Зарисовка стенки канавы поперек разлома в южном сегменте Казерун-Боразджанской разломной зоны, юго-восточнее города Ахрам (стр. 77)

Рис.40. Зарисовка стенки канавы поперек Мишанской флексурно-разломной зоны, вблизи Фронтальной зоны Загроса (стр. 77)

Рис. 41. Разрез через флексурно-разломную зону Раге-Сафид, входящую во Фронтальную зону Загроса (стр. 78)

Рис. 42. Силовая модель очага землетрясения (стр. 80)

Рис. 43. Распределение решений по фокальным механизмам очагов землетрясений 2005–2018 гг (Mw>5) (стр. 81)

Рис. 44. Тектоническая карта с фокальными механизмами землетрясений и выделением кластеров (стр. 83)

Рис. 45. Карта механизмов очагов землетрясений в период 2005–2017 гг (стр. 83)

Рис. 46. Анализ фронтальной зоны разломов Загроса (стр. 86)

Рис. 47. Тектоническая характеристика фронтальной зоны Загроса (стр. 86)

Рис. 48. Карта сейсмотектонического районирования в пределах региона Персидского залива совместно картой расположения объектов нефте-газодобычи (стр. 91)

Рис. 49. Схема расположения модельного участка (г. Гечсаран) (стр. 94)

Рис. 50. Оценка сейсмичности рассматриваемого региона (стр. 95)

Рис. 51. Очаги землетрясений в пределах рассматриваемой территории в сопоставлении с магнитудой и фокальными решениями (стр. 97)

Рис. 52. График зависимости углов главных осей напряжений растяжения (Т) и сжатия (Р) землетрясений, произошедших в районе г. Гечсаран, за период 2000–2019 гг. (стр. 98)

Рис. 53. История разработки месторождения Гечсаран (стр. 99)

## СПИСОК ТАБЛИЦ

Табл. 1. Положение продуктивных пластов в стратиграфической схеме Месопотамского краевого прогиба (стр. 25)

Табл. 2. Различия по степени деформаций тектонических зон Месопотамского краевого прогиба (стр. 35)

Табл. 3. Геологические запасы нефти крупнейших месторождений Персидского залива (стр. 38)

Табл. 4. Значения констант а и b по годам, определенные по графикам повторяемости Гутенберг (стр. 65)

Табл. 5. Совокупность выделившейся сейсмической энергии с 1900 по 2017 года (стр. 66)

Табл. 6. Характеристики очагов землетрясений (стр. 82)

Табл. 7. Месторождения нефти в пределах региона Персидского залива, находящиеся в стадии активной разработки (стр. 92)

Табл. 8. Данные о землетрясениях с имеющимися определениями механизма очага (стр. 102–104)