

## **Проект РФФИ 20-55-56004 на 2021-2023 гг.**

Неотектоника и сейсмоструктура области тройного сочленения складчато-надвиговых поясов Эльбурса, Загроса и Малого Кавказа и ее соотношения с Южно-Каспийской впадиной

### **Фундаментальная научная задача исследования**

Общая задача – исследование новейшей структуры и современной геодинамики горных поясов как основа для определения их происхождения и оценки сейсмической опасности. В рамках этой обширной задачи наиболее сложным и важным является изучение областей сочленения и взаимодействия новейших горно-складчатых поясов разного простирания, строения и истории формирования, особенно, если в регионе сочленяются три пояса. Областью именно такого тройного сочленения является выбранный регион, причем структуры Малого Кавказа выражены здесь двояко. На юге сюда выходит восточное продолжение тектонических зон Малокавказского синтаксиса, а на севере – центральная часть и восточный фланг Талышского малого синтаксиса с вулканом Сабалан в центре. Это осложняет задачу исследования.

### **Актуальность исследования**

Актуальность исследования состоит в его научной и практической значимости. Фундаментальное значение исследования определяется важностью понимания строения и происхождения областей тройного сочленения однотипных структурных образований, в данном случае горных складчато-надвиговых поясов. Практическая значимость заключается в том, что развивающиеся в современную эпоху области тройного сочленения указанного типа отличаются сложностью и своеобразием активной тектоники и, соответственно, сложностью сейсмоструктуры и повышенной сейсмической опасностью, оценка которой является одной из задач проекта. В данном случае научная и практическая значимость исследования возрастает оттого, что сочленяющиеся в районе исследований горно-складчатые пояса Эльбурса и Талыша в значительной мере определяют строение и происхождение впадины Южного Каспия с ее высоким углеводородным потенциалом.

### **Анализ современного состояния исследований в данной области**

В оценке современного состояния исследований по заявленной проблеме следует различать общетеоретический, методический и региональный аспекты. История формирования новейших горных сооружений рассматривалась рядом выдающихся учёных, как отечественных, так и зарубежных. Они разработали комплекс методов для изучения этого процесса. В теории тектоники литосферных плит образование крупнейших горных систем связывалось с утолщением земной коры при коллизионном сжатии. Новаторскими стали работы, соавторами которых были российские участники настоящего проекта. В этих работах доказывалось, что коллизионного сжатия недостаточно для образования реально существующих горных систем. Оно в той или иной мере (местами решающей) обусловлено разуплотнением низов коры и верхов мантии в результате течения подлитосферной мантии и преобразования литосферы под её воздействием. Это было впервые обосновано для Центрального Тянь-Шаня, при изучении которого разработаны методические подходы к решению проблемы (Трифонов и др., 2008), и позднее установлено для всех центральных сегментов Альпийско-Гималайского пояса, включая Иран (Соколов, Трифонов, 2012; Трифонов и др., 2012,1,2; Trifonov, Sokolov, 2014; Трифонов, 2016; Трифонов, Соколов, 2018).

Группа задач связана с геологическими подходами к созданию сейсмоструктурной основы для оценки сейсмической опасности новейших орогенических поясов. Этому посвящён ряд обобщающих работ (Yeats et al., 1997; McCalpin, 2009). Особенности применения разрабатываемых методов для центральных сегментов Альпийско-Гималайского пояса, включая Северный Иран, определялись при участии исполнителей настоящего проекта (Ulomov et al., 1999; Shebalin et al., 2000; Trifonov, 2000; Трифонов, Кожурин, 2010). Новым шагом явился

вероятностный подход к оценке сейсмической опасности. Наряду с детерминистским подходом, руководитель данного проекта применил его к оценке сейсмической опасности Сирии (Неотектоника..., 2012).

Переходя к состоянию изучения позднечетвертичной (активной) и позднекайнозойской (неотектонической) структуры и позднекайнозойского развития региона исследований, отметим, прежде всего, наличие геологической карты региона масштаба 1:1000000 (Geological Map..., 1978). Альпийскую структуру региона определяет положение сутуры Неотетиса на юге и восточного продолжения более северной сутуры Измир–Анкара–Эрзинджан. Сутура Неотетиса следует вдоль зон Южно-Таврского (Битлисского) надвига в Турции и Главного Загросского надвига в Иране (Stöcklin, 1974; Agard et al., 2005; Трифонов, 2016). Закрытие реликтов Неотетиса и начало коллизии датируется здесь концом эоцена–олигоценом (Akinci et al., 2016; Hessami et al., 2001a).

Более северную сутуру нередко называют северной ветвью Неотетиса (Хаин, 2001; Sosson et al., 2010), но правильнее определить ее как сутуру Мезотетиса, поскольку она отличается от южной сутуры более древним возрастом характерных атрибутов – офиолитовых пород, их метаморфизма, островодужного вулканизма и сопровождавших его интрузий (Трифонов и др., 2020). Сутура Измир–Анкара–Эрзинджан протягивается через всю Анатолию (Sengör, Yilmaz, 1981) и в районе г. Эрзурум раздваивается. Южная ветвь продолжается до г. Кагызман, где поворачивает на юго-восток, проходит вдоль юго-западного побережья оз. Урмия и соединяется с сутурой Неотетиса (Geological Map..., 1978; Geological map of Turkey, 1989). Высказывалось мнение, что офиолиты южной ветви, вскрытые в Северо-Западном Иране, аллохтонны и обдущированы из северной ветви сутуры Мезотетиса (Avagyan et al., 2017). Однако структурная позиция офиолитов южной ветви между микроплитами Иранской и Таврид свидетельствует в пользу того, что южная ветвь является самостоятельным продолжением сутуры. Северная ветвь продолжения сутуры Измир–Анкара–Эрзинджан вскрыта западнее г. Карс и прослеживается с перерывами вдоль северного побережья оз. Севан и далее на юго-восток до долины р. Аракс под названием Севано-Акеринской офиолитовой зоны (Книппер, 1975; Adamia et al., 2017). Предполагается, что далее эта сутура приобретает характер трансформы и следует вдоль Северо-Тебризского разлома (Alavi, 1996). Восточным продолжением сутуры на южном склоне Эльбурса между городами Форумад и Фариман можно посчитать полосу выходов цветного меланжа мелового возраста с покровами базальтов и телами ультраосновных пород (Geological Map..., 1977).

Обобщающие работы по неотектонике региона исследований отсутствуют, хотя многие исследователи отмечали позднекайнозойскую деформацию складчато-надвиговых зон. Наиболее обстоятельные работы в этом направлении выполнены в Загросском складчато-надвиговом поясе (Бачманов, 2001; Hessami et al., 2001a; Alavi, 2007; Agerd et al., 2011). В работе (Mesbahi et al., 2016) обоснованы неогеновые взбросо-сдвиговые перемещения по Северо-Тебризскому разлому. Предложена модель растяжения СЗ Ирана в связи с развитием Южно-Каспийской впадины (Masson et al., 2006). Важное значение для понимания неотектоники региона имеют свидетельства интенсивного четвертичного поднятия в соседних районах Армении и Турции (Trifonov et al., 2016, 2020).

Значительные успехи достигнуты в изучении активной тектоники региона. Опубликовано несколько обобщающих работ, посвященных рисунку и характеристике активных разломов и приуроченности к ним сильных землетрясений (Berberian, 1976; Berberian, 1997; Berberian, Yeats, 1999; Трифонов и др., 2002; Copley, Jackson, 2006). В обзорной статье (Hessami, Jamali, 1996) рассмотрены соотношения Северо-Тебризского разлома с Кашанской зоной разломов в тылу Загроса. В работе (Faridi et al, 2017) описаны соотношения активных правых сдвигов ЗСЗ простирания с субмеридиональными левыми взбросо-сдвигами Талышскогосинтаксиса. Серия работ посвящена обоснованию кинематики и скорости движений в Северо-Тебризской правой взбросо-сдвиговой зоне (Hessami et al., 2003; Rizza et al., 2013; Solaymani Azad et al., 2015). В статьях (Karakhanian et al., 2002, 2004) показаны соотношения Северо-Тебризского разлома с активными разломами Армении и Восточной Турции. Описаны активные разломы, соседствующие с Северо-Тебризской зоной (Mesbahi, Bakhte, 2020). Несколько работ посвящено

эпицентральных зонах недавних сильных землетрясений, Ардебильского 1997 г. (Aziz-Zanjani, 2012) и Ахар 2012 (Copley et al., 2013; Razzaghi, Ghafori-Ashtiani, 2012; Ghods et al., 2015). Оценены современные скорости деформации региона и движений по сдвигам по данным GPS измерений (Vernant et al., 2004; Djamour et al., 2011; Vernant, 2015)

### **Цель и задачи проекта**

Цель проекта – исследовать активные разломы, новейшую структуру и историю неоген-четвертичного развития области тройного сочленения складчато-надвиговых поясов Эльбурса, Загроса и Малого Кавказа, определить на этой основе геодинамические условия формирования структуры и сейсмогенерирующие зоны. Для достижения этой цели будут решаться следующие задачи. (А) Выявление (или уточнение расположения) и параметризация (оценка строения, кинематики, амплитуд смещения и соотношений с данными о сейсмичности) крупнейших зон активных разломов. (В) Выявление и параметризация элементов новейшей структуры, их выражения в рельефе, характера деформаций и смещений, определение соотношений между неотектоническими формами и зонами, структурного положения вулканических образований. (С) Восстановление истории формирования новейшей структуры, геодинамической обстановки на разных стадиях неотектонического развития и параметров современной геодинамики как результата развития структуры. (D) Выделение главных сейсмогенерирующих зон и определения максимальной возможной магнитуды землетрясений в этих зонах.

### **Научная новизна исследования**

Научная новизна проекта состоит, прежде всего, в постановке задачи – определении региона исследований как области тройного сочленения позднекайнозойских горно-складчатых поясов. Насколько нам известно, таким образом этот регион до сих пор не рассматривался. Его рассмотрение как области тройного сочленения, с одной стороны, открывает новые возможности исследования и интерпретации структурных соотношений, а, с другой стороны, представляет теоретическую ценность, поскольку соотношения такого рода недостаточно изучены. Элементы новизны содержатся в подходе к решению поставленных задач. Активная тектоника и современная геодинамика рассматриваются как результат неотектонического развития региона в течение позднего кайнозоя (последних 26 млн лет). Новизна присутствует также в вероятностной оценке  $M_{max}$  сейсмогенерирующих зон. Общий подход к оценке в виде построения логического дерева учета различных факторов не оригинален (см., например, [McCalpin, 2009]). Элементы новизны содержатся в выборе факторов и оценке их веса. Методы исследований, используемые при подготовке и проведении полевых работ, обработке и интерпретации полученных результатов, не будучи оригинальными, находятся на уровне мировых стандартов. Преимущество предлагаемого подхода состоит в комплексном применении разных методов.

### **Предлагаемые подходы и методы, их обоснование**

Чтобы охарактеризовать методы и подходы к решению поставленных задач, обозначим объекты и районы, при исследовании которых эти методы и подходы будут применены в различных сочетаниях. Объектами исследований являются: (А) активные разломы; (В) новейшая структура тектонических зон и их сочленений, структурное положение позднекайнозойских вулканических образований; (С) история развития новейшей структуры и современная геодинамика региона как итог этого развития; (D) оценка сейсмического потенциала выделенных сейсмогенерирующих зон.

А. При изучении активных разломов будут производиться: их предварительное выделение и диагностика на дистанционных материалах; определение кинемических параметров разломов путем структурного изучения зоны разлома, определения направления и амплитуды смещений форм рельефа и молодых отложений, а в некоторых случаях также изучения приразломных отложений в естественных обнажениях и искусственных выработках с целью оценки возраста

смещений и выявления сейсмогенных подвижек. Для определения возраста смещений будут датироваться палеонтологические и археологические находки и образцы на радиоуглеродный анализ.

В. При изучении новейшей структуры будут анализироваться деформации и смещения элементов рельефа и позднекайнозойских отложений геологическими и геоморфологическими методами, определяться тип вулканических образований и их структурное положение.

С. Для изучения истории формирования новейшей структуры будут изучены разрезы новейших впадин, будет выполняться отбор и определение палеомагнитных образцов и найденного палеонтологического материала, сопоставление разрезов впадин между собой и с данными структурно-геоморфологического анализа. Современная геодинамическая обстановка будет определена путем анализа условий образования активных разломов и других позднечетвертичных структурных форм и их пространственных соотношений. Сопоставление проявлений активной тектоники с более ранними структурными образованиями позволит выявить развитие геодинамической обстановки в течение кайнозоя.

Д. Сильные землетрясения региона связаны с линейными (плоскими в 3D системе) структурными элементами, которые чаще всего выражены активными разломами. Оценка их сейсмического потенциала (прежде всего, возможной максимальной магнитуды землетрясений  $M_{max}$ ) будет производиться, исходя из статистических соотношений магнитуды и длины возникшего при землетрясении сейморазрыва на земной поверхности. Поскольку протяженные активные разломы и зоны разломов активизируются при землетрясениях отдельными сегментами, такие разломы и зоны разломов будут сегментированы. Принимается, что магнитуда, рассчитываемая по длине непротяженного разлома без признаков сегментации или сегмента протяженного разлома, соответствует их  $M_{max}$ . Соответствующий расчет  $M_{max}$  будет выполнен для активных разломов региона исследований, как изученных в ходе реализации проекта, так и известных по достаточно полным литературным описаниям. Для определения  $M_{max}$  будут выполняться следующие последовательные операции:

1) Сегментация протяженных зон активных разломов по следующим признакам:

- выражение разлома или зоны разломов на земной поверхности в виде отрезков, нередко расположенных эшелонированно друг относительно друга;

- изменение структурного положения зоны разлома (например, переход из пород основания в осадочный чехол);

- изменение строения зоны (разделение единого разлома на несколько ветвей; соединение разлома или зоны разломов с оперяющим или сопряженным разломом);

- резкое изменение простираения разлома (зоны разломов);

- изменение кинематических параметров (например, смена сдвигового смещения надвиговым; изменение вертикальной компоненты смещений);

- существенное изменение плотности гипоцентров землетрясений и количества выделенной сейсмической энергии в разных частях разлома (зоны разлома).

2) Коррекция расчетной длины разломов (сегментов), исходя из достоверности их выделения как активных разломов (для предположительно активных разломов расчетная длина уменьшается).

3) Расчет  $M_{max}$  по расчетной длине сегмента. Если в зоне разлома выявлено историческое землетрясение или палеоземлетрясение с подвижкой, превышающей допустимую при рассчитанной  $M_{max}$ , последняя повышается.

Для изучения указанных объектов выбраны следующие районы. (1) Район от г. Ардебилля на юг до с. Ахадсарад (восточнее г. Мияне), где сочленяются структуры Эльбурса и восточного фланга Талышского малого синтаксиса; вулканический центр Сабалан западнее г. Ардебиль. (2) Северный фланг Талышской дуги в зоне ее сочленения с Нижнекуруинской впадиной. (3) Район г. Тебриз: Тебризский разлом; впадина, заполненная новейшими отложениями, к северу от разлома и

вулкан Сахенд к югу от него; сопряжение Тебризского разлома с разломами Хойской офиолитовой зоны; ее южное продолжение западнее оз. Урмия. (4) Пересечение Загросского складчато-надвигового пояса западнее г. Керманшах.

### **Ожидаемые результаты научного исследования**

Общим результатом проведенных исследований станет выяснение структурных соотношений между горными складчато-надвиговыми поясами Загроса, Эльбурса и Малого Кавказа на разных временных интервалах – для позднего кайнозоя, начиная с конца олигоцена, для четвертичного периода и для позднего плейстоцена – голоцена. Этот общий результат складывается из решения следующих частных задач. (1) Выяснение соотношений между позднекайнозойским складчато-надвиговым поясом Загроса и структурным продолжением Малого Кавказа на западном побережье оз. Урмия и в районе г. Хой. (2) Определение структурного положения и происхождения Талышского малого синтаксиса. (3) Выяснение структурных соотношений между Талышским синтаксисом и Западным Эльбурсом в районе г. Ардебиль. (4) Определение сходства и различий строения и состава вулканических образований эоцена и позднего кайнозоя, структурного положения крупных четвертичных вулканов Сабалан и Сахенд. (5) Определение кинематических параметров крупных активных разломов; геодинамическая интерпретация структурного рисунка активных разломов региона и их соотношений с разломами соседних регионов; оценка возможных максимальных магнитуд землетрясений  $M_{max}$  в зонах крупных разломов как сейсмогенерирующих зонах.

Выяснение структурных соотношений между горными складчато-надвиговыми поясами Загроса, Эльбурса и Малого Кавказа в области их тройного сочленения имеет важное теоретическое значение для понимания тектоники, геодинамики и происхождения складчато-надвиговых поясов позднего кайнозоя и геологического прошлого. Расшифровка позднекайнозойской структуры и эволюции области сочленения горно-складчатых поясов Эльбурса и Талыша важна для выяснения истории и геодинамических условий формирования впадины Южного Каспия. Параметризация активных разломов региона с определением возможной  $M_{max}$  крупных разломов имеет практическое значение для оценки сейсмической опасности региона и совершенствования методики подобных оценок в других регионах, в частности, на юге России.

### **Детальный план научных исследований:**

Первый год. Предварительный анализ дистанционных материалов, геологических и топографических данных. Совместное с иранскими участниками проекта полевое изучение активных разломов, позднекайнозойских структур и отложений северного и восточного флангов Талышского малого синтаксиса и вулканического центра Сабалан в его центре западнее г. Ардебиль, а также района от г. Ардебиль на юг до с. Ахадсарад (восточнее г. Мияне), где восточный фланг Талышского синтаксиса сочленяется с горным складчато-надвиговым поясом Эльбурса. Обработка полученных материалов. Оценка роли развития горно-складчатых поясов Эльбурса и Талыша в формировании Южно-Каспийской впадины.

Второй год. Совместное с иранскими участниками проекта полевое изучение активных разломов, позднекайнозойских структур и отложений района г. Тебриз и оз. Урмия, а именно, зоны Северо-Тебризского разлома и связанных с ним активных нарушений; новейшей впадины на северном крыле разлома; вулкана Сахенд к югу от него; соотношений Северо-Тебризского разлома с разломами Хойской офиолитовой зоны, где произошло землетрясение 23.02.2020 с магнитудой 6, и продолжения этой зоны на юг вдоль западного берега оз. Урмия. Обработка полученных материалов.

Третий год. Совместное с иранскими участниками проекта полевое изучение активных разломов, позднекайнозойских складчато-надвиговых деформаций и отложений Северного Загроса вдоль пересечения к западу от г. Керманшах. Обработка полученных материалов. Оценка

Мтах главных сейсмогенерирующих зон региона исследований. Завершение подготовки публикаций по проекту.

Указанные работы распределяются между участниками проекта следующим образом:

Трифонов В.Г. – руководство работами российских участников проекта и их координация с работами иранских участников. Участие в подготовке, проведении и обработке данных полевых исследований и общей интерпретации полученных результатов.

Гайдалёнок О.В. – участие в изучении активных разломов, геологического выражения позднекайнозойских деформаций и их тектонической интерпретации, сборе и обработке палеомагнитных образцов.

Гарипова С.Т. – участие в стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, проявлений кайнозойского вулканизма, сбор и обработка образцов вулканических пород, участие в определении их состава и интерпретации происхождения.

Симакова А.Н. – участие в стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, сбор, обработка и интерпретация палинологических материалов.

Соколов С.А. – участие в изучении активных разломов, геоморфологического и геологического выражения позднекайнозойских деформаций, интерпретации структурных соотношений между горными складчато-надвиговыми поясами и тектоническими зонами, выделении и оценке Мтах сейсмогенерирующих зон.

Тесаков А.С. – участие в стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, поиск и сбор фауны, обработка и интерпретация фауны мелких млекопитающих, участие в интерпретации позднекайнозойского развития региона.

Трихунков Я.И. – участие в геоморфологическом изучении позднекайнозойской структуры и стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, сбор палеомагнитных образцов, участие в их обработке и интерпретации магнито-стратиграфических данных и оценке Мтах сейсмогенерирующих зон.

Фролов П.Д. – участие в стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, поиск, сбор, обработка и интерпретация малакофауны.

Шалаева Е.А. – участие в стратиграфическом изучении позднекайнозойских отложений, сборе палеомагнитных образцов, интерпретации магнито-стратиграфических данных и истории развития позднекайнозойской структуры региона.

Осколкова С.В. – организационное обеспечение работ по проекту, участие в обработке полученных материалов.

Взаимодействие и координация российских и зарубежных партнеров:

Все полевые работы проводятся российскими и иранскими участниками Проекта совместно. Целесообразно проводить полевые работы двумя группами, стратиграфической и тектонической, в каждой из которых будут участвовать как российские, так и иранские участники Проекта. Иранская сторона осуществляет техническую подготовку полевых работ. Оплата полевых расходов производится пропорционально по количеству участников с каждой стороны. Российские участники производят эти выплаты за счёт выделенных по гранту командировочных расходов. Стороны обмениваются всеми материалами, полученными в ходе реализации проекта, и проводят их совместную интерпретацию и подготовку данных к печати.

### **Ожидаемые научные результаты за первый год реализации проекта**

1. Описание разломно-складчатой структуры и стратиграфии плиоцен-четвертичных отложений на северном фланге Талышского малого синтаксиса (район Dasht-e Moghan); результаты предварительной обработки собранных образцов для палеонтологического и магнито-стратиграфического анализа.

2. Описание активных разломов, позднекайнозойской структуры и стратиграфических разрезов области сочленения западной части складчато-надвигового пояса Эльбурса и восточного фланга Тальшского малого синтаксиса в районе г. Ардебиль и к югу от него; результаты предварительной обработки собранных образцов для петрохимического, палеонтологического и магнито-стратиграфического анализа.

3. Описание строения и тектонической позиции четвертичного вулкана Сабалан.

### **Обоснование выполнения исследований совместно с зарубежными партнерами**

Выполнение проекта именно с этим зарубежным партнёром целесообразно по нескольким причинам, не считая того, что проведение геологических исследований в Иране возможно только совместно с иранским партнером. Во-первых, со-руководители проекта В.Г. Трифонов и Х. Хессами проводили совместные исследования в Иране и, частности, на юге региона исследования и в соседнем регионе Эльбурса и его юго-западных предгорий с 1995 г. вплоть до 2018 г., когда к ним присоединились другие участники проекта. Эти работы дали оригинальные новые результаты и завершились совместными публикациями в журналах “Tectonophysics” (Vachmanov et al., 2004) и «Геотектоника» (Трифонов и др., 2020). Во-вторых, Х. Хессами имеет опыт изучения активных разломов в регионе исследований (Solaamani Azad et al., 2015, 2019; и др.), что поможет в проведении полевых работ. В-третьих, Х. Хессами представляет Международный институт сейсмологии и сейсмостойкого строительства в Тегеране, который обладает большим опытом международного сотрудничества и солидной аналитической и технической базой, способной обеспечить проведение совместных полевых работ и обработку части полученных материалов.

### **Имеющийся научный задел по проекту:**

Имеющийся у российских участников научный задел по проекту заключается в полученных ранее результатах по происхождению новейших коллизионных орогенов Альпийско-Гималайского коллизионного пояса и их горного рельефа; в разработке методики датирования плиоцен-четвертичных отложений и методических подходов к оценке относительного вклада проявлений коллизионного сжатия и глубинных преобразований вещества в горообразование; в разработке подходов к оценке сейсмического потенциала активных разломов. Исследованы стратиграфия плиоцен-четвертичных отложений, новейшая структура и история её формирования в соседних районах Альпийско-Гималайского пояса и его южного обрамления: в Сирии (Rukieh et al., 2005; Trifonov et al., 2012, 2014; Неотектоника..., 2012), Восточной Турции (Trifonov et al., 2018, 2020), СЗ Армении (Trifonov et al., 2016), Загросе (Бачманов, 2001; Vachmanov et al., 2004), впадинах Южного и Среднего Каспия с их обрамлениями (Иванова, Трифонов, 2002). В ходе этих исследований разработан оптимальный комплекс методов датирования плиоцен-четвертичных континентальных отложений. Он включает в себя литолого-петрографическую корреляцию отложений и геоморфологическую корреляцию уровней рельефа, определение остаточной намагниченности пород, фаунистических остатков разного типа и археологических находок, спорово-пыльцевой анализ и радиоизотопное датирование. Каждый из этих методов не нов, но их совместное использование приводит к новым, существенно более точным результатам. Особо следует отметить разработанную российскими участниками проекта технологию отбора палеомагнитных проб рыхлых отложений, широко распространённых в плиоцен-квартере.

Установлено резкое усиление горообразовательных вертикальных движений в плиоцен-квартере; показана связь усиления с тем, что в эту эпоху коллизионное сжатие, действовавшее на ранней стадии горообразования в олигоцене и миоцене, дополнилось разуплотнением литосферы под воздействием подлитосферных мантийных течений и их воздействий на литосферу (Трифонов и др., 2008, 2012, 2; Trifonov, Sokolov, 2014; Трифонов, 2016; Трифонов, Соколов, 2017, 2018).

Разработаны новые аспекты методики выделения и параметризации активных разломов и применения данных о них для картирования и оценки сейсмического потенциала ( $M_{max}$  и повторяемость сильных сейсмических событий) зон возникновения очагов землетрясений

(Трифонов, 1983, 1985; Shebalin et al., 2000; Trifonov, 2000; Трифонов, Кожурин, 2010; Неотектоника..., 2012; Trifonov et al., 2015). Выявлены и параметризованы активные разломы в тектонических провинциях и зонах, соседних с районом исследований: в Загросе и юго-западных подножьях Эльбурса (Trifonov et al., 1996; Bachmanov et al., 2004), в соседних частях Армении и Восточной Турции (Trifonov et al., 1993; Karakhanian et al., 2002, 2004). Обобщены данные об активных разломах центральной части Альпийско-Гималайского пояса, включая Иран (Трифонов и др., 2002). Результаты обобщения представлены в Базе данных об активных разломах, доступной для пользователей на сайте Геологического института РАН <http://ginras.ru/> в разделе лаборатории неотектоники и современной геодинамики <http://neotec.ginras.ru/> на странице <http://neotec.ginras.ru/database.html>, где База данных снабжена Объяснительной запиской и списком использованной литературы.

Научный задел, имеющийся у иранских участников проекта, основан на результатах, полученных ими ранее при изучении Северо-Западного Ирана, включая Иранский Азербайджан, Талыш и Западный Эльбурс (Solaaymani et al., 2019), Загроса (Hessami et al., 2001a,b; Koyi et al., 1999) и Эльбурса (Koyi et al., 2016; Hessami, 2015).

Результаты, полученные при изучении Северо-Западного Ирана, демонстрируют интересный контекст активной тектоники, характеризующийся синхронным развитием почти параллельных левых и правых сейсмогенных сдвигов запад-северо-западного простирания в Западном и Центральном Эльбурсе (левосдвиговой сейсморазрыв Рудбарского землетрясения) и Иранском Азербайджане (Северо-Тебризский сейсмогенный правый сдвиг). Эти структурные единицы развиваются в рамках единой деформационной системы между относительно жесткими доменами Центрального Ирана и Южного Каспия, расположенными, соответственно к ЮЮЗ и ССВ от неё. Тектоническое взаимодействие этих активных единиц и их влияние на геодинамику Северо-Западного Ирана анализировалось на основе морфо-тектонических и сейсмологических исследований (Solaaymani et al., 2019). Предполагается, что индентерная тектоника играет важную роль в геодинамике региона. В масштабе плитных взаимодействий жесткая Аравийская плита действует как главный индентер, который деформирует менее жесткие коровые домены перед своим фронтом в складчатые пояса (Загроса и Малого Кавказа) и отодвигает другие блоки в стороны. В этой деформационной системе Южно-Каспийский блок действует как упор для более южных и западных зон деформации. Структурные зоны Эльбурса (на востоке) и Иранского Азербайджана – Малого Кавказа (на западе) разделяются Астара-Талышской правосдвиговой транспрессионной зоной север-северо-западного простирания. Анализ морфо-тектонических характеристик и фокальных механизмов, проведенный в центральной части Северо-Западного Ирана, подтвердил правый сдвиг в зоне деформаций север-северо-западного простирания, сочетающийся, согласно фокальным механизмам, со взбросами, наклоненными на запад. Для объяснения наблюдаемого структурного рисунка внутри Талыша–Азербайджана и Эльбурса предлагается двух-индентерная геодинамическая модель.

Результаты, полученные иранскими участниками проекта в Эльбурсе, явились итогом работ по четырём отдельным проектам. (1) Первый проект состоял в моделировании на ящике с песком с целью определить роль вращения блоков фундамента и образования сдвигов в структурном рисунке осадочного чехла складчато-надвиговых поясов (Koyi et al., 2016). Результаты моделирования были применены для оценки блокового вращения фундамента Западного Эльбурса и обоснования того, что вращение по часовой стрелке Западного Эльбурса ответственно за левосдвиговое перемещение по его продольным разломам. Показано также, что главной причиной ромбической формы коровых блоков Западного Эльбурса было взаимодействие меридионального укорочения чехла и вращения по часовой стрелке блоков фундамента. (2) Второй проект явился применением сейсмического, магнитометрического и геоэлектрического методов для исследования геометрии и современной активности Северо-Тегеранского разлома (Azadi et al., 2010). (3) В третьем проекте были использованы космические изображения и данные полевых исследований для картирования продольных и поперечных зон активных разломов Эльбурса (Hessami, 2015). Эти новые карта и отчёт содержат очень интересные обнаруженные активные разломы региона, что привело к пересмотру оценки сейсмической опасности для главных городов Каспийского побережья. (4) Одной из первых работ, предпринятой на южном фланге хребта

Эльбурс, было изучение геоморфологии и палеосейсмологии разлома Кахризак на юге Тегерана (De Martini, Hessami et al., 1998). Палеосейсмологические исследования выявили сейсмический потенциал и последние проявления активности этого разлома.

Результаты, полученные в районе Загроса, были итогами двух отдельных проектов. Угловыми несогласиями между толщами была обоснована последовательная миграция фронта деформаций и передового прогиба на юго-запад с конца эоцена (Hessami et al., 2001a). С помощью космических изображений было установлено, что ограниченные разломами блоки фундамента испытали вращение вокруг вертикальной оси как по, так и против часовой стрелки, что привело к сближению Аравии и Центрального Ирана (Hessami et al., 2001b). В результате этих вращений сформировались, соответственно, левые и правые сдвиги вдоль пояса Загроса. Было выполнено также аналоговое моделирование (Koyi et al., 2000), приведшее к выводу, что сильные землетрясения Загроса происходят в фундаменте, тогда как более слабые – в осадочном чехле выше Ормузской соленосной формации.

### **Публикации, наиболее близко относящихся к проекту**

1. Trifonov V.G., Hessami Kh.T., Jamali F.H. West-trending oblique sinistral-reverse fault system in Northern Iran // Tehran: IIEES, 1996. 42 p.

2. Bachmanov D.M., Trifonov V.G., Hessami Kh.T., Kozhurin A.I., Ivanova T.P., Rogozhin E.A., Hademi M.C., Jamali F.H. Active faults in the Zagros and central Iran // Tectonophysics. 2004. Vol. 380. P. 221–241.

3. Трифонов В.Г., Соколов С.Ю., Соколов С.А., Хессами Х. Мезозойско-кайнозойская структура Черноморско-Кавказско-Каспийского региона и ее соотношение со строением верхней мантией // Геотектоника. 2020. № 3 (принята к печати). Английская версия: Trifonov V.G., Sokolov S.Yu., Sokolov S.A., Hessami Kh. Mesozoic-Cenozoic structure of the Black Sea – Caucasus – Caspian region and its relationships with the Upper Mantle structure // Geotectonics. 2020. Vol. 54, No. 3 (in press)