

УДК 550.334

## СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА И ФОКАЛЬНЫЕ МЕХАНИЗМЫ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ОКРЕСТНОСТИ БУШЕРСКОЙ АЭС

© 2018 г. А.А. Лукк, Ю.Л. Ребецкий

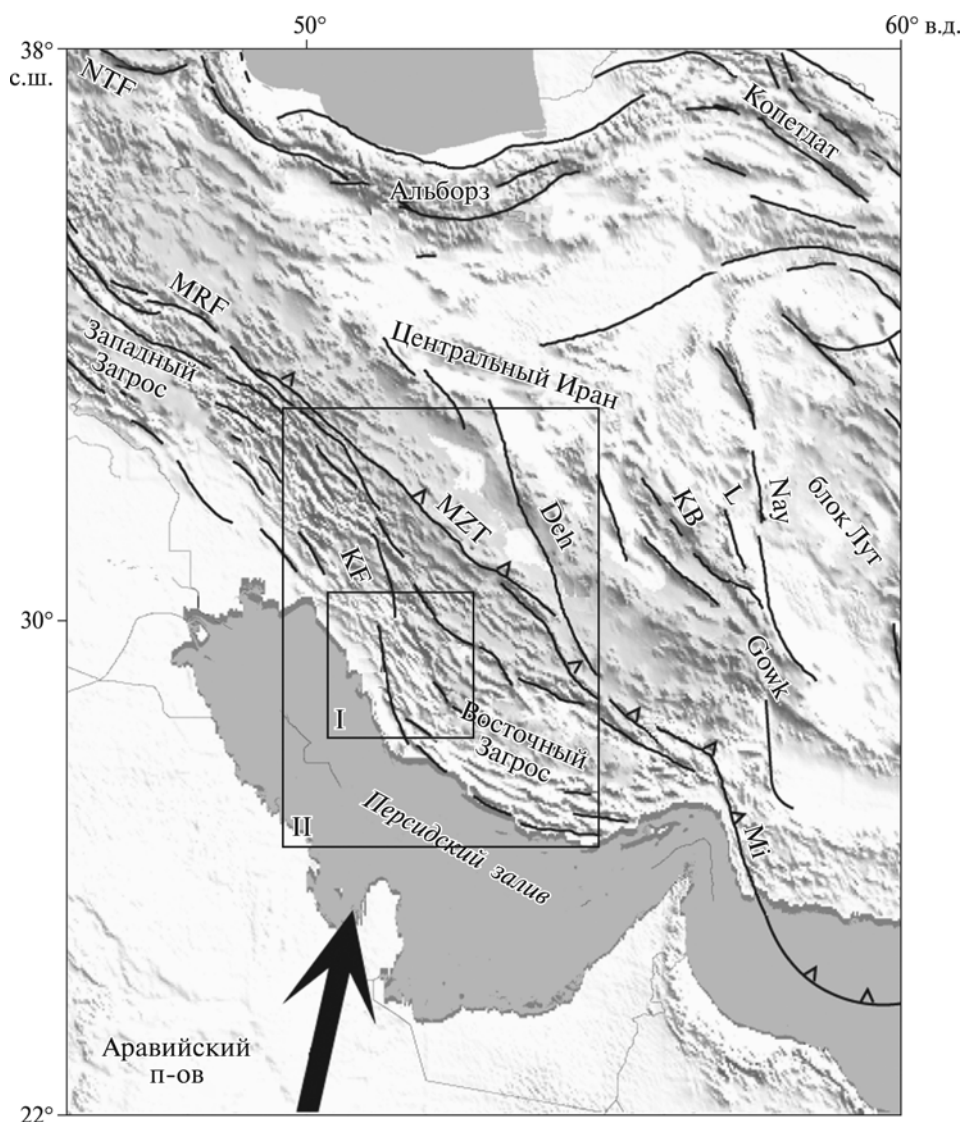
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

Детальные сейсмологические исследования, выполненные сейсмологической экспедицией Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в 1999–2001 гг. в окрестности Бушерской АЭС на территории Южного Ирана, позволили, в частности, разработать методику определения фокальных механизмов землетрясений с использованием направления поляризации *S*-волн при слабых близких сейсмических событиях. Результаты реконструкции таких определений сопоставлены с фокальными механизмами сильных землетрясений, определенных в каталогах ISC по стандартной методике, и с современными представлениями о тектонической деформации земной коры в широкой окрестности исследуемой территории. Установлено, что выполненная реконструкция находится в хорошем соответствии как с типизацией подвижек в очагах сильных землетрясений, так и с современными представлениями о характере деформирования земной коры в пределах сети наблюдений. Это позволяет рекомендовать предложенную методику реконструкции фокальных механизмов к применению и в других регионах.

**Ключевые слова:** тектонические деформации, геодинамика, фокальные механизмы землетрясений, кинематики сеймотектонического деформирования.

### Элементы тектоники и характер деформирования в широкой окрестности Бушерской АЭС

Территория детальных сейсмологических исследований Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН в 1999–2001 гг. в окрестности Бушерской АЭС расположена в пределах складчатой горной страны Загрос на юге Ирана (рис. 1). Складчатонадвиговой пояс Загроса, простирающийся с северо-запада на юго-восток, – результат коллизии Аравийской и Евразийской плит. Он расположен на пассивной в прошлом окраине Аравийской плиты, которая подверглась во время мезозоя–кайнозоя коллизии по шовной зоне между плитами, маркируемой в настоящее время на северо-западе правосторонним сдвигом – Главным современным разломом (MRF на рис. 1) и его продолжением на юго-востоке – Главным Загросским надвигом (MZT на рис. 1).

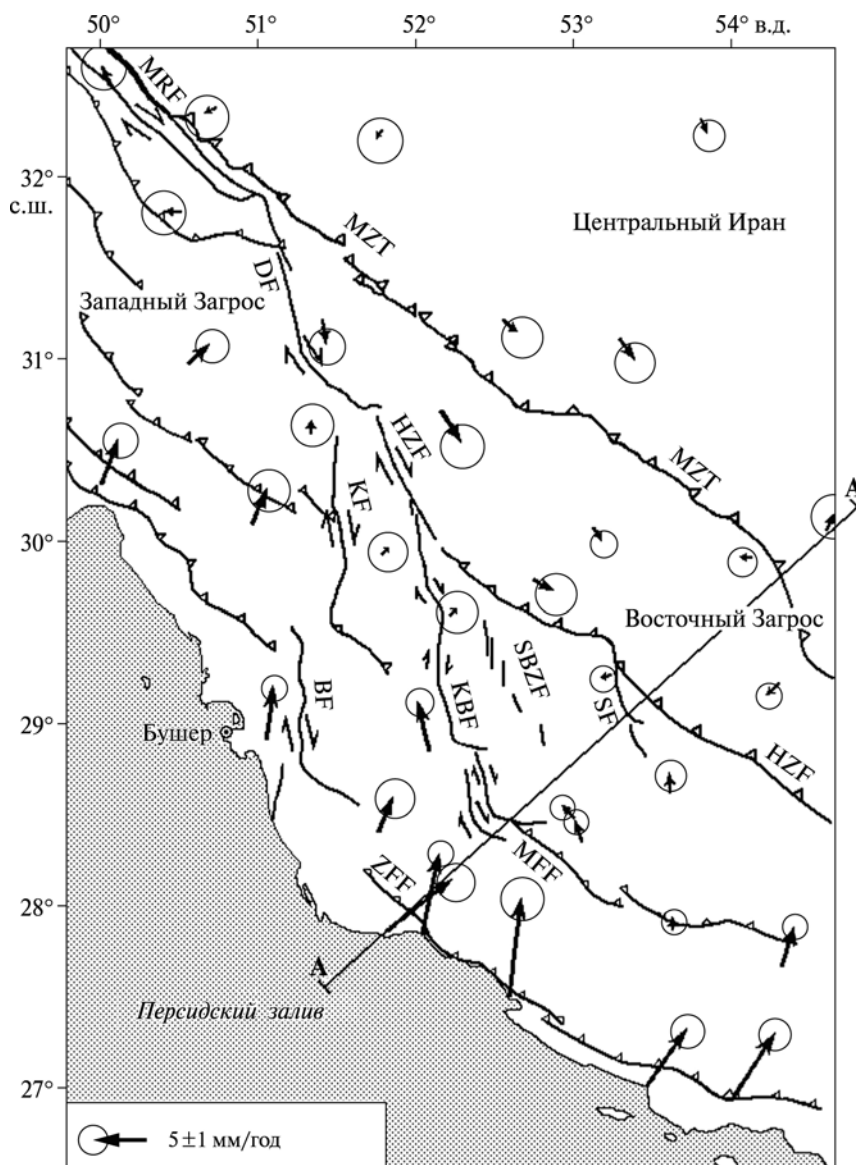


**Рис. 1.** Фрагмент упрощенной тектонической карты Ирана (по [Vernant *et al.*, 2004] с изм.)

Аббревиатуры: MRF – Main Recent Fault; NTF – North Tabris Fault; MZT – Main Zagros Thrust; KF – Kazerun Fault; Deh – Dehshir Fault; KB – Kuh Banan Fault; Nay – Nayband Fault; L – Lakarkuh Fault; Gowk – Gowk Fault; Mi – Minab Zendan Palami fault zone. Названия на русском языке см. в тексте. I – область детальных сейсмологических исследований в районе расположения Бушерской АЭС; II – широкая окрестность оценки вида напряженно-деформированного состояния в районе расположения Бушерской АЭС (см. рис. 2). Стрелка показывает направление перемещения Аравийской плиты относительно Евразии согласно модели NUVEL-1A [DeMets *et al.*, 1990]

После закрытия океанического бассейна Загрос в течение неогена испытал второй эпизод деформации, который привел к образованию горной страны Высокий Загрос, расположенной между Главным Загросским надвигом и разломом Высокого Загроса (HZF на рис. 2). Это сопровождалось интенсивной складчатостью, что привело к образованию Простого складчатого пояса (SFB на рис. 2), расположенного между разломом HZF и побережьем Персидского залива [Falcon, 1974; Berberian, King, 1981].

Согласно модели тектонических плит Нувель-1А [DeMets *et al.*, 1990], основанной на анализе глобального спрединга мирового морского дна, системы разломов и векторов скольжения в очагах землетрясений, Аравийская плита движется в направлении север–северо-восток в окрестности 52° в.д. со скоростью около 31 мм/год по отношению



**Рис. 2.** Современная тектоника и поле скоростей перемещений GPS-пунктов в Казерунском районе относительно Центрального Ирана (рис. 2 из [Tavakoli et al., 2008] с доп.)

Аббревиатуры: MRF – Main Recent Fault; MZT – Main Zagros Thrust; DF – Dena Fault; KF – Kazerun Fault; BF – Borazjan Fault; KBF – Kareh Bas Fault; SBZF – Sabz Pushan Fault; SF – Sarvestan Fault; HZF – High Zagros Fault; MFF – Main Front Fault; ZFF – Zagros Front Fault. Названия на русском языке см. в тексте. А–А' – геологический профиль через провинцию Фарс (по [Allen et al., 2013]). Неопределенность оценки положения векторов скоростей, показанная соответствующими кружками у концов векторов, составляет  $1\sigma$

к Евразии. Геодезические данные (например, [Kreemer et al., 2003; McClusky et al., 2003]) показывают примерно ту же ориентацию, но со скоростями  $\sim 10$  мм/год и ниже. В процессе этих перемещений земная кора Загроса укорачивается на величину около  $7 \pm 2$  мм/год в направлении север–юг [Vita-Finzi, 1979], близкую к суммарной средней скорости распространения около 10 мм/год фронта деформации Загроса после эоцена [Hessami et al., 2001]. Это проявляется на поверхности в повсеместно развитой системе надвигов и складок, которые образовались примерно в середине–конце эоцена [Vernant et al., 2004].

Простой складчато-надвиговый пояс Загрос состоит из двух различных структур. Более узкий Западный Загрос, ориентированный косо к направлению регионального укорачивания в процессе коллизии литосферных плит, связан с орогенно-параллельными надвиговыми разломами и складчатостью, развивающимися с мезозоя–кайнозоя [Falcon, 1974; Berberian, King, 1981]. Кроме того, эта часть складчато-надвигового пояса подвержена на севере воздействию активного крупного правостороннего сдвигового Главного современного разлома (MRF). Направление конвергенции плит составляет около  $45^\circ$  к простиранию этого разлома. Поэтому величина скорости конвергенции –  $7 \pm 2$  мм/год [Vita-Finzi, 1979; Vernant et al., 2004] – может быть разложена на параллельную разлому и нормальную к нему компоненты величинами  $\sim 5 \pm 1.5$  мм/год каждая.

Существование первой очевидно из наблюдений за геологическими и инструментальными смещениями по разлому MRF. Существование второй обнаружено по решениям фокальных механизмов землетрясений. Так, к юго-западу от разлома MRF сейсмические векторы скольжения в очагах землетрясений в большинстве случаев ориентированы нормально как к простиранию разлома MRF, так и к простиранию геологических структур этой части складчато-надвигового пояса Загрос [Talebian, Jackson, 2004]. Вместе с тем фокальные механизмы вдоль разлома MRF показывают преобладание чистых сдвиговых движений. Все это говорит о том, что ороген-параллельная компонента конвергенции связана в основном с активным сдвиговым перемещением по разлому MRF, а ороген-нормальная составляющая сходимости связана с распределением погружающихся на глубину орогенно-нормальных надвигов в складчато-надвиговом поясе.

Более широкий Восточный Загрос, ориентированный приблизительно перпендикулярно направлению сокращения расстояния между Аравией и Евразией, ограничен на севере шовной зоной между сталкивающимися плитами, маркируемой крупным надвигом MZT, неактивным в настоящее время [Berberian, King, 1981; Jackson, McKenzie, 1984; Tatar et al., 2002]. Надвиг перестал быть активным с началом скольжения вдоль разлома MRF [Authemayou et al., 2006; Tavakoli et al., 2008]. По-видимому, это произошло потому, что и разлом, и надвиг используют один и тот же литосферный разделитель: шовную зону между Аравией и Центральным Ираном. Проскальзывание вдоль этой шовной зоны изменилось от надвига в ее восточной части к сдвигу в западной части в конце миоцена [Tavakoli et al., 2008].

Большую роль в деформации восточной части складчато-надвигового пояса Загрос играют надвиговые разломы HZF, MFF и ZFF. Их простирание совпадает с простиранием пояса (см. рис. 2), который укорачивается поперек них. Территория складчатого пояса, ограниченная крупными надвигами ZFF и HZF, охвачена наибольшими величинами деформации земной поверхности (порядка 5–10 мм/год) согласно данным GPS-наблюдений [Tavakoli et al., 2008] (см. сравнительные величины векторов перемещений GPS-пунктов на рис. 2). Далее к северу, в Высоком Загросе, величины деформации заметно уменьшаются, а еще далее на север, в пределах плато Центрального Ирана, внутренняя деформация оказывается вообще менее 2 мм/год [Vernant et al., 2004; Tavakoli et al., 2008].

Основные различия между северо-западной и юго-восточной частями Загроса заключаются в ориентации главных правосторонних сдвиговых разломов и их соотношениях с молодыми надвигами и складками. В Северо-Западном Загросе правосторонние сдвиговые движения сосредоточены на разломе MRF, в то время как активное надвигообразование и сопутствующая складчатость распространяются на юг и юго-запад

от него в прилегающую часть Месопотамского прогиба. В Юго-Восточном Загросе основные сдвиговые разломы сосредоточены в Казерунской зоне, простирающейся с севера на юг косо к основному простиранию Загроса. Все ветви сдвиговых разломов в этой зоне подставляются в их юго-восточных окончаниях простирающимися в близширотном направлении надвигами (см. рис. 2).

Пространственно разделенное равновесное существование поперечного укорачивания и сдвигового смещения в Северо-Западном Загросе предполагает, что взаимодействие Аравийской плиты с Иранским блоком происходит в основном в режиме косой коллизии, в то время как в Юго-Восточном Загросе косое взаимодействие плит уступает место их нормальному столкновению. В таком случае разделение этих частей Загроса простирающейся примерно с севера на юг Казерунской зоной сдвиговых разломов, скорее всего, обусловлено изменением режима долговременной тектоники в процессе коллизии Аравийской и Иранской (как южной составляющей Евразийской плиты) плит.

Согласно современным данным GPS-измерений [Tatar et al., 2002; Vernant et al., 2004; Hessami et al., 2006; Walpersdorf et al., 2006; Tavakoli et al., 2008], геологические структуры по разные стороны от Казерунской разломной зоны «раздавливаются» в процессе коллизии с различной интенсивностью: Западный Загрос со скоростью  $\sim 4 \pm 2$  мм/год в направлении  $12 \pm 8^\circ$  север–северо-запад, а Восточный Загрос с примерно вдвое большей скоростью ( $\sim 9 \pm 2$  мм/год) в направлении  $7 \pm 5^\circ$  север–северо-восток [Hessami et al., 2006; Tavakoli et al., 2008]. Различие в скоростях раздавливания, скорее всего, связано со значительной долей сдвиговой деформации по разлому MRF в Северо-Западном Загросе.

В самой же разделительной зоне между этими двумя структурами Загроса, представленной Казерунской (Казерун-Боразджанской) системой хорошо развитых правосторонних сдвиговых разломов, простирающейся примерно с севера на юг между надвигами HZF и ZFF в полосе между  $51^\circ$  и  $53^\circ$  в.д., сдвиговые деформации составляют от 2 до 5 мм/год (см. рис. 2). В разделительную зону входят простирающиеся в юго-восточном направлении сдвиговые кулисообразные разломы Дена, Казерунский, Боразджанский и Каребасский, имеющие близкую протяженность ( $\sim 100$  км), которые секут и нарушают складки Простого надвиго-складчатого пояса Загроса [Berberian, 1995; Bachmanov et al., 2004; Authemayou et al., 2005; и др.].

Предполагается, что эта система является веерообразным разветвлением в юго-восточном направлении сдвигового разлома MRF [Talebian, Jackson, 2002; Bachmanov et al., 2004; Authemayou et al., 2005, 2006, 2009; и др.]. Она простирается от юго-восточной оконечности MRF до Персидского залива. Геоморфологические данные, сейсмичность и результаты прямых наблюдений перемещений по разлому при проведении тренчинга показывают, что Казерунская зона и связанные с ней правосторонние разрывы скольжения являются активными как в осадочной кровле Загроса, так и в его фундаменте [Baker et al., 1993; Bachmanov et al., 2004]. Все разломы этой зоны, унаследованные от неопротерозойской тектонической фазы, уходят в фундамент [Talbot, Alavi, 1996]. Следует отметить следующую характерную особенность входящих в нее сдвигов: все они как бы запираются на юге сравнительно коротким надвигом юго-восточного или даже близширотного простирания [Authemayou et al., 2005, 2009] (см. рис. 2).

Общие смещения геологических маркеров по Казерунской системе разломов составляют 8–27 км за неоген-четвертичное время (2–3 млн лет) [Authemayou et al., 2006, 2009]. Эти оценки базируются на смещениях топографии и эволюции складок по обе стороны от основного Казерунского разлома (KF). Этот возраст аналогичен таковому

для MRF, подтверждая интерпретацию того, что KF реактивировался как современный разлом в результате образования MRF как сдвиговой деформации в результате коллизии Аравийской и Иранской (как части Евразийской плиты) плит и передачи этого сдвигового перемещения в Казерунскую зону разломов [Talebian, Jackson, 2002; Authemayou et al., 2006, 2009].

Данные GPS-измерений показывают уменьшение скорости скольжения на Казерунской системе разломов в направлении с севера на юг. Так, если эта скорость в зоне непосредственного контакта этой системы со сдвиговым разломом MRF составляет по разным оценкам от 3.5 до 12.5 мм/год, то на северном сегменте системы скорость скольжения уменьшается до 2.5–4.0 мм/год, в срединной части Казерунского разлома принимает значения 1.5–3.5 мм/год и становится совсем незначительной на его южном сегменте [Authemayou et al., 2005, 2006, 2009; Tavakoli et al., 2008]. При этом на юге возрастает роль надвигообразования на запирающих с юга различные ветви сдвиговой системы широко простирающихся надвигов. Такая кинематика разломов предполагает, что горизонтальная скорость скольжения вдоль Казерунской системы сдвиговых разломов уменьшается на юге из-за передачи коллизионного перемещения из проскальзывания в надвигообразование.

Окончательное приобретение сдвигового перемещения в складчато-надвиговом поясе Загроса путем передачи скольжения из разломов MRF в KF рассматривается как эффект региональной реорганизации Аравийско-Евразиатской коллизии, которая имела место  $5 \pm 2$  млн л.н. согласно [Allen et al., 2004]. Эта региональная реорганизация может быть связана с разрывом Аравийской литосферной плиты вдоль Казерунской разломной зоны [Molinari et al., 2005; Authemayou et al., 2006, 2009].

Тем самым рядом исследователей предполагается, что Казерунская система разломов играет существенную роль в трансформации коллизионных перемещений. Вдоль нее, по-видимому, происходит раскалывание Аравийской плиты и ее разворот против часовой стрелки с возрастанием темпа сдвиговых перемещений по мере перехода от южного ограничения Казерунской системы разломов к разлому MRF [Talebian, Jackson, 2002, 2004; Authemayou et al., 2005, 2009; Hessami, Jamali, 2006]. На возможность подобного разворота могут указывать наблюдаемые изменения направления и величины векторов скорости GPS перемещений поперек разломов Казеруна и Каребаса, связанные с расширением в их окрестности горных пород до 4 мм/год по простиранию пояса Загрос [Hessami et al., 2006].

Тектонический режим транспрессии (сдвиг-сжатие), обусловленный коллизией Аравийской и Иранской плит, регулирует активность всех сдвиговых разломов в Иране [Hessami, Jamali, 2006]. Кроме того, он передает эту активность через сдвиговое перемещение по разлому MRF далее на северо-запад в правосторонний сдвиговый разлом NAF, по которому происходит перемещение Анатолийской плиты в Эллинскую зону коллизии [Authemayou et al., 2009].

### **Характер деформирования верхнего этажа земной коры вдоль геологического профиля через складчато-надвиговый пояс Загрос**

Существуют две точки зрения на характер деформирования верхнего этажа земной коры складчато-надвигового пояса Загрос в результате сближения литосферных плит. Одна из них предполагает, что верхние покровные слои осадочных пород земной коры Загроса общей мощностью порядка 10 км деформируются самостоятельно над кровлей солегипсовой формации Хормуз, широко представленной в этом регионе

(см., например, [Ford, 2004; McQuarrie, 2004]). Вторая, основанная на интерпретации совместных геологических и сейсмических данных о структуре фундамента, предполагает, что фундамент земной коры Загроса также должен участвовать в этой деформации (см., например, [Mouthereau et al., 2007, 2011, 2012; Allen et al., 2013]). Нам ближе вторая точка зрения, и мы продемонстрируем это на примере анализа рассмотренного в [Allen et al., 2013] геологического профиля через провинцию Фарс в юго-восточной части Ирана.

Юго-западная оконечность профиля (т. А, см. рис. 2) располагается в Персидском заливе на расстоянии примерно 45 км от береговой линии и на расстоянии около 70 км от Загросского фронтального разлома (ZFF на рис. 2), определяющего юго-западную оконечность складчато-надвигового пояса Загрос. Эта региональная южная оконечность Загроса представляет собой отчетливый топографический фронт обнажений меловых известняков олигоцен-миоценового возраста, называемый Горным фронтом [McQuillan, 1991]. Он был истолкован как обозначение положения крупного, хотя и сегментированного, осевого фронта, который проходит вдоль большей части Загроса, и получил название Загросского фронтального разлома (ZFF). На современную активность этого разлома указывает достаточно высокий уровень сейсмичности в его ближайшей окрестности [Berberian, 1995].

Противоположная, северо-восточная, окраина складчато-надвигового пояса Загрос представлена разломом Высокого Загроса (HZF на рис. 2). Он маркируется выходами на поверхность меловых известняков бангестанской группы. К северо-востоку от него раннетретичные слои обрываются и на поверхности обнаруживаются перекрывающие их обнажения органогенных кремнистых обломочных пород триас-мелового возраста (см. радиоларитовая группа, рис. 3). Разлом Высокого Загроса в этой области интерпретируется как пологий надвиг под основанием покрова, содержащего радиоларитовую группу, уходящий в фундамент [Authemayou et al., 2006] и надвигающийся на юго-запад. Сейсмическая активность этого разлома невысока.

Между этими двумя разломами и расположен складчато-надвиговой пояс Загрос. Верхние ~10 км земной коры пояса, сложенные осадочными отложениями от раннекембрийского до миоценового возраста, представлены в поверхностных обнажениях мезозойско-кайнозойской смешанной карбонатно-кластической последовательностью [McQuillan, 1991]. Эти осадки содержат на разных глубинах слои эвапоритов, которые отделяют поверхностную деформацию пояса от фундамента [Barbarian, 1995].

По профилю AA' этот осадочный слой представлен подстилающими друг друга складками, слегка опрокинутыми в юго-западном направлении. Эти складки – результат пододвигания Аравийской плиты под Иранскую плиту (как часть Евразийской плиты). Заметные вдоль левых бортов складок мелкие надвиги (см. рис. 3) следует считать, на наш взгляд, поддвигами осадочного материала в северо-восточном направлении в процессе этой континентальной коллизии. Общая величина укорочения поперечных размеров складчатого-надвигового пояса в провинции Фарс на этом профиле составляет, согласно [Mouthereau et al., 2007, 2011, 2012; Allen et al., 2013], 65–78 км за последние 5–10 млн лет.

В ядрах антиклиналей складок обнажаются меловые известняки. Расстояние между ядрами складок в среднем около 15 км. Характер складчатости на больших глубинах остается неясным, поскольку на глубинах около 10 км складчатый пояс подстилается 1–2-километровым слоем эвапоритовых (солегипсовых) пород формации Хормуз (Hormuz), вдоль которого, по данным некоторых авторов (например, [Ford, 2004; McQuarrie, 2004]), происходит срыв складчатой кровли относительно основания.

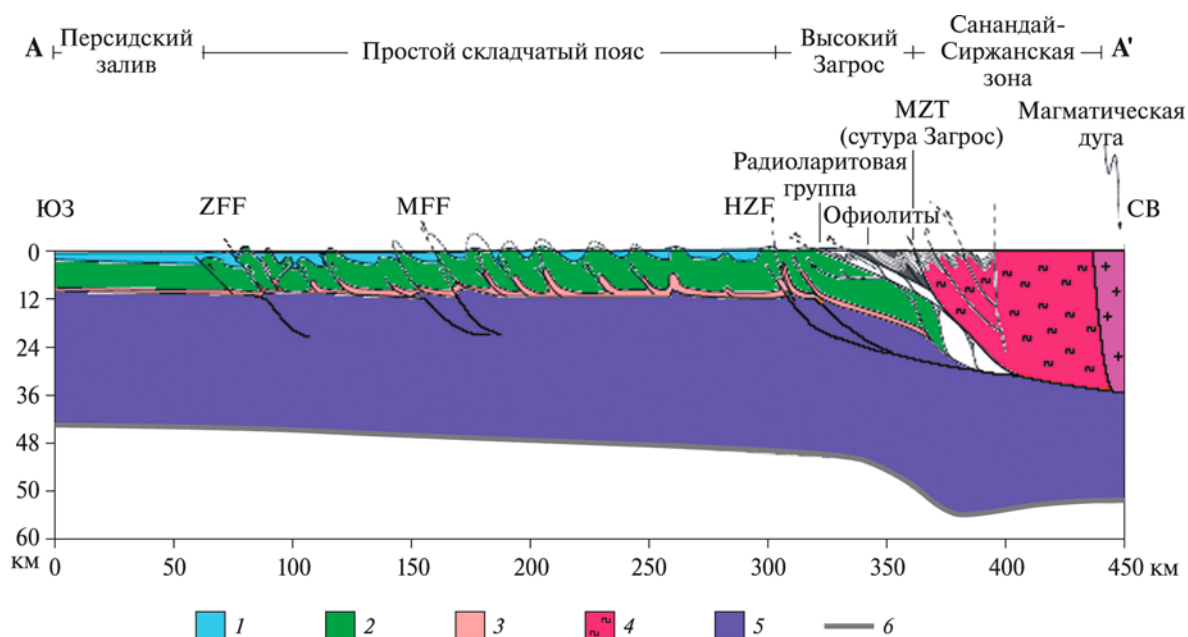


Рис. 3. Геологический разрез через провинцию Фарс (фрагмент рис. 4 из [Allen et al., 2013] с доп.)

1 – четвертичные породы; 2 – миоценовые отложения; 3 – хормузская серия эвапоритов; 4 – метаморфический фундамент Санандай-Сиржанской зоны (Евразия); 5 – метаморфический фундамент Аравийской плиты; 6 – граница Мохоровичича. Положение разреза А–А' см. на рис. 2. Масштаб по вертикали вдвое крупнее, чем по горизонтали. Обозначения разломов см. на рис. 1, 2

Но существование серии разломов, проникающих на большие глубины в фундамент (см. рис. 3), скорее, противоречит этому предположению. Так, например, считается определенно установленным, что северное ограничение складчатого пояса в виде разлома HZF проникает на большие глубины вплоть до низов коры (см. рис. 3). В пределах самого складчато-надвигового пояса Загрос, примерно в 140 км южнее разлома HZF, выделяется сейсмогенный разлом MFF, уходящий на глубину 20 км и более. Он считается одним из самых серьезных сейсмогенных надвигов (поддвигов) в фундаменте Загроса [Berberian, 1995; Hessami et al., 2006]

Его след на поверхности примерно совпадает с региональным топографическим контуром 1250 м, служащим северо-восточным ограничением распространения активной сейсмичности в пределах складчатого пояса Загрос [Allen et al., 2013]. И на самом разломе отмечено присутствие целого ряда очагов землетрясений достаточно большой, вплоть до  $M \approx 6$ , силы. В силу этого предполагается, что охваченная значительными по величине неупругими деформациями область складчатого пояса простирается на глубину проникновения этого разлома – т.е. до ~20 км [Adams et al., 2009; Nissen et al., 2011; Allen et al., 2013].

Сейсмически активной является и средняя часть Казерун-Боразджанской сдвиговой зоны. В ее пределах известны сильные (вплоть до 8 баллов) землетрясения в доинструментальный период и палеосейсмические события в голоцене–палеогене [Berberian, 1994, 1995; Berberian, Geats, 1999]. Максимальные глубины очагов землетрясений в этой зоне, по данным детальных высокоточных наблюдений в окрестности Бушерской АЭС, составляют 23 км [Ребецкий и др., 2017].

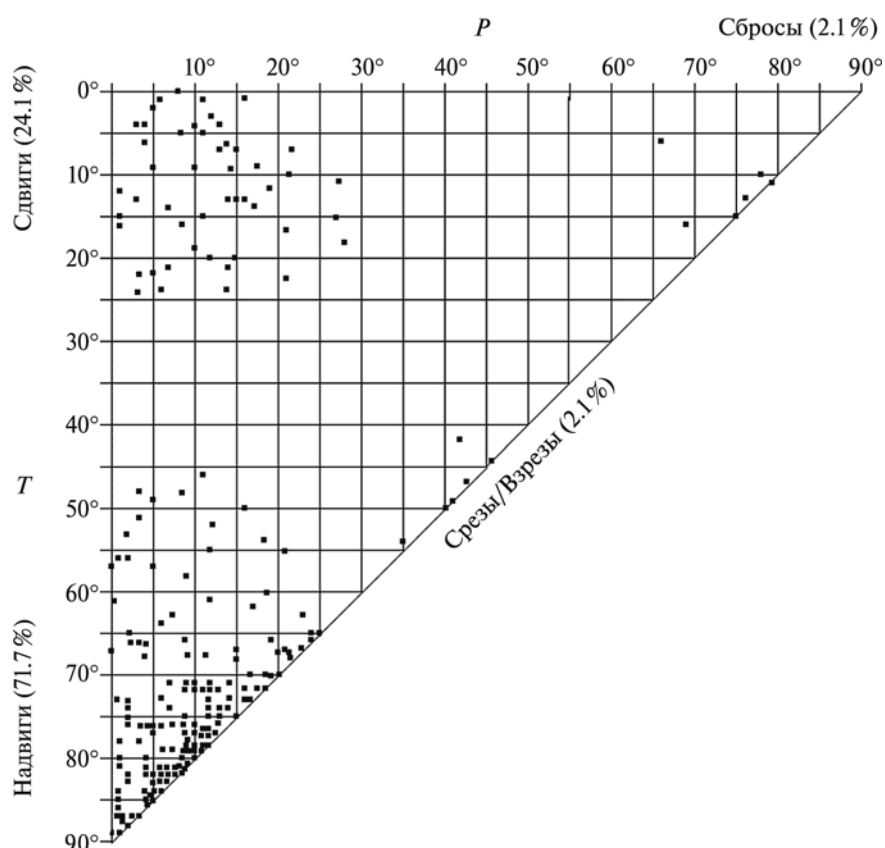


### Оценка напряженно-деформированного состояния исследуемой территории по литературным данным

Современная активность Казерунской системы разломов (KFS на рис. 2) подтверждается данными о происходивших здесь исторических и инструментальных землетрясениях. Очаги этих землетрясений расположены на разных участках KFS (особенно на разломах Казерун и Каребас) и ассоциируются преимущественно с правосторонними сдвиговыми фокальными механизмами [Berberian, 1995; Talebian, Jackson, 2004], что хорошо согласуется с правосторонней сдвиговой тектоникой в пределах этой системы (см. рис. 2).

В то же время, согласно сейсмологическим данным каталога Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>), можно утверждать, что остальная часть Загроса (в пределах рассматриваемой нами территории) характеризуется преимущественно механизмами очагов надвигового типа, что хорошо согласуется с тектоническими движениями по разломам в виде надвигов (поддвигов) в пределах западной (провинция Дез-фул) и восточной (провинция Фарс) частей Загроса (см. рис. 2).

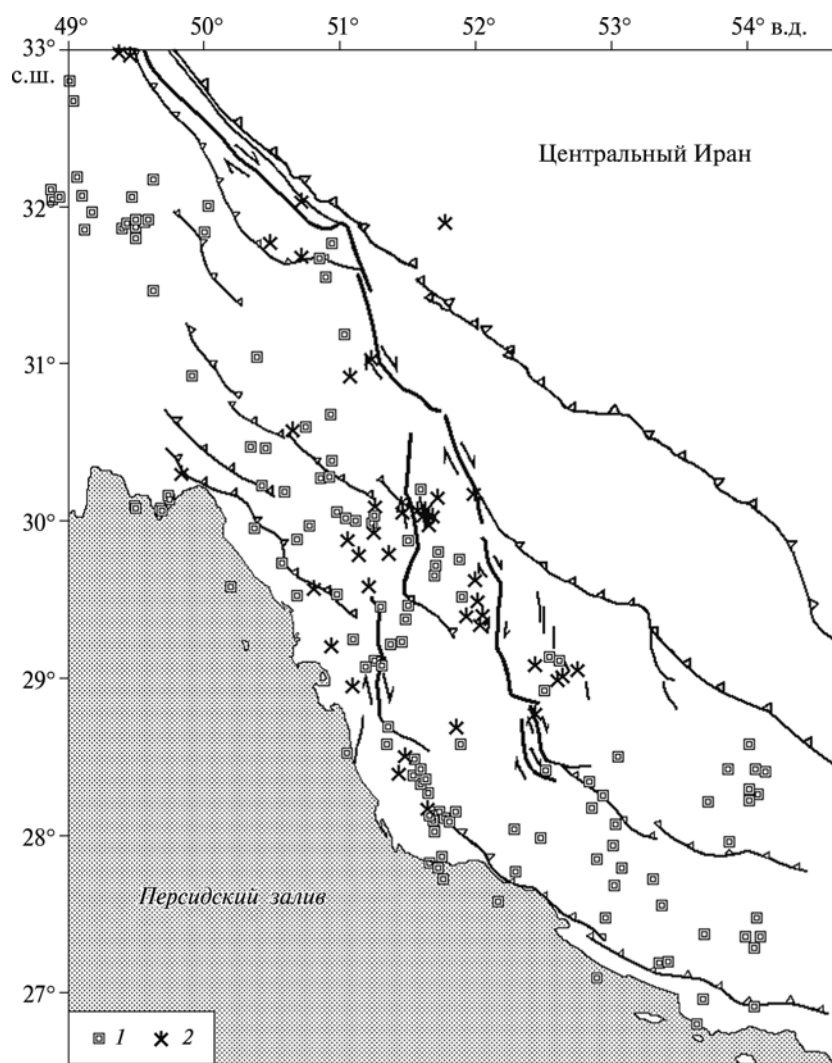
На рис. 4 приведено распределение типов фокальных механизмов землетрясений с  $M = 4.5-6.5$  за 1977–2015 гг. по данным каталога Global CMT Project в пределах широкой окрестности Бушерской АЭС (область II на рис. 1) в следующей системе координат: угол



**Рис. 4.** Распределение по углам наклона с горизонтом главных осей  $P$  и  $T$  фокальных механизмов землетрясений с  $M = 4.5-6.5$  за 1977–2015 гг. согласно каталогу Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>) в пределах широкой окрестности исследований в районе расположения Бушерской АЭС (область II на рис. 1). Общее число событий – 191

наклона с горизонтом главной оси сжатия  $P$  по оси  $X$  и угол наклона с горизонтом главной оси растяжения  $T$  по оси  $Y$ . Как следует из представленных на рис. 4 данных, наблюдается четкая кластеризация фокальных механизмов по следующим типам: надвиги, сдвиги, сбросы и срезы/взрезы. При этом отсутствуют механизмы промежуточных типов: надвиго-сдвиги и сбросо-сдвиги. При общем числе событий 191 количество механизмов разных типов следующее: около 72 % – надвиги; 24 % – сдвиги; 2 % – сбросы и 2 % – срезы/взрезы. Явное преобладание надвигов свидетельствует в пользу надвиговой тектоники в Загросе, что мы и продемонстрировали выше при описании тектонической ситуации в этом регионе. Пространственное распределение эпицентров землетрясений с преобладающими типами фокальных механизмов (надвигов и сдвигов) приведено на рис. 5.

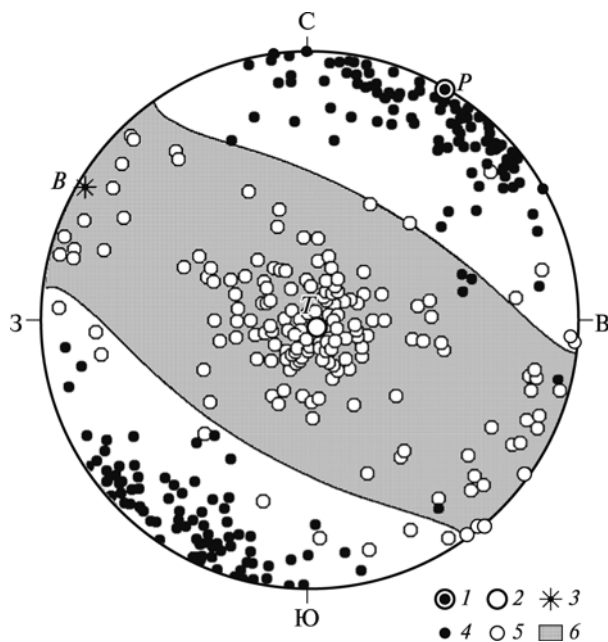
Как видно из представленных на рис. 5 данных, сдвиги концентрируются в пределах Казерунской зоны тектонических сдвигов, разделяющей Западный и Восточный Загрос.



**Рис. 5.** Пространственное распределение эпицентров землетрясений с надвиговым и сдвиговым типами механизмов в исследуемом регионе за 1977–2015 гг. согласно данным каталога Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>)

Тектоническая основа приведена в соответствии с рис. 2. 1 – надвиги; 2 – сдвиги

Надвиги же распределены примерно равномерно в пределах всего Загроса, что лишний раз подтверждает, что горная страна Загрос «раздавливается» и соответственно укорачивается в процессе сближения Аравийской плиты и жесткого блока Центрального Ирана. Об этом же свидетельствует вид среднего механизма, построенного по полной совокупности всех фокальных механизмов землетрясений Загроса за указанный период времени с использованием методики С.Л. Юнги [1979, 1990]. Графический вид этого решения представлен на рис. 6, а его расчетные параметры приведены в верхней части таблицы.



**Рис. 6.** Графическое решение для среднего механизма очагов землетрясений Загроса (Иран), построенного по полной совокупности индивидуальных фокальных механизмов за 1977–2015 гг. по данным каталога Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>)

1 – положение оси главного напряжения сжатия  $P$  на нижней фокальной полусфере; 2 – положение главной оси растяжения  $T$ ; 3 – положение оси промежуточного напряжения  $B$ ; 4 – положение на нижней полусфере главных осей сжатия индивидуальных фокальных механизмов; 5 – положение главных осей растяжения индивидуальных фокальных механизмов; 6 – область растяжения

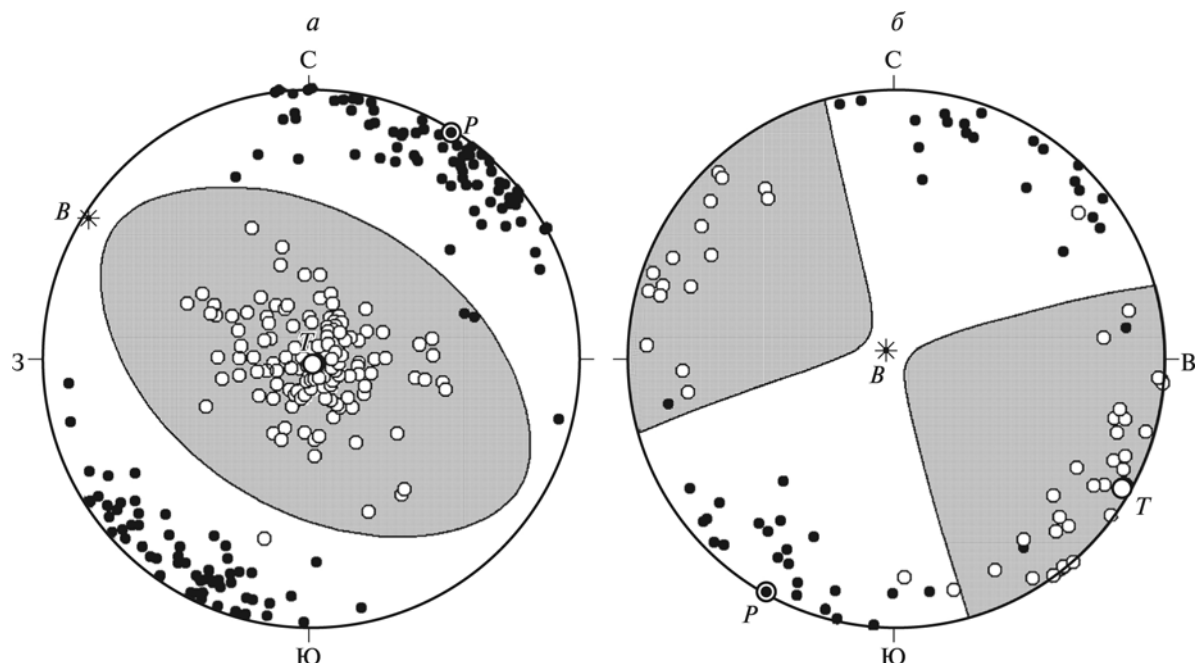
Решение определяется достаточно надежно, что хорошо видно из четкого разделения точек выхода индивидуальных осей главных напряжений сжатия и растяжения на поверхности фокальной сферы. Об этом же свидетельствует относительно высокое значение коэффициента  $k$  (0.69), указывающее на высокую степень соответствия индивидуальных фокальных механизмов полученному по ним среднему решению. Согласно данным рис. 6 и таблицы, в земной коре Загроса преобладает близгоризонтальное сжатие с большой составляющей надвиговой компоненты ( $\mu_M = +0.308$ ), поскольку главная ось растяжения  $T$  ориентирована практически вертикально при горизонтальном положении главной оси сжатия  $P$ .

Оценка типов среднего механизма, проведенная отдельно по надвиговым и сдвиговым сеймотектоническим дислокациям (такое разделение осуществлялось согласно рис. 3), приведена в графическом виде на рис. 7 и в численных значениях в таблице. Оба решения оказались крайне устойчивыми, о чем свидетельствует как четкое разделение на фокальной сфере точек выхода индивидуальных осей главных напряжений сжатия и растяжения, так и высокие значения коэффициента  $k$  (0.81 и 0.67 соответственно). Последнее указывает на высокую степень соответствия индивидуальных фокальных механизмов полученным по ним средним решениям. Следует также отметить высокую устойчивость определения азимута главной оси сжатия  $P$  ( $29\text{--}32^\circ$ ) вне зависимости от типа индивидуальных фокальных механизмов в рассмотренных трех выборках. Обращает на себя внимание, что этот азимут несколько отличается от направления векторов смещения ( $7\text{--}12^\circ$ ) геодезических GPS-пунктов, приведенных на рис. 2.

Основные параметры расчетного тензора среднего фокального механизма землетрясений Загроса (Иран)

| $N$                 | Ориентация главных осей тензора среднего механизма, град. |      |        |      |        |      | $\mu_m$ | $k$  |
|---------------------|---|------|--------|------|--------|------|---------|------|
| Все типы механизмов |   |      |        |      |        |      |         |      |
| 214                 | $P$   |      | $T$    |      | $B$    |      | +0.308  | 0.69 |
|                     | Азимут  | Угол | Азимут | Угол | Азимут | Угол |         |      |
|                     | 031   | 01   | 135    | 87   | 301    | 03   |         |      |
| Надвиги             |   |      |        |      |        |      |         |      |
| 136                 | $P$   |      | $T$    |      | $B$    |      | -0.061  | 0.81 |
|                     | Азимут  | Угол | Азимут | Угол | Азимут | Угол |         |      |
|                     | 032   | 01   | 158    | 88   | 302    | 02   |         |      |
| Сдвиги              |   |      |        |      |        |      |         |      |
| 67                  | $P$   |      | $T$    |      | $B$    |      | -0.021  | 0.67 |
|                     | Азимут  | Угол | Азимут | Угол | Азимут | Угол |         |      |
|                     | 209   | 02   | 119    | 04   | 320    | 86   |         |      |

*Примечание.*  $N$  – количество индивидуальных фокальных механизмов в данной выборке;  $P$ ,  $T$ ,  $B$  – соответственно главные оси сжатия, растяжения и промежуточного напряжения (углы их наклона отсчитываются от горизонта). Параметр Лоде–Надаи ( $\mu_m$ ) описывает вид напряженно-деформированного состояния и изменяется от  $-1$  (одноосное растяжение) через  $0$  (сдвиг в механическом смысле) до  $+1$  (одноосное сжатие). Коэффициент  $k$  показывает величину соответствия совокупности индивидуальных механизмов полученному среднему решению и изменяется от  $0$  до  $1$ .



**Рис. 7.** Графические решения для средних механизмов очагов землетрясений Загроса, построенных раздельно по совокупностям надвиговых (*а*) и сдвиговых (*б*) индивидуальных фокальных механизмов за 1977–2015 гг. по данным каталога Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>)

Усл. обозн. те же, что на рис. 6

Можно предположить, что показанные на рис. 7 решения соответствуют генетически различным видам деформирования земной коры в пределах рассматриваемой территории. Так, решение на рис. 7, *а* описывает характер складчато-надвигового деформирования кровли земной коры, свойственный в целом провинциям Дезфул и Фарс (отображен на геологическом профиле вкрест простирания складчатости на рис. 3). В свою очередь, решение, приведенное на рис. 7, *б*, характерно преимущественно для сдвиговой зоны непосредственно в окрестности Казерунского разлома. Именно в пределах этой зоны сосредоточено подавляющее большинство эпицентров землетрясений со сдвиговым типом механизма очага (см. рис. 5).

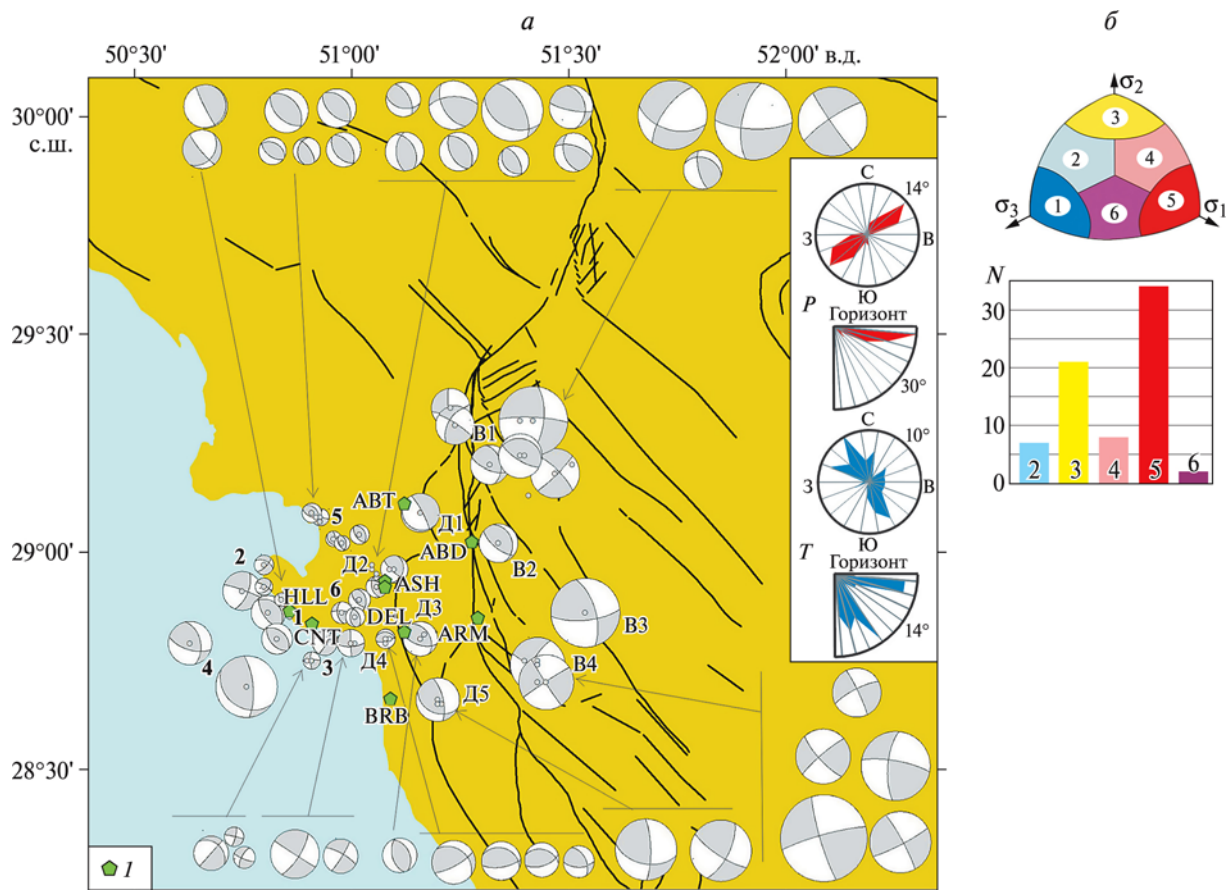
### **Результаты реконструкции механизмов очагов землетрясений по данным локальной сети сейсмических станций в широкой окрестности Бушерской АЭС**

В связи с оценкой сейсмической опасности строящейся на берегу Персидского залива Бушерской АЭС в 1999–2001 гг. группой сотрудников Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН проводились специальные сейсмологические исследования. Была установлена сеть из 8 сейсмических станций в области сопряжения тектонических провинций Дезфул и Фарс (к северу от Бушерской АЭС) на территории 100×100 км (рис. 8). Один из основных результатов работы этой сети – реконструкция механизмов очагов землетрясений в диапазоне магнитуд  $M_b = 0–4$ .

Определение механизмов очагов осуществлялось по совокупности знаков продольных волн  $P$  и направлению поляризации поперечных волн  $S$  по оригинальной методике, разработанной специально для этой цели Ю.Л. Ребецким [Ребецкий и др., 2017]. Применение такой методики позволило существенно расширить возможности определения фокальных механизмов слабомагнитудных сейсмических событий и тем самым, расширить статистику таких определений в расположении локальной сейсмической сети, нацеленной на решение конкретной практической задачи – оценку сейсмической опасности района строительства Бушерской АЭС. Поскольку мы использовали в основном записи слабых ( $M_b < 4$ ) локальных событий, то степень неопределенности в идентификации начала вступления  $S$ -волны была зачастую достаточно высокой, не позволявшей в большинстве случаев измерять знаки первых вступлений  $S$ -волн. Поэтому определялась лишь направленность колебаний в  $S$ -волне (поляризация), рассчитываемая для различных участков сейсмической записи данной волны.

Расположение сети сейсмических станций, результаты реконструкции фокальных механизмов слабых близких землетрясений за срок 1999–2001 гг. и сводные роза-диаграммы для азимутов и углов наклона осей  $P$  и  $T$  приведены на рис. 8, *а*. Видно, что наиболее представительными для погружения оси  $T$  являются направления 150 и 330°, а наиболее часто встречающимися являются углы погружения 10 и 55°. Для простирания осей  $P$  наиболее представительными – направления 50 и 230°, при этом практически везде оси  $P$  имеют пологое погружение, наиболее выраженное значение которого 5°.

На рис. 8, *б* показана диаграмма, характеризующая распределение различных типов механизмов в кинематической (геологической) интерпретации, а также графический способ разделения механизмов по кинематическим типам (шесть типов). Как видно, наиболее распространены надвиги (взбросы) и сдвиги. Такое же преобладание типов механизмов отмечается и при рассмотрении фокальных механизмов из каталога Global CMT Project (см. рис. 4). В целом «кинематические портреты» совокупностей



**Рис. 8.** Распределение механизмов очагов землетрясений с  $M_b = 1.5-3.5$  на исследуемой территории в приближении двойным диполем для кластеров сейсмических событий (рис. 5 из статьи [Ребецкий и др., 2017] с доп. и изм.)

а. Различные кластеры (1–6) сейсмических событий в земной коре в ближайшей окрестности п-ова Бушер. В1–В4 – кластеры Боразджанской флексурно-разрывной зоны. Д1–Д5 – кластеры разломной зоны Дельвар–Манд к востоку от п-ова Бушер. Часть механизмов очагов для этих кластеров вынесена к рамке рисунка, поверх механизмов показаны эпицентры землетрясений. 1 – сейсмические станции. На врезке – роза-диаграммы для наиболее представительных углов простирания и погружения осей  $T$  и  $P$ .

б. Графический способ разделения механизмов по кинематическим типам (области разного цвета определяют положение оси на зенит: 1 – сброс; 2 – сбросо-сдвиг; 3 – сдвиг; 4 – взбросо-сдвиг; 5 – взброс (надвиг); 6 – взрез) и диаграмма их представительности

фокальных механизмов слабых землетрясений ( $M_b = 1.5-3.5$ ) в окрестности Бушера (см. рис. 8) и относительно сильных ( $M_b = 4.5-6.5$ ) по данным каталога Global CMT Project близки между собой. Но, тем не менее, следует отметить, что распределение числа событий по типам фокальных механизмов для слабых событий более размыто (присутствуют промежуточные типы движения – сдвиго-взбросы и сдвиго-сбросы) по сравнению с таковым для более сильных событий. По результатам расчетов для слабых событий не получено механизмов в виде чистых сбросов (небольшое число которых присутствует среди сильных сейсмических событий согласно рис. 4), хотя имелось достаточное число (6) слабых событий с близкими к ним механизмами в виде сбросо-сдвигов.

Обратим также внимание на взрезово-срезовые механизмы (одна из нодальных плоскостей субвертикальна, а вторая – очень пологая) слабых сейсмических событий, основная часть которых проявлена в коре побережья п-ова Бушер. На возможность их реального существования указывают встречающиеся на поверхности геологические структуры типа вертикальных взбросов, вытянутые широтно, с достаточно крутыми, почти вертикальными стенками высотой в несколько десятков метров. Сопоставление полученных нами решений для фокальных механизмов слабых землетрясений с этими взбросами позволяет предположить, что здесь в очагах землетрясений реализуется, скорее, вертикальная нодальная плоскость, т.е. механизмы землетрясений имеют взрезовой тип.

### Обсуждение результатов

Результаты расчетов совокупностей фокальных механизмов землетрясений Южного Ирана показали, что кинематические типы механизмов очагов землетрясений в коре исследуемого региона существенно различаются по разные стороны от Казерун-Боразджанской зоны разломов. Так, в земной коре самой этой зоны разломов преобладают сдвиговые механизмы в очагах землетрясений. В свете современных представлений о тектонической деформации земной коры Загроса, изложенных выше, можно предположить, что в этих сдвиговых механизмах реализовались преимущественно плоскости подвижек с южным и юго-восточным простиранием. К западу от рассматриваемой разломной зоны в континентальной части побережья Персидского залива и в окрестности разломной зоны Дельвар–Манд (см. рис. 8) наблюдаются механизмы очагов землетрясений в виде надвигов (взбросов) и взбросо-сдвигов. А в зоне перехода от коры континента к коре залива имеет место сочетание механизмов в виде сдвигов и взрезов для п-ова Бушер. Отметим, что наличие взрезов не характерно для других частей земной коры Загроса.

Подобное разделение кинематики сейсмостектонического деформирования отмечалось нами и ранее при обсуждении пространственного распределения фокальных механизмов надвигового и сдвигового типов по данным каталога Global CMT Project (URL: <http://www.globalcmt.org/>) для более сильных ( $4.5 \leq M_b \leq 6.5$ ) землетрясений за 1977–2015 гг. (см. рис. 5, 7). Это может служить указанием на достоверность в целом информации о характере деформации земной коры, получаемой нами при использовании описанной выше методики. Следовательно, предложенная методика реконструкции фокальных механизмов может применяться и в других регионах.

Отметим, что из приведенных на карте разломной тектоники (см. рис. 2) сведений следует, что Казерунский разлом является западным ограничением области горизонтальных сдвигов, которая от предгорий Высокого Загроса спускается на юг, расширяясь на восток в виде конского хвоста. Сам вид зоны и реализуемые в ее пределах землетрясения (с уменьшением магнитуды к югу) говорят о том, что интенсивность сдвигов максимальна на севере, в предгорьях Высокого Загроса, и постепенно затухает к югу. Здесь надвиговая компонента начинает преобладать над сдвиговой. Как уже отмечалось, каждая сдвиговая ветвь Казерун-Боразджанской разломной зоны как бы запирается на ее южной оконечности соответствующим надвиговым разломом. Вероятно, надвиговые разломы в месте сочленения Казерун-Боразджанской сдвиговой разломной зоны с надвиговым Главным фронтальным разломом (MFF) следует рассматривать как южное ограничение этой региональной зоны сдвигов.

Это сложное сочетание разрывных нарушений с существенно различной кинематикой движения по ним, скорее всего, и определяет отмеченное выше существенно большее разнообразие «кинематического портрета» совокупностей фокальных механизмов слабых землетрясений по сравнению с сильными сейсмическими событиями.

### Заключение

В работе проведено сопоставление результатов реконструкции фокальных механизмов на основе разработанного нами ранее [Ребецкий и др., 2017] алгоритма, использующего поляризацию  $S$ -волн, с современными представлениями о тектонической деформации земной коры в широкой окрестности исследуемой территории. Необходимость разработки такого алгоритма возникла в условиях недостаточной информации о знаках первых вступлений  $P$ -волн для определения фокальных механизмов слабых землетрясений ( $M_b = 0-4.0$ ).

Специфика геодинамики рассматриваемой территории заключается в том, что кинематические типы механизмов очагов землетрясений в коре исследуемого региона существенно различаются по разные стороны от западного борта Казерун-Боразджанской зоны разломов. Это установлено как по определениям фокальных механизмов слабых землетрясений в рамках предлагаемой методики, так и по фокальным механизмам относительно сильных землетрясений ( $M_b \geq 4.5$ ), определяемых в рамках стандартной методики. В земной коре самой зоны разломов преобладают сдвиговые механизмы, а к западу от нее – надвиговые.

Совпадение оценок типа подвижек в очагах землетрясений исследуемой территории по слабым и сильным землетрясениям может служить указателем достоверности получаемой нами в рамках предложенной методики информации о характере деформации и типе подвижек земной коры.

### Благодарности

Работа выполнена по госзаданию Института физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН.

### Литература

- Ребецкий Ю.Л., Лукк А.А., Татевосян Р.Э., Быкова В.В. Определение фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана // Геодинамика и тектонофизика. 2017. Т. 8, № 4. С. 971–988. DOI 10.5800/GT-2017-8-4-0327
- Юнга С.Л. О механизме деформирования сейсмоактивного объема земной коры // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1979. № 10. С. 14–23.
- Юнга С.Л. Методы и результаты изучения сеймотектонических деформаций. М.: Наука, 1990. 191 с.
- Adams A., Brazier R., Nyblade A., Rodgers A., Al-Amri A. Source parameters for moderate earthquakes in the Zagros mountains with implications for the depth extent of seismicity // Bull. Seismol. Soc. Amer. 2009. V. 99. P. 2044–2049.
- Allen M., Jackson J., Walker R. Late Cenozoic reorganization of the Arabia–Eurasia collision and the comparison of short-term and long-term deformation rates // Tectonics. 2004. V. 23, N 2. TC2008. DOI 10.1029/2003TC001530



- Allen M.B., Saville C., Blanc E.J.-P., Talebian M., Nissen E.* Orogenic plateau growth: Expansion of the Turkish–Iranian Plateau across the Zagros fold-and-thrust belt // *Tectonics*. 2013. V. 32, N 2. P. 171–190. DOI 10.1002/tect.20025
- Authemayou Ch., Bellier O., Chardon D., Malekzade Z., Abassi M.* Role of Kazerun fault system in active deformation of the Zagros fold-and-thrust belt (Iran) // *C. R. Geoscience*. 2005. V. 337. P. 539–545.
- Authemayou Ch., Chardon D., Bellier O., Malekzadeh Z., Shabanian E., Abbassi M.R.* Late Cenozoic partitioning of oblique plate convergence in the Zagros fold-and-thrust belt (Iran) // *Tectonics*. 2006. V. 25. TC3002. DOI 10.1029/2005TC001860
- Authemayou Ch., Bellier O., Chardon D., Benedetti L., Malekzade Z., Claude Ch., Angeletti B., Shabanian E., Abbassi M.* Quaternary slip-rates of the Kazerun and the Main Recent Faults: Active strike-slip partitioning in the Zagros fold-and-thrust belt // *Geophys. J. Inter.* 2009. V. 178. P. 524–540. DOI 10.1111/j.1365-246X.2009.04191.x
- Bachmanov D.M., Trifonov V.G., Hessami K. et al.* Active faults in the Zagros and Central Iran // *Tectonophysics*. 2004. V. 380. N 3–4. P. 221–241. DOI 10.1016/j.tecto.2003.09.021
- Baker J., Llu J.P., Robertson E.J., Efstratiadis A.* Role of insulin-like growth factors in embryonic and postnatal Growth // *Cell*. 1993. V. 75. P. 73–82.
- Berberian M.* Natural hazards and the first Earthquake catalogue of Iran: V. I. Historical hazards in Iran prior to 1900. Tehran: IIEES, 1994. 604 p.
- Berberian M.* Master blind thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics // *Tectonophysics*. 1995. V. 241. P. 193–224.
- Berberian M., King G.* Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran // *Can. J. Earth Sci.* 1981. V. 18. P. 210–285.
- Berberian M., Yeats R.S.* Patterns of historical earthquake rupture in the Iranian plateau // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1999. V. 89. P. 120–139.
- DeMets C., Gordan R.G., Argus D.F., Stein S.* Current plate motions // *Geophys. J. Int.* 1990. V. 101. P. 425–478.
- Jackson J., McKenzie D.* Active tectonics of the Alpine-Himalayan belt between Western Turkey and Pakistan // *Geophys. J. Roal. Astr. Soc.* 1984. V. 77. P. 185–264.
- Falcon N.* Southern Iran: Zagros mountains // *Mesozoic–Cenozoic Orogenic Belts*. 1974. V. 4. P. 199–211.
- Ford M.* Depositional wedge tops: Interaction between low basal friction external orogenic wedges and flexural foreland basins // *Basin Res.* 2004. V. 16. P. 361–375.
- Hessami Kh., Jamali F.* Explanatory notes to the map of major active faults of Iran // *JSEE*. 2006. V. 8, N 1. P. 1–11.
- Hessami Kh., Koyi H., Talbot C.* The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt // *J. of Petroleum Geology*. 2001. V. 24. P. 5–28.
- Hessami Kh., Nilforoushani F., Talbot C.* Active deformation within the Zagros mountains deduced from GPS measurements // *J. Geolog. Soc. London*, 2006. V. 163. P. 143–148.
- Kreemer C., Holt W.E., Haines A.J.* An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation // *Geophys. J. Intern.* 2003. V. 154, N 1. P. 8–34. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x>
- McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb A.* GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions // *Geophys. J. Intern.* 2003. V. 155, N 1. P. 126–138. URL: <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02023.x>
- McQuillan H.* The role of basement tectonics in the control of sedimentary facies, structural patterns and salt plug emplacements in the Zagros fold belt of southwest Iran // *J. Southeast Asian Earth Sci.* 1991. V. 5. P. 453–463.

- McQuarrie N. Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran // *J. Struct. Geol.* 2004. V. 26. P. 519–535.
- Molinaro M., Leturmy P., Guezou J.-C., Frizon de Lamotte D., Eshraghi S. The structure and kinematics of the southeastern Zagros fold-thrust belt, Iran: From thin-skinned to thick-skinned tectonics // *Tectonics*. 2005. V. 24. TC3007. DOI 10.1029/2004TC001
- Mouthereau F., Tensi J., Bellahsen N., Lacombe O., De Boisgrollier T., Kargar S. Tertiary sequence of deformation in a thin-skinned/thick-skinned collision belt: The Zagros folded belt (Fars, Iran) // *Tectonics*. 2007. V. 26. TC5006. DOI 10.1029/2007TC002098
- Mouthereau F. Timing of uplift in the Zagros belt/Iranian plateau and accommodation of late Cenozoic Arabia–Eurasia convergence // *Geol. Mag.* 2011. V. 148. P. 726–738.
- Mouthereau F., Lacombe O., Verges J. Building the Zagros collision orogen: Timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence // *Tectonophysics*. 2012. V. 532–535. P. 27–60. DOI 10.1016/j.tecto.2012.01.022
- Nissen E., Tatar M., Jackson J.A., Allen M.B. New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran // *Geophys. J. Int.* 2011. V. 186. P. 928–944.
- Talbot C.J., Alavi M. The past of a future syntaxis across the Zagros // *Salt Tectonics*. 1996. V. 100. P. 89–109.
- Talebian M., Jackson J. Offset on the Main Recent Fault of the NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia–Eurasia collision zone // *Geoph. J. Int.* 2002. V. 150. P. 422–439.
- Talebian M., Jackson J. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran // *Geoph. J. Int.* 2004. V. 156. P. 506–526.
- Tatar M., Hatzfeld D., Martinod J., Walpersdorf A., Ghafari-Ashtiany M., Chery J. The present-day deformation of the central Zagros from GPS measurements // *Geoph. Res. Lett.* 2002. V. 29, N 19. P. 33-1–33-4. DOI 10.1029/2002/GL015427
- Tavakoli F., Walpersdorf A., Authemayou C., Nankali H.R., Hatzfeld D., Tatar M., Djamour Y., Nilforoushan F., Cotte N. Distribution of the right-lateral strike–slip motion from the Main recent fault to the Kazerun fault system (Zagros, Iran): Evidence from present-day GPS velocities // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2008. V. 275, N 3–4. P. 342–347. DOI 10.1016/j.epsl.2008.08.030
- Vernant P., Nilforoushan F., Hatzfeld D. et al. Present-day crustal deformation and plate kinematics in Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman // *Geoph. J. Int.* 2004. V. 157. P. 381–398.
- Vita-Finzi C. Rates of Holocene folding in the coastal Zagros near Bandar Abbas, Iran // *Nature*. 1979. V. 278. P. 632–634.
- Walpersdorf A., Hatzfeld D., Nankali H., Tavakoli F., Nilforoushan F., Tatar M., Vernant P., Chery J., Masson F. Difference in the GPS deformation pattern of North and Central Zagros (Iran) // *Geoph. J. Int.* 2006. V. 167, N 3. P. 1077. DOI 10.1111/j.1365-246X.2006.03147.x

#### Сведения об авторах

**ЛУКК Альберт Артурович** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-90-35. E-mail: lukk@ifz.ru

**РЕБЕЦКИЙ Юрий Леонидович** – доктор физико-математических наук, заведующий лабораторией, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-93-50. E-mail: reb@ifz.ru

## MODERN GEODYNAMICS AND FOCAL MECHANISMS OF EARTHQUAKES IN THE NEIGHBORHOOD OF BUSHEHR NPP

A.A. Lukk, Yu.L. Rebetsky

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**Abstract.** Detailed seismological studies performed by the seismological expedition of the Institute of Physics of the Russian Academy of Sciences in 1999–2001 in the vicinity of the Bushehr nuclear power plant in the territory of Southern Iran, allowed, in particular, developing a technique for determining the focal mechanisms of earthquakes using the direction of *S*-wave polarization in weak close seismic events. In the present work, the results of reconstruction of such determinations are compared with the focal mechanisms of strong earthquakes, determined in the ISC catalogs by the standard method, and with modern concepts of tectonic deformation of the Earth's crust in a wide neighborhood of the study area. It is established that the reconstruction carried out is in good agreement with both the typification of motions in the centers of strong earthquakes and with modern ideas about the nature of deformation of the Earth's crust within the observational network. This allows us to recommend the proposed methodology for reconstructing focal mechanisms for use in other regions.

**Keywords:** tectonic deformations, geodynamics, focal mechanisms of earthquakes, kinematics of seismotectonic deformation.

### *About the authors*

**LUKK Albert A.** – Cand. Sci. (Phys. and Math.), leading researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-90-35. E-mail: lukk@ifz.ru

**REBETSKY Yuri L.** – Dr. Sci. (Phys. and Math.), head of laboratory, Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences. Moscow, Russia. Tel.: +7 (499) 254-93-50. E-mail: reb@ifz.ru