

<https://doi.org/10.5800/GT-2017-8-4-0327>

DETERMINATION OF WEAK EARTHQUAKE FOCAL MECHANISMS AND MODERN GEODYNAMICS OF SOUTHERN IRAN

Yu. L. Rebetsky, A. A. Lukk, R. E. Tatevossian, V. V. Bykova

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Russia

Abstract: The Southern Iran territory, including the Zagros region and the margins of the Arabian and Eurasian plates, is a seismically active area with large industrial facilities of Iran. In this respect, studying modern geodynamics of this area is a top research task. This article presents a part of the studies conducted by the IPE RAS Seismological Expedition led by the Doctor of Physics and Mathematics S.S. Arefiev in 1999–2001. The research team studied the seismic setting on the construction site of the Bushehr Nuclear Power Plant. The main results discussed in the present article are the focal mechanism solutions based on the data of the IPE RAS seismic network. The network was deployed in the junction area of the Fars and Dezful tectonic provinces (north of the Bushehr NPP) and covered an area of 100×100 km. A specific feature of the seismic network was that it comprised local networks, and each local station was focused, first of all, on determining the precise locations of earthquake epicenters in a particular section of the crust. However, the scarcity of stations in such local networks and the technologies available at that time did not allow us to determine the mechanisms of earthquake foci. This problem was solved by integrating the seismological and tectonophysical methods. In the analysis, we used the tectonophysical approach that is usually applied to reconstruct stresses from the data on slickensides. This approach is based on a specific algorithm of the kinematic method developed by O.I. Gushchenko, which is used in the absence of sliding direction signs. It became possible, in addition to a few signs from the first *P*-wave arrivals (1–2 confident signs), to use the data on the *S*-wave polarization direction. By applying the Gushchenko algorithm to such data, the areas of *P* and *T* axes were quite reliably localized on a single hemisphere for determining the focal mechanisms. The focal mechanisms computed for 72 earthquakes correspond to the Kazerooni-Borazdzhnan shearing zone and, at the same time, are indicative of the presence of crust incision mechanisms in the Bushehr Peninsula. The focal mechanisms computed in our study, as well as the mechanisms reported in the Global CMT Project Catalogue, show that the Bushehr Peninsula is located near the western boundary of the zone of strike-slip faults, which extends from the north (Zagros) to the south (the Persian Gulf) and widens as a horsetail-shape structure. In the crust of the Persian Gulf coast, the intensity of the strike-slip component in the earthquake focal mechanism is minimal. The earthquake mechanisms in this region are mainly related to thrusting, reverse faulting and even the crust incision.

Key words: earthquake focal mechanism; modern geodynamics; Zagros; Southern Iran

RESEARCH ARTICLE

Recommended by K.Zh. Seminsky

Received: April 17, 2017

Revised: October 20, 2017

Accepted: November 22, 2017

For citation: Rebetsky Yu.L., Lukk A.A., Tatevossian R.E., Bykova V.V., 2017. Determination of weak earthquake focal mechanisms and modern geodynamics of Southern Iran. *Geodynamics & Tectonophysics* 8 (4), 971–988. doi:10.5800/GT-2017-8-4-0327.

Для цитирования: 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.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ СЛАБЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И СОВРЕМЕННАЯ ГЕОДИНАМИКА ЮГА ИРАНА

Ю. Л. Ребецкий, А. А. Лукк, Р. Э. Татевосян, В. В. Быкова

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

Аннотация: Южный Иран в районе Загроса и границ Аравийской и Евразийской плит является сейсмически активной территорией, на которой находятся крупные промышленные объекты. В этой связи понятна актуальность изучения современной геодинамики региона. В работе представлена небольшая часть исследований, выполненных в процессе проведения изысканий сейсмологической экспедиции ИФЗ РАН под руководством д.ф.-м.н. С.С. Арефьева в 1999–2001 гг. Работы были связаны с изучением сейсмической обстановки в районе строительства АЭС Бушер. Главным результатом, обсуждаемым в статье, являются решения фокальных механизмов, полученных по данным сейсмической сети ИФЗ РАН. Сеть была развернута в области сопряжения тектонических провинций Фарс и Дезфул (к северу от АЭС Бушер) и охватывала область 100×100 км. Особенностью сейсмических сетей локальных станций является ее нацеленность, прежде всего, на точность локации эпицентров землетрясений определенного участка коры. При этом немногочисленность станций таких локальных сетей и существовавшие в то время методы не позволяли определять механизмы очагов землетрясений. Эта задача была решена на основе комплексирования сейсмологических и тектонофизических методов. В ходе анализа был использован тектонофизический подход, который обычно применялся при реконструкции напряжений по данным о зеркалах скольжения. Он основан на специфическом алгоритме кинематического метода О.И. Гущенко, используемом в случае отсутствия знаков в направлении скольжения. Это дало возможность в дополнение к небольшому числу знаков по первым вступлениям Р-волны (1–2 уверенных знака) использовать данные о направлении поляризации S-волны. Применение алгоритма метода О.И. Гущенко к таким данным позволило на единичной полусфере достаточно достоверно локализовать области выходов осей Р и Т при определении механизмов очагов. Полученные фокальные решения для 72 землетрясений соответствуют Казерун-Боразджанской зоне сдвигов и в то же время показывают наличие взрезовых механизмов для коры полуострова Бушер. Обобщение этих данных, а также данных о фокальных механизмах из базы «Global CMT Project» свидетельствует о том, что п-ов Бушер расположен вблизи западной границы зоны сдвигов, простирающейся с севера (Загрос) на юг (Персидский залив) и расширяющейся в виде конского хвоста. В коре побережья Персидского залива интенсивность компоненты сдвига в механизмах очагов землетрясений минимальна, здесь преимущественно возникают землетрясения с механизмами надвигового, взбросового и даже взрезового типа.

Ключевые слова: механизм очага землетрясения; современная геодинамика; Загрос; Южный Иран

1. ВВЕДЕНИЕ

На протяжении последних десятилетий для расчетов механизмов очагов землетрясений широко и успешно применяется инверсия волновых форм. Этот процесс стал рутинным при использовании записей широкополосных инструментов на телесеизмических и локальных расстояниях. Разработано множество хорошо зарекомендовавших себя алгоритмов и программное обеспечение, например [Herrmann, 2013; Sokos, Zahradník, 2008, 2013]. Однако применение этих алгоритмов для более короткопериодных записей остается проблематичным и, как правило, приводит к неверным определениям.

Вообще задача определения механизмов очагов слабых локальных событий является достаточно сложной. Как правило, такие события регистрируются локальной сетью наблюдений, включающей

не менее десяти станций. Вследствие этого классические (стандартные) методы построения решений механизмов очагов, основанные на анализе положения знаков первых вступлений Р-волн на очаговой полусфере, далеко не всегда дают удовлетворительные результаты. Это связано с тем, что даже в случае регистрации 6–8 знаков первых вступлений (а такие определения встречаются редко) решения оказываются не единственными в силу возможности подбора существенно разных фокальных механизмов, удовлетворяющих этим знакам. В реальности эта задача значительно усложняется наличием различного типа помех, приводящих к существенному уменьшению числа уверенно определяемых знаков первых вступлений.

В настоящей работе представлен опыт определения механизмов очагов землетрясений на основе комплексирования знаков первых вступлений Р-волн с данными о направлении поляризации

S-волн. Исходными данными в работе являются записи локальных землетрясений, зарегистрированных временной сетью наблюдений ИФЗ РАН в 1999–2001 гг. в районе строительства АЭС Бушер (далее СБ), Исламская Республика Иран.

Следует заметить, что использование *S*-волн для определения фокальных механизмов не является пионерской работой. Известны исследования ряда авторов, в которых также при определении механизмов очагов использовались данные о знаках первых вступлений в волнах *SV* и *SH* [Vvedenskaya, 1969; Balakina et al., 1972; Yunga, 1977] или данные об углах поляризации в первых вступлениях *S*-волн [Stauder, Udias, 1963; Udias, 1964]. Но эти исследования относились в основном к более сильным землетрясениям с магнитудами $M_S > 4$ на телесеismicких расстояниях с привлечением сейсмических записей региональных сейсмостанций. Кроме того, для идентификации первых вступлений волн *S* использовались не сами знаки, а волновые формы поперечных волн на сейсмограммах.

Исследуемая территория расположена в пределах складчатой горной страны Загрос на юго-западе Ирана (рис. 1). Система Загрос, простирающаяся с северо-запада на юго-восток, представляет собой зону коллизии Аравийской и Евразийской плит. 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 13°N в окрестности долготы 52°E со скоростью около 31 мм/год по отношению к Евразии. Геодезические данные (например [Kreemer et al., 2003; McClusky et al., 2003]) показывают примерно ту же ориентацию, но со скоростями ~ 10 мм/год и ниже. Горная страна Загрос, зажата между двумя жесткими образованиями – Аравийской плитой и Центральным Ираном (рис. 1), в процессе их сближения раздавливается и соответственно укорачивается на величину около 7 ± 2 мм/год в направлении север – юг, что отражается на поверхности в повсеместно развитой системе надвигов и складок, которые образовались где-то в середине – конце эоцена [Vernant et al., 2004]. При этом раздавливание происходит с различной интенсивностью в западной (Dezful Area: 4 ± 2 мм/год) и восточной (Fars Area: 9 ± 2 мм/год) части Загроса. Разделительной зоной между ними служит Казерунская область заметно развитых правосторонних сдвиговых деформаций (от 2 до 5 мм/год) в полосе между 51° и 53° в.д. (на долготе Шираза, рис. 1), куда попадает исследуемая нами территория окрестности г. Бушера.

В результате специальных сейсмических исследований МОВЗ, связанных со строительством СБ, в

регионе выделены три геоблока с различной внутренней структурой: Бушерский, Боразджанский и Казерунский [Seismic studies..., 2001].

Бушерский геоблок включает в себя Бушерский полуостров и всю равнинную часть береговой зоны. Конформная последовательность границ от верхов чехла до поверхности М, выдержанные мощности чехла (12–14 км на первом профиле и 11.0–11.5 км – на втором) и коры (42–45 км на первом профиле и 39–42 км – на втором) четко фиксируют окраинно-платформенный тип разреза с утолщенной корой.

Боразджанский геоблок выделяется как «зона прозрачности» для сейсмических волн или как «зона ослабленных фаз». Мощность осадочного чехла 9.5–10.0 км на севере и 13–14 км на юге. Мощность земной коры: 37 км в северной части (северо-восточнее Казеруна) и 38.5–43.0 км в южной части.

Казерунский геоблок занимает юго-восточное крыло Казерун-Боразджанской зоны. Изученная часть составляет полосу мощностью, изменяющейся от 15 км на юго-востоке до 35 км на востоке. Мощность чехла в пределах Казерунского блока: 7–9 км в северной части и 11 км в южной части. Мощность земной коры: 33.5–36.5 км в северной части блока, 42.0–42.5 км – в южной.

Согласно сейсмологическим данным каталога «Global CMT Project» (<http://www.globalcmt.org/>), можно утверждать, что западная часть Загроса в пределах рассматриваемой нами территории характеризуется механизмами очагов надвигового типа, что хорошо согласуется с тектоническими движениями по разломам в виде надвигов (рис. 2). В исследуемом участке (прямоугольник на рис. 1, 2) фиксируются землетрясения с механизмами в виде сдвигов, также отвечающие региональным сдвиговым разломам.

Вблизи СБ резко уменьшается число землетрясений с имеющимися определениями механизмов очагов, поэтому получение решений фокальных механизмов по данным сейсмической сети ИФЗ являлось крайне актуальной задачей.

2. СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ

Район полуострова Бушер является весьма активным в сейсмическом отношении, поэтому в связи с изысканиями под площадку АЭС и началом строительства в районе была развернута система сейсмологических наблюдений. При этом учитывалось то, что до начала этих наблюдений сейсмичность района на региональном уровне была изучена слабо. В организованную систему наблюдений входила сеть станций ИФЗ РАН, которая включала в себя семь станций, составляющих телеметриче-

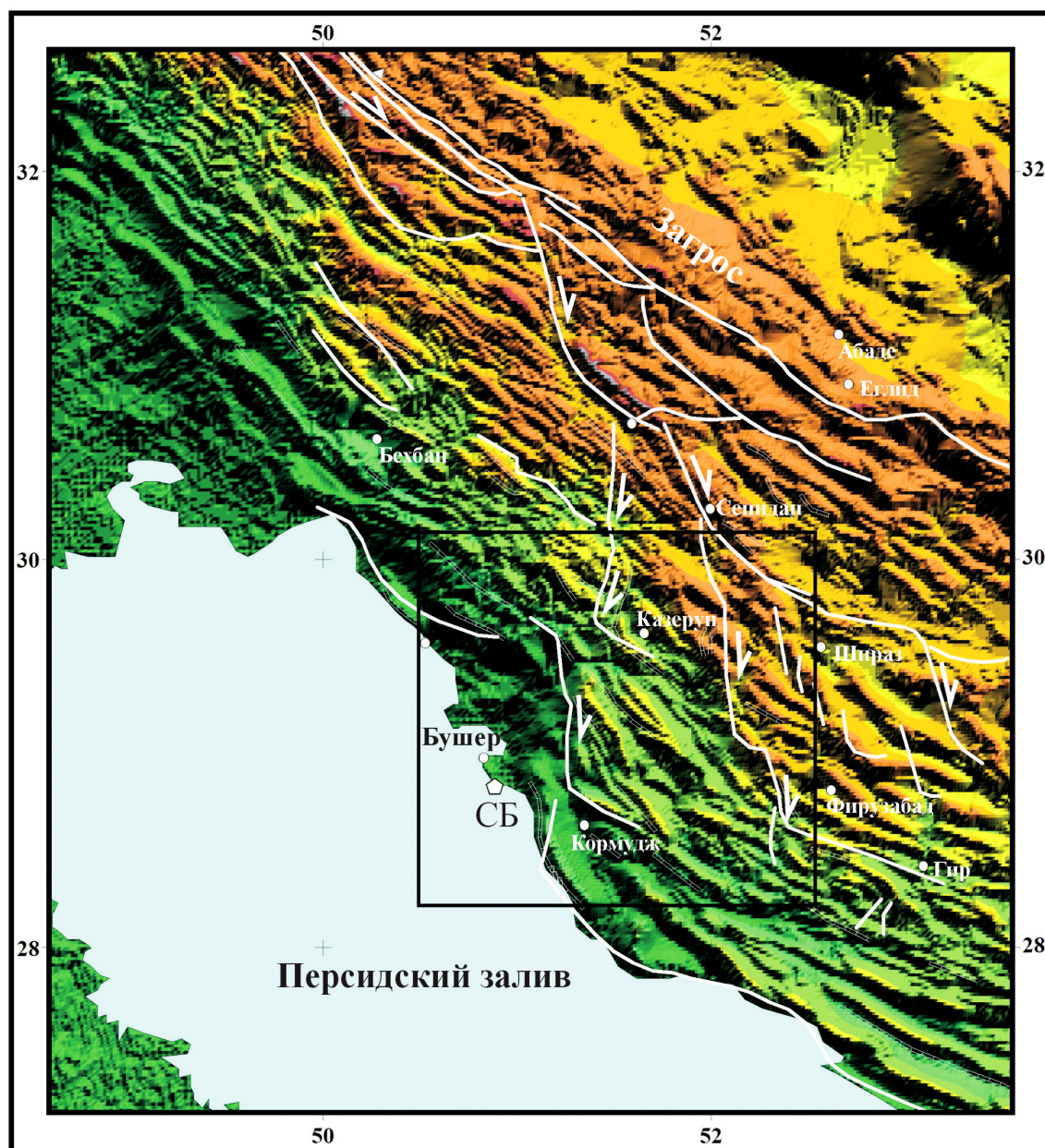


Рис. 1. Схема разломов Южного Ирана (провинции Фарси и Казерун). Прямоугольником отмечен район исследований, проведенных сейсмологической экспедицией Института физики Земли РАН. Увеличение топографических высот – от зеленого к светло-коричневому. Белые линии – разломы, стрелки – направление сдвиговых перемещений. СБ – район строительства АЭС Бушер.

Fig. 1. Schematic fault map of the Southern Iran (Farsi and Kazerooni provinces). The region studied by the seismological expedition of the Institute of Physics of the Earth, RAS is marked by the box. Colour codes: the increase in elevations is shown from green to light brown. White lines show faults; arrows mark the directions of shearing. СБ – the construction site of the Bushehr Nuclear Power Plant.

скую систему, восемь акселерографов SMACH и сейсмическую станцию регионального типа ОСБ-VI.

Наблюдения экспедиции ИФЗ РАН проводились с февраля 1999 г. по май 2001 г. Сотрудники полевого отряда ИФЗ РАН обеспечивали непрерывное производство наблюдений и осуществляли обработку записей. Особенно хочется отметить вклад д.ф.-м.н. С.С. Арефьева – организатора и руководи-

теля этих работ, чей неиссякаемый энтузиазм, научный профессионализм и просто человеческие качества позволили выполнить работы на очень высоком уровне и получить качественные записи, интерпретация и анализ которых могут быть проведены и в настоящее время.

Основой наблюдений ИФЗ РАН являлась телеметрическая сеть сейсмических станций с датчи-

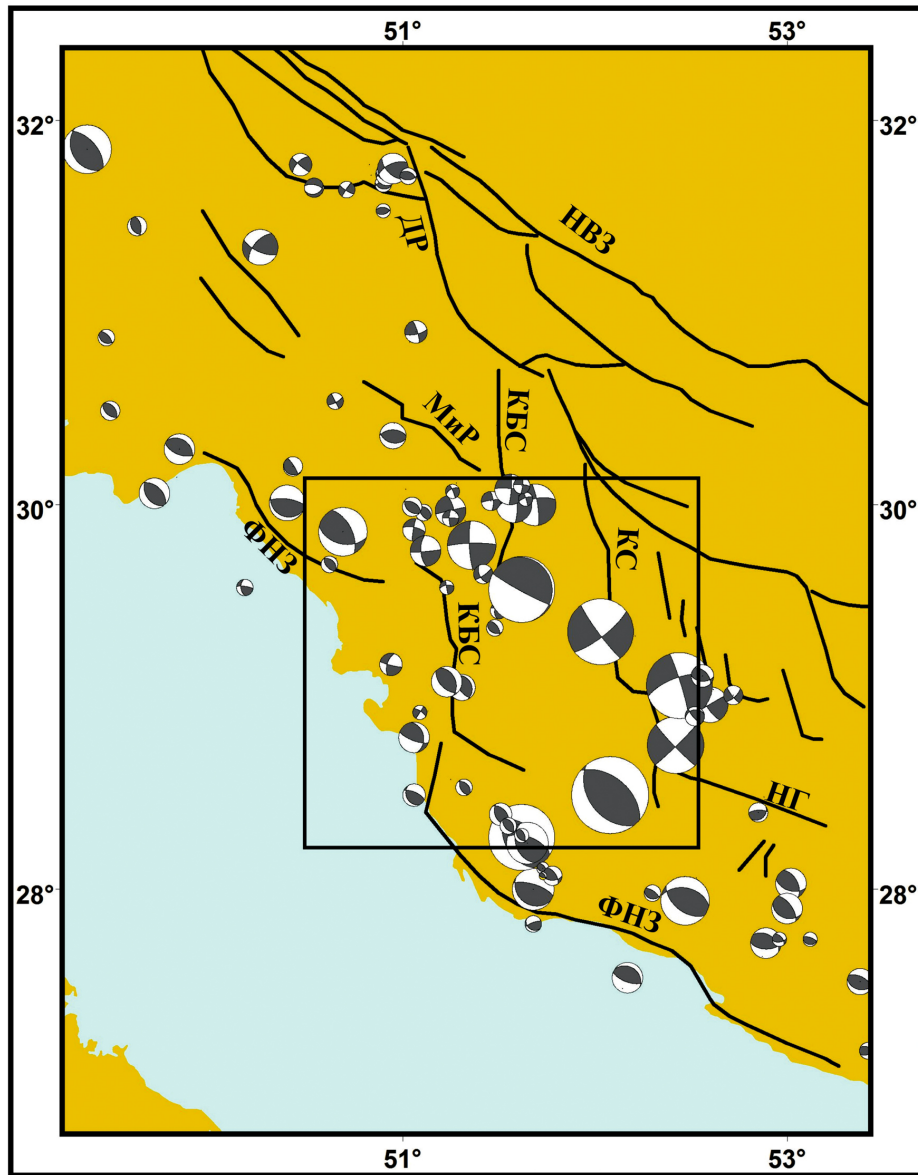


Рис. 2. Карта механизмов очагов землетрясений с $4.5 < M_w < 6.0$, произошедших с 1976 по 2013 г. (материалы каталога «Global CMT Project» для территории Южного Ирана). Разломы (линии черного цвета): ФНЗ – фронтальный надвиг Загроса, НВЗ – надвиг Высокого Загроса, КБС – Казерун-Боразджанский сдвиг, КС – Каребасский сдвиг, МиР – разлом Мишан, ДР – разлом Дена, НГ – надвиг Гира.

Fig. 2. Map of the focal mechanisms of $4.5 < M_w < 6.0$ earthquakes that occurred in the Southern Iran from 1976 to 2013 (data from the Global CMT Project database). Faults (black lines): ФНЗ – Zagros frontal thrust, НВЗ – High Zagros thrust, КБС – Kazerooni-Borazdzhazhan strike-slip fault, КС – Karebass strike-slip fault, МиР – Mishan fault, ДР – Dena fault, НГ – Gira thrust.

ками СМ-3. В ходе рекогносцировочных маршрутов в местах предполагаемого размещения станций были проведены работы по проверке прохождения сигнала на центральный пункт, замерены уровни шумов и проверена идентичность сейсмометрических каналов. В результате были выбраны площадки под восемь станций. Следует отметить, что рельеф местности, особенно в ближней зоне, не оставлял большого маневра для выбора. Станции расположены по принципу «двойного кольца»:

первое (станции CNT, HLL, ASH, BRB, DEL) охватывает ближнюю зону в радиусе примерно 25 км, второе (станции ARM, ABD, ABT) контролирует дальнюю зону радиусом около 50 км.

Первой была установлена станция CNT в пос. Морской в центре сбора и обработки информации. Станция была подключена сразу же после доставки аппаратуры. После получения разрешения на использование радиочастот в течение пяти дней были оборудованы остальные станции на

Т а б л и ц а 1. Координаты станций локальной сейсмической сети в районе Бушер

Table 1. Coordinates of the stations in the local seismic network in the Bushehr region

Код станции	Широта	Долгота	Наименование пунктов сейсмических наблюдений
CNT	28.8358	50.9108	Центр, пос. Морской
DEL	28.8168	51.1235	Делвар
BRB	28.6623	51.0922	Барбу
ABT	29.1120	51.1242	Абу Тавил
ABD	29.0242	51.2792	Абад
ARM	28.8488	51.2927	Ахрам
HLL	28.8653	50.8603	Халили
ASH	28.9202	51.0798	Али Шахр

преобладающих высотах. Список и координаты станций представлены в табл. 1, карта их взаимного расположения показана на рис. 3.

Обработка сейсмических записей велась в пос. Морской с использованием комплекса единого времени [Seismic studies..., 2001]. Выделение сигнала на записях предполагаемых землетрясений осуществлялось в автоматическом режиме при срабатывании необходимых критериев сейсмического события для заранее заданного числа станций (стандартно – 4, 5). Все записи сейсмических событий, сохраняемые автоматически, затем проверялись операторами, и из их числа выделялись реально произошедшие землетрясения.

Основой достоверной локации очагов землетрясений является корректно выбранная скоростная модель региона. Для ее уточнения 24–26 апреля 1999 г. специально для геофизических целей были проведены три взрыва. Совместная обработка записей этих взрывов позволила построить сводный годограф первых вступлений P - и S -волн, оценить величину отношения времени пробега волн S к времени пробега волн P – t_p/t_s (или, что то же самое, V_p/V_s) и выбрать в качестве расчетной скоростную модель, приведенную в табл. 2. Данная модель была выбрана как обеспечивающая наилучшую сходимость теоретического годографа с экспериментальным локальным годографом, построенным по результатам обработки взрывов. Соотношение между скоростями продольных и поперечных волн было принято $V_p/V_s = 1.78$.

Стандартное определение гипоцентров землетрясений в рамках полевой экспедиции ИФЗ РАН осуществлялось с использованием программы *Hypo71* [Lee, Lahr, 1975]. На ее основе по данным сейсмических записей, полученных за период с 10.02.1999 г. по 20.05.2001 г., для района 40×40 км (включающего площадку СБ) было определено положение очагов 2235 землетрясений с магнитудой M_L (локальная магнитуда) от -0.2 до 4.8 (рис. 3).

3. ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ФОКАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Определение механизмов очагов землетрясений не входило в задачи проведения сейсмологического мониторинга. Тем не менее для ряда локальных событий удалось определить механизмы очагов, используя нестандартный подход, описанный ниже.

После обработки данных сейсмических наблюдений для расчета фокальных механизмов нами были использованы наиболее чистые записи с низким уровнем шумов для землетрясений с магнитудой в основном в диапазоне $1.5 \geq M \geq 3.5$. Данный диапазон был обусловлен двумя факторами. Менее сильные события регистрировались лишь небольшим числом ближайших к очагу станций и не имели достаточного количества записей с хорошим соотношением сигнал–помеха, а регистрируемый сигнал на сейсмограммах более сильных событий, как правило, был «зашкален».

Подобный диапазон магнитуд позволяет рассматривать очаги землетрясений на гипоцентральных расстояниях более 5 км (преобладающих в рамках плотности нашей регистрирующей сети станций) как точечные (в силу их относительной малости, радиусом менее 1 км), что дает возможность при решении обратной задачи сейсмологии использовать приближения объемных волн плоскими и привлекать приемы лучевой сейсмологии.

Для проведения расчетов был разработан комплекс авторских программ, обеспечивающий:

1) создание синтетической модели области очага путем задания источников сейсмических волн в центрах 3D ячеек, на которые разбивается исследуемый район (программа *Hypo_net*);

2) переопределение гипоцентров очагов произошедших землетрясений на основании подбора оптимального решения прямой задачи лучевой сейсмологии (программа *Hypo_search*);

3) нахождение поляризации различных участков S -волны (программа *Seism_S*);

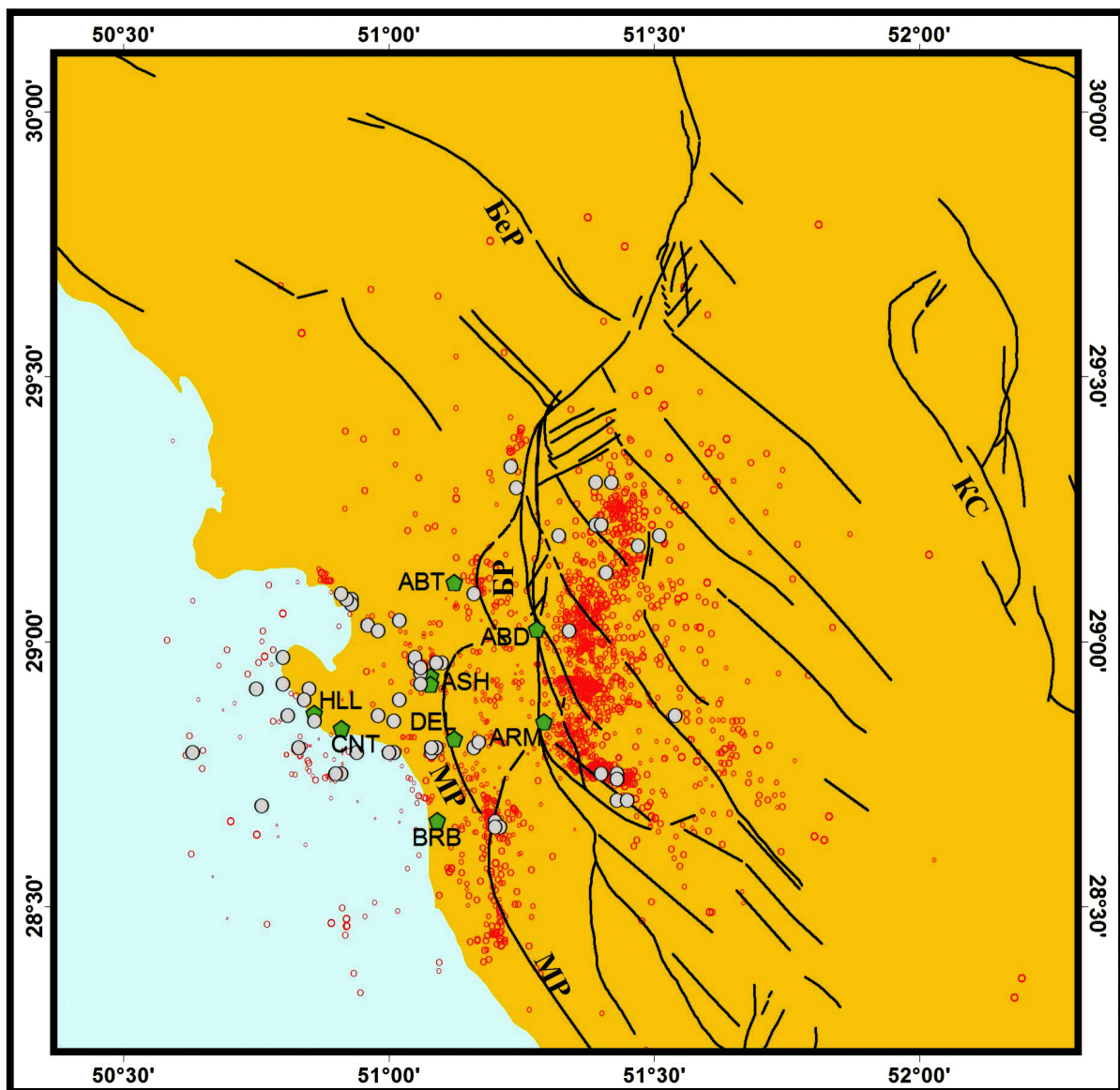


Рис. 3. Схема расположения станций локальной сейсмической сети в районе Бушер (пятиугольники), эпицентров землетрясений, лоцированных этой сетью в 1999–2001 гг. (красные кружки), и эпицентров землетрясений, для которых были получены данные о механизмах очагов (кружки с серой заливкой). Утолщенные линии – региональные разломы, тонкие линии – локальные разломы, пунктирная линия на п-ве Бушер – предполагаемый разлом по [Berberian, 1983]. Разломы: БР – Боразджанский, МР – Манд, БеР – Бехбан, КС – Каребасский сдвиг.

Fig. 3. Schematic map of the Bushehr region. Pentagons – local seismic stations; red circles – epicenters of earthquakes registered by the seismic network in 1999–2001; grey circles – epicenters of earthquakes with estimated focal mechanisms; thick lines – regional faults; thin lines – local faults; the dashed line on the Bushehr Peninsula – assumed fault (after [Berberian, 1983]). Faults: БР – Borazdzhan fault, МР – Mand fault, БеР – Behban fault, КС – Karebass strike-slip fault.

Т а б л и ц а 2. Скоростная модель региона

Table 2. The velocity model of the region

Номер слоя	Скорость, V_p (км/с)	Глубина кровли слоя (км)
1	4.0	0
2	5.5	3
3	6.3	13
4	6.7	20
5	8.1	45

4) определение механизмов очагов землетрясений по совокупности данных о первых вступлениях в P -волне и поляризации S -волны (программа *Seism_S*).

Как показали расчеты по программе *Hypo71*, глубины рассматриваемых землетрясений располагались в интервале от 3 до 20 км. Согласно используемой скоростной модели среды (табл. 2), эпицентральные расстояния и глубины очагов в большинстве случаев обеспечивали регистрацию в первых вступлениях прямых (проходящих) волн. Для землетрясений, выходящих за пределы телеметрической сети, на наиболее удаленных от них станциях первым вступлениям отвечали головные волны, преломленные, как правило, на скоростной границе на глубине 13 км.

С использованием программы *HYP0_net* район исследований разбивался на ячейки в виде прямоугольных призм. Сетка центров ячеек составляет матрицу $101 \times 101 \times 101$ в пределах рассматриваемой области: $50.6\text{--}51.6^\circ$ в.д., $28.4\text{--}29.4^\circ$ с.ш. и $0.5\text{--}50.5$ км по глубине. Таким образом, размер граней расчетных призм составлял по широте, долготе и глубине соответственно около 980, 1200 и 500 м. В центре каждой призмы задавался искусственный источник сейсмической волны и рассчитывалось время прихода P - и S -волн (прямые, головные) на все станции.

Программой *HYP0_search* выполнялись: 1) расчет положений гипоцентров землетрясений, 2) трассирование сейсмических лучей различных частот волнового пакета сейсмической записи, 3) нахождение точек выхода сейсмических лучей, пришедших на регистрирующие станции на единичной сфере, окружающей очаг землетрясения. Определение гипоцентров землетрясений осуществлялось на основе сопоставления разницы времени пробега P - и S -волн на станции из узлов 3D-сетки синтетической сейсмофокальной области с разницей времени пробега этих волн от реально произошедших землетрясений. Таким образом, для каждого из узлов (n) и для каждой станции (k) рассчитывалось время в очаге землетрясения и средняя суммарная невязка времени (RMS) для каждого землетрясения. Изолинии с минимальными значениями RMS образуют сложное трехмерное поле области возможного положения очага землетрясения. В соответствии с используемой схемой прямого расчета локации очагов найденное положение гипоцентра совпадает с одним из узлов сетки. Таким образом, точность локации гипоцентров составляет около 500–600 м по латерали и 250 м по глубине.

Опыт расчета гипоцентров очагов землетрясений для исследуемого региона показал зависимость устойчивости определения глубин RMS_{min} от эпицентрального положения очага землетрясения.

Дальнейшие расчеты проводились для событий, входящих в заданный магнитудный диапазон (1.5–3.5) и имеющих не менее четырех определений знаков первых вступлений P -волн. Это 72 землетрясения, для которых по данным программы *HYP0_search* выделялись фазы на сейсмограмме, находилось направление поляризации S -волны и определялся механизм очага землетрясения по совокупности знаков первых вступлений волн P и направлений поляризации волн S . Средняя глубина гипоцентров этих землетрясений составляла около 12 км, средняя магнитуда была около 3.0, а среднее значение RMS составляло 0.25 с.

Направление поляризации рассчитывалось путем выделения преимущественных движений для плоского (двумерного) колебательного процесса в задаваемом временном окне длительностью 0.1–0.2 с. При выделении такого 2D колебания анализировались проекции 3D движений на плоскость, ортогональную направлению луча в продольной волне P для тех землетрясений, в записях которых было установлено время первого вступления волны S .

Анализ выделяемых направлений поляризации S -волны вдоль всей ее коды показал, что встречаются как случаи узлокализованного спектра направлений поляризации, так и случаи, когда спектр разброса углов может достигать 180° . Из-за этого не для всех станций удавалось определить поляризацию (табл. 3, колонка 17). Для расчета направления поляризации S -волны принимался участок записи с максимальной амплитудой движения (локальный максимум сейсмической энергии).

Основной проблемой при анализе знаков вступлений S -волны на локальной сейсмической сети, развернутой в окрестности г. Бушера, было наложение на первые вступления поперечных S -волн хвостовой части пакета прямых и головных продольных волн. Это происходило в силу сравнительно малых эпицентральных расстояний. Другой проблемой сети являлась существенная компонента микросейсмического шума, что зачастую не позволяло достоверно определять не только знаки первых вступлений в компонентах S -волн, но даже, в некоторых случаях, и сами амплитуды смещения.

В дальнейшем выделяемые на спектрах направления поляризации помещаются на сферу очага анализируемого землетрясения при использовании трассировки сейсмического луча. Соответственно при этом построении учитывается тип волны: прямая или головная, что отражается в положении точки с данными о поляризации S -волны либо на верхней (прямая волна), либо на нижней (головная волна) полусфере.

Таблица 3. Данные о землетрясениях с имеющимися определениями механизма очага

Table 3. Data on earthquakes with the available focal mechanism solutions

N	DATE	TIME	SEC	ION	LAT	DEPTH	Mg	RMS	Taz	Tpl	Xaz	Xpl	Paz	Ppl	Ig	M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1	19990315	2358	52.30	51.20	28.66	7.5	2.93	0.23	295.8	59.0	156.7	24.4	58.3	17.9	5	7
2	19990318	1840	42.51	51.21	28.65	10.5	3.25	0.20	311.0	40.4	166.3	43.8	57.6	18.5	4	7
3	19990318	2042	43.92	51.20	28.65	8.5	3.25	0.21	347.5	27.5	151.3	61.5	254.0	6.8	3	6
4	19990509	0706	32.27	51.06	28.95	10.5	3.15	0.24	288.8	71.1	140.3	16.3	47.5	9.4	5	8
5	19990509	1746	21.69	51.06	28.95	12.5	2.96	0.24	123.0	55.5	295.7	34.3	28.0	3.4	4	6
6	19990511	1647	6.07	51.06	28.94	11.5	2.84	0.24	143.4	59.6	308.6	29.6	42.3	6.5	4	7
7	19990512	2325	5.46	50.63	28.79	17.5	2.88	0.65	328.4	54.1	129.3	34.4	225.6	9.1	4	6
8	19990609	2355	50.68	51.01	28.79	13.5	2.66	0.21	165.4	6.3	56.4	71.2	257.4	17.6	3	6
9	19990712	1538	11.97	51.05	28.96	12.5	2.60	0.31	243.2	76.6	149.5	0.9	59.2	13.4	5	6
10	19990712	1540	6.82	51.05	28.97	12.5	2.69	0.15	297.6	63.3	134.3	25.7	41.1	6.7	5	6
11	19990808	0501	10.03	50.76	28.69	12.5	3.21	0.32	295.3	59.4	168.9	19.4	70.4	22.8	5	5
12	19990916	1837	22.03	51.47	29.18	5.5	2.98	0.68	180.0	6.0	72.1	71.1	271.9	17.8	3	5
13	19990923	1806	44.40	50.75	28.91	13.5	2.80	0.22	340.8	14.7	100.1	61.8	244.3	23.5	3	7
14	19990925	1754	4.82	50.91	28.75	12.5	2.22	0.20	330.5	5.6	85.1	76.8	239.3	12.0	3	7
15	19990925	1755	37.91	50.91	28.75	13.5	2.10	0.29	134.3	16.5	294.1	72.5	42.6	5.7	3	8
16	19990925	2020	13.80	51.40	28.75	3.5	3.00	0.25	108.1	5.7	357.4	74.2	199.6	14.7	3	8
17	19991016	2244	42.16	51.43	28.75	10.5	3.10	0.43	95.6	17.9	261.4	71.5	4.3	4.2	3	7
18	19991119	0306	4.25	51.43	28.74	3.5	3.55	0.27	120.7	12.0	300.0	78.0	30.7	0.1	3	8
19	19991220	1537	6.48	50.93	29.07	16.5	2.48	0.22	202.2	64.9	335.5	17.8	71.1	17.1	5	8
20	19991229	0231	4.19	50.93	29.07	18.5	2.93	0.15	360.0	84.0	137.3	4.4	227.6	4.1	5	8
21	20000107	2151	47.45	51.43	28.74	3.5	3.06	0.38	162.7	5.5	265.6	66.5	70.4	22.8	3	6
22	20000110	0547	32.84	51.16	28.80	9.5	2.74	0.19	330.0	11.0	150.0	79.0	60.0	0.0	3	8
23	20000110	0617	41.47	51.16	28.80	9.5	2.69	0.15	327.4	68.5	123.5	19.8	216.4	8.0	5	5
24	20000120	0308	57.90	51.10	28.96	12.5	2.54	0.17	9.3	53.5	141.3	26.4	243.7	23.4	5	5
25	20000120	0309	16.22	51.09	28.96	11.5	2.75	0.18	90.0	84.0	330.1	3.0	239.9	5.2	5	8
26	20000219	1808	21.34	50.80	28.92	11.5	2.11	0.43	3.9	19.2	109.2	37.1	252.4	46.6	2	5
27	20000222	2016	22.22	50.98	28.86	13.5	2.26	0.12	142.0	41.7	292.9	44.4	38.1	15.0	4	5
28	20000318	0341	22.74	50.85	28.91	11.5	2.84	0.22	256.2	29.3	146.9	30.5	20.5	45.1	2	6
29	20000322	0709	21.96	50.92	29.08	20.5	2.69	0.19	270.0	89.7	324.0	0.0	54.0	0.0	5	8
30	20000322	0711	56.79	50.93	29.08	11.5	2.12	0.17	150.4	5.6	283.2	81.8	59.8	6.0	3	6
31	20000322	0951	1.26	50.93	29.07	19.5	2.55	0.15	44.8	81.5	305.7	1.4	215.5	8.4	5	7
32	20000327	1839	14.50	50.92	29.08	19.5	2.83	0.16	44.8	81.5	136.9	0.3	227.0	8.5	5	6
33	20000408	1910	30.94	50.91	29.09	18.5	2.20	0.28	333.8	76.6	124.4	11.7	215.7	6.4	5	8
34	20000411	1208	44.16	51.32	29.20	10.5	2.85	0.12	337.5	57.2	126.3	28.8	224.3	14.2	5	7
35	20000414	0710	38.98	51.43	28.74	3.5	3.35	0.35	145.8	26.0	312.5	63.4	53.2	5.3	3	5
36	20000422	0805	23.44	51.54	28.86	3.5	3.32	0.37	307.6	35.0	117.3	54.5	214.2	4.9	4	6
37	20000429	0327	33.43	50.86	28.85	10.5	2.92	0.38	61.1	50.3	154.2	2.6	246.4	39.6	6	6
38	20000501	1712	49.61	50.80	28.97	15.5	2.17	0.13	166.5	11.9	66.5	39.5	270.0	48.0	2	6
39	20000514	1107	1.84	51.43	28.70	8.5	3.16	0.36	288.0	11.4	108.0	78.6	18.0	0.0	3	6
40	20000514	1109	51.09	51.45	28.70	8.5	3.14	0.31	102.0	5.9	282.0	84.1	12.0	0.0	3	5

Окончание таблицы 3

End of Table 3

N	DATE	TIME	SEC	LON	LAT	DEPTH	Mg	RMS	Taz	Tpl	Xaz	Xpl	Paz	Ppl	Ig	M
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
41	20000710	2235	22.03	51.51	29.20	5.5	3.39	0.27	144.4	5.9	242.7	54.5	50.3	34.9	2	7
42	20000716	1252	53.87	51.02	29.04	14.5	2.20	0.21	44.8	81.5	149.6	2.2	239.9	8.2	5	7
43	20000716	2153	41.16	51.06	28.95	12.5	2.87	0.26	341.8	51.8	110.4	26.2	214.1	25.7	5	5
44	20000810	1025	39.76	51.16	29.09	11.5	2.82	0.20	60.3	34.7	152.3	2.9	246.5	55.1	6	5
45	20000811	1448	56.10	51.23	29.33	9.5	2.84	0.45	306.2	5.6	202.1	68.1	38.4	21.1	3	7
46	20000813	1634	37.08	51.24	29.29	6.5	2.81	0.29	171.4	30.1	315.6	54.5	71.1	17.1	4	4
47	20000814	0810	46.26	50.96	29.03	18.5	2.04	0.19	297.6	63.3	166.9	18.1	70.5	18.9	5	7
48	20000825	0823	58.34	50.81	28.86	11.5	2.73	0.19	72.5	72.3	323.9	5.8	232.2	26.7	5	6
49	20000910	0915	3.66	50.90	28.75	13.5	2.35	0.31	162.8	5.5	262.8	60.9	69.9	28.4	3	7
50	20000928	2203	9.86	50.98	29.02	17.5	1.99	0.27	360.0	78.0	160.8	11.3	251.5	3.9	5	6
51	20000929	1029	32.56	51.39	29.30	16.5	3.33	0.36	338.1	10.2	239.4	40.3	79.6	47.9	2	4
52	20001008	0358	36.21	51.00	28.79	12.5	2.99	0.23	350.7	14.2	129.5	71.5	257.7	11.7	3	6
53	20001008	1241	5.96	51.00	28.79	13.5	2.46	0.22	310.4	17.4	176.6	65.6	45.7	16.5	3	6
54	20001013	1451	37.04	50.94	28.79	12.5	2.36	0.27	150.8	22.1	40.8	40.2	261.9	41.7	2	6
55	20001028	1705	32.50	51.34	29.02	11.5	2.80	0.15	14.1	65.2	135.1	13.4	230.2	20.5	5	5
56	20001105	0842	27.42	50.90	28.75	12.5	2.65	0.33	160.7	38.5	40.8	32.0	284.7	35.1	2	6
57	20001112	1858	20.69	51.02	28.89	12.5	2.28	0.29	360.0	72.0	146.0	15.1	238.6	9.6	5	6
58	20010128	1729	24.66	51.41	29.13	10.5	3.32	0.22	191.1	4.6	302.3	77.5	100.2	11.6	3	6
59	20010206	0303	59.22	50.83	28.80	11.5	2.59	0.33	90.0	84.0	318.1	4.0	227.8	4.5	5	7
60	20010209	0649	49.41	51.01	28.85	13.5	2.19	0.05	180.0	78.0	348.0	11.7	78.5	2.4	5	4
61	20010325	0012	39.01	51.06	28.92	11.5	2.82	0.20	153.8	76.6	349.3	12.9	258.5	3.5	5	7
62	20010325	2001	23.59	51.06	28.92	11.5	2.33	0.25	147.4	68.5	324.0	21.5	54.5	1.2	5	7
63	20010402	1833	26.39	50.84	28.89	9.5	1.87	0.14	31.6	54.1	161.5	25.0	263.5	24.0	5	5
64	20010402	2257	9.47	51.09	28.80	11.5	2.69	0.28	298.2	70.2	82.1	16.2	175.3	11.1	5	6
65	20010402	2315	36.68	51.08	28.79	12.5	2.59	0.18	307.6	55.1	115.7	34.3	209.5	5.6	4	5
66	20010402	2338	35.18	51.09	28.80	11.5	2.86	0.18	297.0	51.3	70.6	28.9	174.3	23.4	5	7
67	20010402	2343	41.76	51.08	28.80	11.5	2.77	0.18	327.4	68.5	86.4	10.8	180.1	18.4	5	7
68	20010402	2356	51.99	51.08	28.80	9.5	2.17	0.25	324.5	70.5	81.4	9.1	174.3	17.1	5	7
69	20010422	0311	18.12	51.42	29.30	11.5	3.28	0.84	324.9	12.0	76.2	59.7	228.6	27.4	3	7
70	20010506	0227	21.05	51.17	28.81	2.5	2.73	0.42	90.0	84.0	342.1	1.9	251.9	5.7	5	7
71	20010506	1813	23.11	51.39	29.22	11.5	2.91	0.34	43.6	64.8	301.4	5.7	208.8	24.5	5	7
72	20010508	0713	14.28	51.40	29.22	10.5	2.77	0.34	113.0	57.9	336.7	24.4	237.5	19.5	5	6

Примечание. Позиции: 1 – порядковый номер; 2–4 – дата и время; 5–7 – 3D координаты; 8 – магнитуда землетрясения; 9 – RMS; 10–15 – углы простирания и погружения осей T, X, P ; 16 – кинематический тип механизма очага (1 – сброс, 2 – сбросо-сдвиг, 3 – сдвиг, 4 – взбросо-сдвиг, 5 – взброс, 6 – взрез); 17 – число станций, определивших поляризацию в S -волне.

Note. Positions: 1 – item number; 2–4 – date and time; 5–7 – 3D coordinates; 8 – earthquake magnitude; 9 – RMS; 10–15 – angles of strike and dip of T, X, P axes; 16 – kinematic type of focal mechanism (1 – normal fault, 2 – strike-slip fault with normal component, 3 – strike-slip fault with reverse component, 4 – strike-slip fault with reverse component, 5 – reverse fault, 6 – vertical incision); 17 – number of stations that determined S -wave polarization.

4. АЛГОРИТМ УЧЕТА ПОЛЯРИЗАЦИИ S-ВОЛНЫ ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ МЕХАНИЗМА ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ

В настоящее время существуют и применяются два способа учета данных о смещениях в S -волне. Наиболее простой прием был предложен в работе С.Л. Юнги [Yunga, 1977]. Он заключается в том, что для известного угла выхода S -волны и направления смещения в ней рассчитывается ориентация псевдоосей сжатия P и растяжения T так, как будто луч выхода S -волны является нормалью к плоскости псевдоразрыва. В этом случае эту плоскость можно рассматривать как одну из нодальных плоскостей псевдоземлетрясения. При этом смещение в S -волне следует рассматривать как направление нормали для другой нодальной плоскости. Подобные построения позволяют ввести дополнительную регистрирующую псевдостанцию в азимуте, отличающемся на 90° от азимута на реальную станцию. Этот эффект эквивалентен увеличению числа регистрирующих станций, что крайне важно для определения фокального механизма при их малом количестве. Положения полученных таким образом псевдоосей P и T на единичной полусфере, построенной вокруг очага анализируемого землетрясения, можно интерпретировать соответственно как знак «-» (вниз на станции) и как знак «+» (вверх на станции) в первых вступлениях продольной волны P . Эти дополнительные знаки позволяют более точно построить нодальные плоскости, разделяющие на единичной полусфере области с разными знаками первых вступлений.

Другой способ был применен в работах [Stauder, Udias, 1963; Udias, 1964]. Здесь в качестве дополнительных данных использовались направления смещений в первых вступлениях в S -волне. Механический импульс, формирующийся в окрестности очага, отождествлялся со снимаемыми статическими упругими деформациями, усредненными по объему с характерным размером, соответствующим протяженности разрыва сплошности, в предположении нулевых значений усредненного в этом же объеме тензора вращения [Kostrov, 1975]. В этом случае поиск решения механизма очага землетрясения заменяется нахождением осей главных снимаемых напряжений, т.е. осей P и T .

Переход от динамической модели к статической позволяет получить данные о касательных напряжениях, снятых после землетрясения, на произвольно ориентированной площадке. С этими направлениями можно отождествлять движения S -волны. Таким образом, для любого луча P -волны (нормаль к плоскости), исходящего из очага, можно установить направления снятых касательных напряжений и, следовательно, ожидаемое направле-

ние движения в S -волне. Задача нахождения решения состоит в выборе такой ориентации главных осей снимаемого тензора напряжений, для которой наблюдается наилучшее его соответствие наблюдаемым направлениям поляризации S -волны на всех регистрирующих станциях. Минимальное число наблюдаемых данных соответствует необходимости определения трех эйлеровых углов, характеризующих направления трех главных осей механизма очага землетрясения.

Оба рассмотренных подхода в нашем случае не могут быть реализованы. Это связано с тем, что в работах [Yunga, 1977; Stauder, Udias, 1963; Udias, 1964] решения отыскивались по записям станций для землетрясений на достаточно больших расстояниях. В этом случае происходит достаточно четкое разделение сигнала на отдельные волновые пакеты, что позволяет уверенно выделять начало вступления S -волны. В нашем случае использовались записи локальных событий, поэтому велика неопределенность в идентификации начала вступления S -волны. По таким записям можно только определить направленность колебаний в S -волне (поляризацию), рассчитанную для различных участков сейсмической записи данной волны.

В нашем случае для решения проблемы предлагается использовать подход, похожий на примененный в работе С.Л. Юнги [Yunga, 1977]. Предлагается, так же, как и в этом методе, считать, что плоскость, нормальная к лучу выхода S -волны, является плоскостью тектонического разрыва с известным углом подвижки, но неизвестным направлением движения по ней. Заметим, что данная проблема похожа на хорошо известную в тектонофизике [Gushchenko, 1975, 1979] проблему расчета главных осей тензора напряжений в случае, когда для тектонических трещин (разрывов) невозможно определить знак смещения. Для ее решения О.И. Гущенко был разработан специальный подход, который нами был реализован для поиска решения механизмов очагов землетрясений.

В методе О.И. Гущенко показано, что отсутствие данных о знаке смещений вдоль трещины позволяет говорить о том, что искомые оси главных напряжений (сжатия и растяжения) могут располагаться в двух накрест лежащих октантах смежных квадрантов полусферы, построенной на трещине. При этом неизвестно, какая ось в каком из двух октантов располагается. Соответственно, возможны две пары таких октантов. При суммировании нескольких трещин без знаков смещения выделяется совокупность различных направлений, которым может отвечать ориентация искомым главных осей напряжений. Для определения индекса главного напряжения в методе О.И. Гущенко используется

одна или несколько трещин с установленным знаком смещения.

Совершенно очевидно, что проблема, решенная О.И. Гуценко в геологии, идентична рассматриваемой нами. Для ее решения мы использовали программу *Seism_S*, которая находит на единичной сфере области, в которых могут располагаться выходы осей T и P :

$$l_{P1}^k l_{L1}^k l_{P3}^k l_{L3}^k \geq 0, k = 1, K \quad (1)$$

так, как это делается в кинематическом методе [Gushchenko, Kuznetsov, 1979, Gushchenko, 1987]. Здесь l_{Pi} и l_{Li} ($i=1, 3$) – направляющие косинусы с главными осями искомого тензора снимаемых напряжений T и P с направлениями поляризации волны P (выход луча) и вектора L , образующего ортогональную тройку с этим направлением и направлением поляризации волны S .

Программа *Seism_S* опирается на разбиение единичной полусферы на ноды, отстоящие друг от друга на углы, близкие к 6° . Для каждого нода проверяется возможность его определения в качестве выхода на полусферу одной из осей главных напряжений. Базисом этой программы является алгоритм метода катакластического анализа разрывных смещений [Rebetsky, 1996, 1997, 2003].

На рис. 4, а, показаны результаты нахождения положения осей T и P , полученные в результате работы программы *Seism_S* для набора сейсмических записей одного из землетрясений. Как видно на рис. 4, данные о знаках на станциях ABD и BRB лежат не в своих квадрантах, но вблизи нодальных плоскостей. Из пяти определенных на станциях знаков для данного механизма только два (станции DEL и ASH) достаточно далеко отстоят от нодальных плоскостей.

Векторы, определяющие направления поляризации S -волны, «разбегаются в стороны» от оси P . Это характерная графическая визуализация для совокупности направлений скольжения на зеркалах из однородной выборки сколов в кинематическом методе О.И. Гуценко.

Заметим, что в представленном случае, если бы мы имели только данные о знаках первых вступлений, то данное положение нодальных плоскостей было бы наиболее вероятным. Но на самом деле в нашем алгоритме данные о знаках первых вступлений не участвовали в определении положения этих плоскостей. Они были полностью определены по данным о направлениях поляризации S -волны. Точнее, в первую очередь были определены положения осей двух экстремальных снимаемых напряжений P и T , относительно которых затем и были проведены нодальные плоскости. При этом индексы этих осей (какая из них P , а какая T) можно было

определить, только используя данные о знаках первых вступлений.

При использовании данных о знаках первых вступлений P -волн каждому станционному определению присваивались три градации веса, определяющие степень их надежности: уверенные, недостаточно уверенные и возможные вступления. Вес учитывался в программе *Seism_S* для установления индексов главных осей снимаемых напряжений. Поскольку в алгоритме кинематического метода используются неравенства (1), данные только о направлениях поляризации S -волны на самом деле определяют некоторые локальные области на верхней полусфере (рис. 4), в которой могут находиться выходы осей двух главных экстремальных снимаемых напряжений P и T . Данные о знаках использовались при расчете экстремальных значений функции F , определяющей единственность положений искомым осей снимаемых напряжений P и T в области, удовлетворяющей системам неравенств (1):

$$F = \sum_{k=1 \dots K} \frac{s^k \cdot t^k}{|s^k| |t^k|} \quad (2)$$

где s^k – вектор поляризации в S -волне, t^k – вектор касательного напряжения на плоскости, нормальной к выходу сейсмического луча на поверхность.

Минимум функции F , определяющей сумму скалярных произведений единичных векторов s^k и t^k , отыскивается только в области возможных ориентаций осей P и T , локализованных на единичной полусфере неравенствами (1). На основе минимума функции F достигается наилучшее сближение наблюдаемых на станциях данных по поляризации S -волны с рассчитанными параметрами механизма очага. Точность полученного решения определяется значением функции F и является относительной величиной, т.е. речь может идти о большей точности определения по отношению к другому определению, полученному в рамках такого же подхода. В любом случае полученное решение определяет острый угол между векторами s^k и t^k .

Таким образом, использование одних только данных о направлении поляризации S -волны недостаточно для установки индексов осей главных напряжений (так же, как и в геологии). Иными словами, имея возможность по результатам предложенного выше расчета определять нодальные плоскости, мы не можем указать, какой из квадрантов является квадрантом сжатия, а какой – растяжения. Для решения этой проблемы необходимо существование твердо определенного хотя бы одного знака первого вступления P -волны. Эта часть расчета выполняется на завершающей стадии алгоритма.

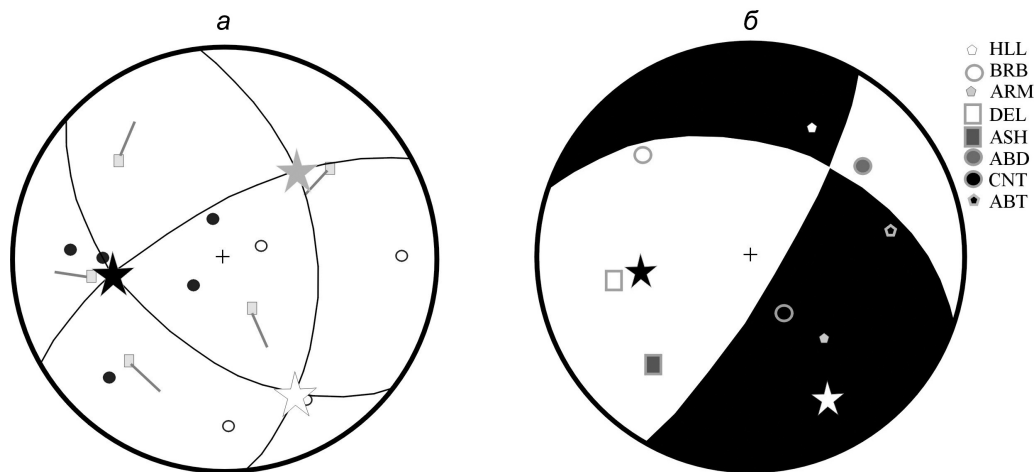


Рис. 4. Определение механизма очага землетрясения в виде двойного диполя на верхней полусфере (сетка Вульфа). Звездочка черного цвета – выход на полусферу оси P , звездочка белого цвета – оси T , звездочка серого цвета – оси X для тензора главных напряжений. a – результаты определения поляризации S -волны на пяти станциях (для остальных станций качественного результата не получено) в виде прямоугольника, соответствующего положению луча сейсмической волны на поверхности фокальной полусферы, и короткой линии, указывающей направление погружения оси поляризации (она лежит в плоскости, перпендикулярной лучу). Залитые черным и белым цветом кружки – выходы дополнительных осей соответственно P_n и T_n при использовании подхода С.Л. Юнги [Yunga, 1977]. b – изображение механизма очага с постанционными (справа сверху) данными о знаках в первых вступлениях волны P . Кружок отвечает движению на станции вверх, квадрат – вниз, маленький пятиугольник для соответствующих станций означает неуверенное определение поляризации в S -волне для них (станции HLL, ARM, ABT не участвовали в определении механизма очага, и на рисунке (a) их данные не показаны).

Fig. 4. Earthquake focal mechanism solution as a double dipole on the upper hemisphere (Wulff net). On the hemisphere: black star – P axis; white star – T axis; grey star – X axis, for the principal stress tensor. a – determined S -wave polarization at five stations (quality results were not obtained for other stations), shown as a rectangle, corresponding to the position of the seismic wave beam on the surface of the focal hemisphere, and a short line indicating the dip direction of the polarization axis (which lies in the plane perpendicular to the line). Black and white circles mark the points of additional axes, respectively, P_n and T_n , using the method by S.L. Yunga [1977]. b – focal mechanisms with station data (right top) on signs of the first arrivals of P -wave. Circle – upward motion at the station; square – downward motion; small pentagon – uncertain polarization determined for S -wave at respective stations (data from stations HLL, ARM and ABT were not included in the focal mechanism determination and are not shown in Figure 4, a).

В табл. 3 представлены механизмы очагов для 72 землетрясений, которые были определены согласно рассмотренному выше алгоритму. Следует отметить, что единственная «ручная» поправка определения фокального механизма землетрясения (номер 70 табл. 3) была связана с тем, что данные о знаках первых вступлений P -волны на верхней полусфере попадали в узкую зону вдоль выходов нодальных плоскостей. Поскольку полученный прямо из программы *Seism_S* без поправки фокальный механизм отвечал сбросу, а в ближайших к нему определениях (рис. 5, кластер 11) имели место взбросы, для него было произведено переименование осей P и T .

Следует отметить, что в созданном алгоритме расчета предусмотрена возможность определения параметров очага землетрясения не только в виде двойного диполя, но и тензора сейсмического момента. В приведенных ниже результатах дается значение коэффициента Лоде – Надаи (μ_σ), определяющего вид этого тензора.

5. РЕЗУЛЬТАТЫ РЕКОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ПО ДАННЫМ ЛОКАЛЬНОЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ СЕТИ В РАЙОНЕ ПОЛУОСТРОВА БУШЕР

При реконструкции механизмов очагов землетрясений сейсмоактивной территории на полуострове Бушер в пределах южного сегмента Центрально-Иранской плиты были выделены 15 кластеров.

1. Кластер в коре п-ва Бушер.
2. Кластер к северо-западу от п-ва Бушер (морской).
3. Кластер к юго-востоку от п-ва Бушер (морской).
4. Кластер к юго-западу от п-ва Бушер (морской).
5. Кластер к востоку от острова Аббасак к северу от п-ва Бушер (побережье).
6. Кластер к северо-востоку от п-ва Бушер (побережье).

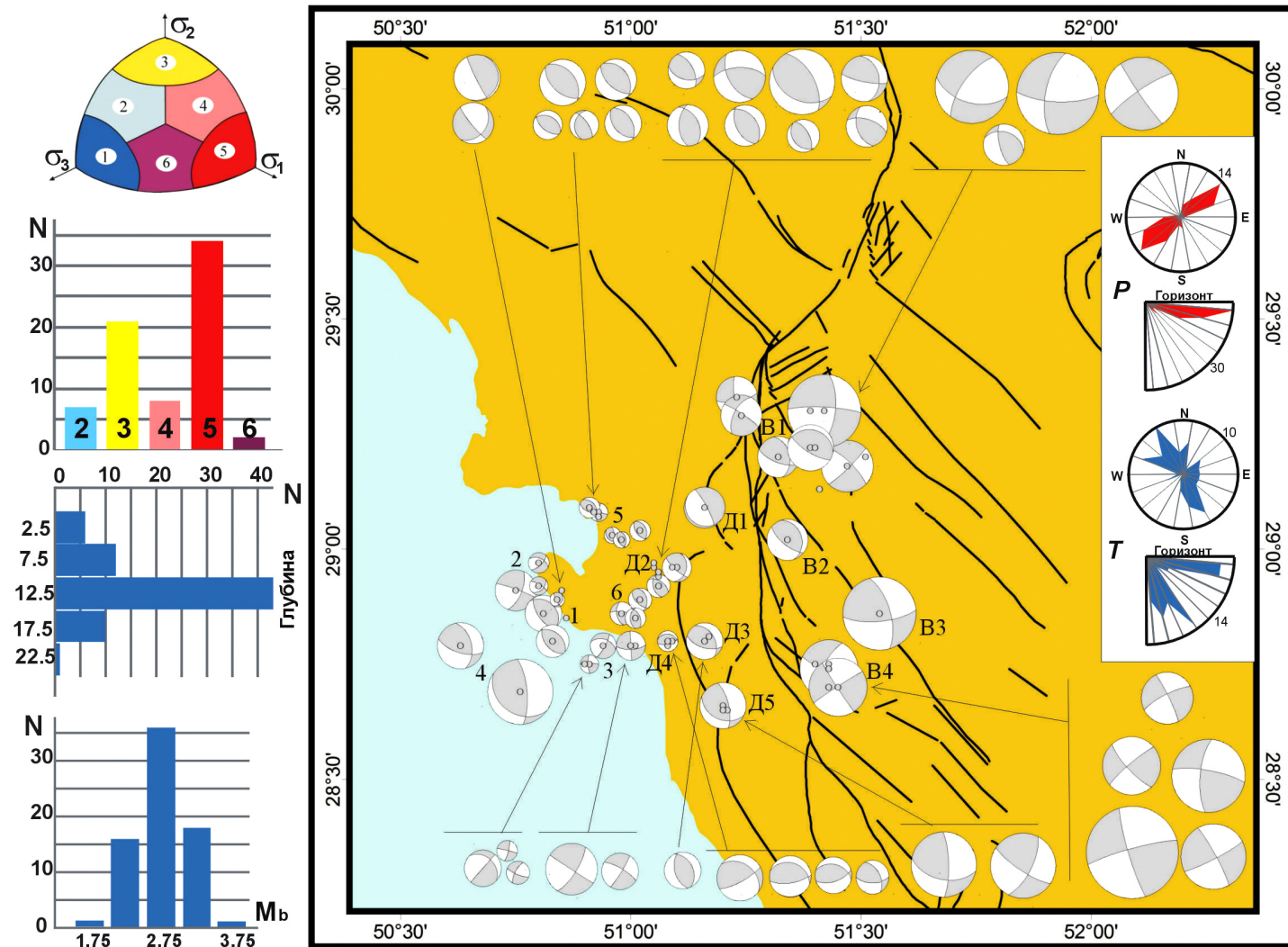


Рис. 5. Карта распределения механизмов очагов землетрясений с $M_b=1.5-3.5$ в приближении двойным диполем для выделенных выше кластеров (позиция 17 в табл. 3). Часть механизмов очагов вынесена к рамке рисунка, поверх механизмов показаны эпицентры землетрясений. Справа (сверху вниз) показаны роза-диаграммы для наиболее представительных углов простирания и погружения осей T и P , слева – 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, 6 – взрез), диаграммы представительности кинематических типов механизмов, а также глубин и магнитуд землетрясений.

Fig. 5. Map of epicenters of earthquakes with $M_b=1.5-3.5$ and their fault plane solutions for the clusters (column 17 in Table 3). Part of the focal mechanisms is shown at the frame of the figure; earthquake epicenters are shown over the mechanisms. Right (top to bottom) – rose diagrams for the most representative angles of strike and dip of T and P axes. Left – graphical separation of the mechanisms by kinematic types (areas of different colors show the axis position to the zenith: 1 – normal fault, 2 – strike-slip fault with normal component, 3 – strike-slip fault, 4 – strike-slip fault with reverse component, 5 – reverse fault, 6 – vertical incision). The diagrams show the representativeness of the kinematic types of the mechanisms, depths and magnitudes of earthquakes.

7. Группа кластеров Дельвар-Манд (Д) к востоку от п-ва Бушер.

8. Группа кластеров Боразджанской флексурно-разрывной зоны (В).

На рис. 5 показана карта распределения в районе исследования механизмов очагов землетрясений всех кластеров.

Результаты выполненного анализа отражены в сводных роза-диаграммах для ориентации осей P и T (рис. 5, схема). Как видно, наиболее представительными для погружения оси T являются направления 150 и 330° , а наиболее часто встречающимися являются углы погружения 10 и 55° . Для погружения осей P наиболее представительными явля-

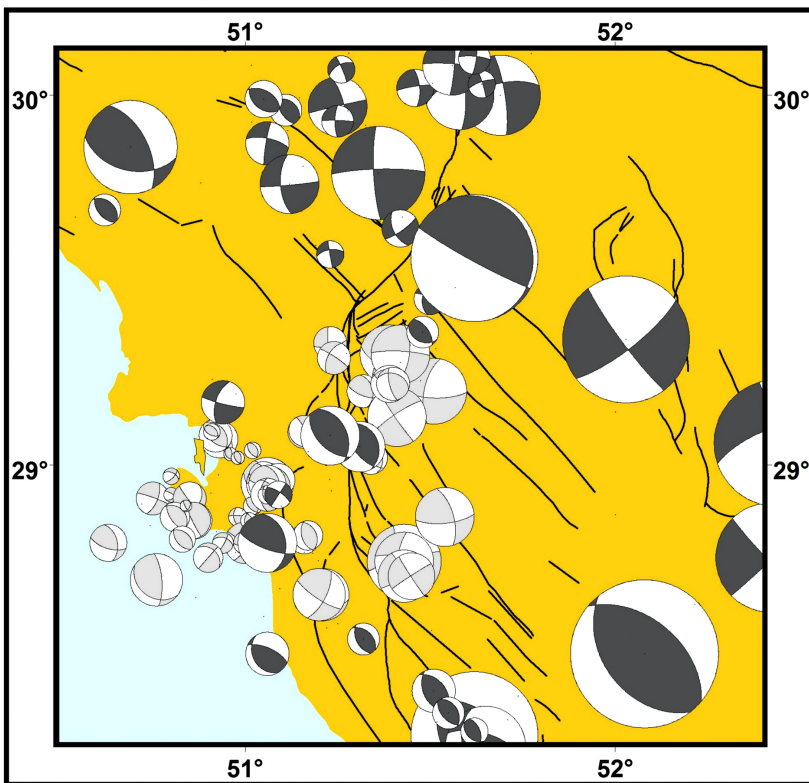


Рис. 6. Фокальные механизмы землетрясений, полученные в данной работе (малые кружки со светло-серой заливкой), и механизмы очагов землетрясений из каталога «Global CMT Project» (большие кружки с темно-серой заливкой), представленные на схеме разломов (черные линии) исследуемой территории.

Fig. 6. Schematic map of the study area, showing faults (black lines) and the earthquake focal mechanisms computed in this study (small light-grey circles) and reported in the Global CMT Project Catalogue (large dark-grey circles).

ются направления 50 и 230°. Оси практически везде имеют пологое погружение, наиболее выраженное значение которого 5°. Также на схеме рис. 5 показана диаграмма, характеризующая распределение различных типов механизмов в кинематической (геологической) интерпретации, а также графический способ разделения механизмов по кинематическим типам (деление на шесть типов). Как видно, наиболее распространены взбросы и сдвиги. Обратим внимание на небольшое число взрезово-подвиговых механизмов (одна из нодальных плоскостей субвертикальна, а вторая очень пологая), основная часть которых проявлена в коре побережья полуострова Бушер. При этом на поверхности полуострова наблюдаются структуры типа вертикальных взрезов, вытянутые широтно с достаточно крутыми, почти вертикальными стенками высотой в несколько десятков метров. По результатам расчетов не получено механизмов, в виде чистых сбросов (одно определение было поправлено вручную, как было отмечено выше), хотя имелось достаточное число событий с близкими к ним механизмами в виде сбросо-сдвигов (6) и взрезов (2).

6. ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов механизмов показали, что в коре исследуемого региона существует два крупных блока с резко различающимися кинематиче-

скими типами механизмов очагов землетрясений. В земной коре Казерун-Боразджанской зоны разломов (к востоку от основного разлома) преобладают сдвиговые механизмы в очагах землетрясений. В свете современных представлений о тектонической деформации земной коры Загроса можно предположить, что в этих сдвиговых механизмах реализовались преимущественно плоскости подвижки с южным и юго-восточным простиранием. В континентальной части вдоль побережья Персидского залива и разлома Манд наблюдаются механизмы очагов землетрясений в виде взбросов и взбросо-сдвигов. В зоне перехода от коры континента к коре залива имеет место сочетание механизмов в виде сдвигов и взрезов (для полуострова Бушер).

Таким образом, северо-восточная часть района наших исследований попадает в южное окончание области сдвиговых деформаций земной коры Казерун-Боразджанской зоны в пределах складчатой структуры Загрос, что показано более детально на рис. 6, на котором приведены данные СМТ решений для 41 землетрясения из каталога «Global CMT Project» с $4.9 < M_w < 6.0$. Здесь же приведены фокальные механизмы землетрясений по результатам наших решений.

Отметим, что рассредоточенная зона тектонических сдвигов в северной и восточной части рис. 6 удовлетворительно маркируется фокальными механизмами со сдвиговым типом подвижки. В какой-

то степени это относится и к нашим определениям фокальных механизмов. Так, если к западу и юго-западу от Казерунского разлома преобладают фокальные механизмы с надвиговым типом подвижки в согласованном с тектоникой направлении, то в центральной части выделяется группа фокальных механизмов сдвигового типа с ориентацией нодальных плоскостей, близкой к таковой в фокальных механизмах по данным глобальной сейсмической сети. В нашем случае это может служить указанием достоверности 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 карты разломной тектоники рис. 1 следует, что Казерунский разлом является западным ограничением области горизонтальных сдвигов, которая от 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 у Загроса и постепенно затухает к югу. Здесь надвиговая компонента начинает преобладать над сдвиговой. Вероятно, надвиговые разломы Кормудж и Гир следует рассматривать как южное ограничение этой региональной зоны сдвигов.

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе предложен и апробирован на реальных данных алгоритм определения механизмов очагов локальных землетрясений, предусматривающий в качестве дополнительной информации поляризацию *S*-волн. Подобный алгоритм опирается на практику тектонофизических исследований зеркал скольжения, для которых невозможно установить знак смещения. В сейсмологии данный алгоритм

может быть востребован в случаях, когда записи не позволяют провести полноценную инверсию волновых форм, а знаков о первых вступлениях *P*-волн недостаточно для уверенного определения нодальных плоскостей.

Алгоритм реализован на примере анализа 72 слабых землетрясений, записанных в 1999–2001 гг. локальной сетью ИФЗ РАН в районе полуострова Бушер.

Для северного участка изученного региона полученные механизмы очагов отчетливо согласуются с опубликованными данными о напряженном состоянии земной коры исследуемого района.

Для коры полуострова Бушер получены механизмы очагов типа взрез-поддвигов. Сопоставление этих данных с тектоническим строением региона позволяет предположить, что здесь в очагах землетрясений реализуется вертикальная нодальная плоскость, т.е. механизмы землетрясений имеют взрезовой тип.

Геодинамика исследуемого региона, находящегося в пределах области сопряжения тектонических провинций Фарс и Дезфул, определяется ее принадлежностью к западному окончанию зоны сдвига, которая представлена серией субмеридиональных сдвигов, простирающихся с севера от Загроса к побережью, где они образуют структуру типа конского хвоста. При расширении с севера на юг области структурообразования происходит затухание амплитуды сдвигов, что выражается в преобладании в коре побережья Ирана механизмов очагов землетрясений, соответствующих взбросам, надвигам и даже взрезам вблизи района строительства АЭС Бушер.

8. БЛАГОДАРНОСТИ

Статья подготовлена в рамках исследований, поддержанных на завершающей стадии работ грантом РФФИ 17-05-01193.

9. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Balakina L.M., Vvedenskaya A.V., Golubeva N.V., Misharina L.A., Shirokova E.I., 1972. The Field of Elastic Stresses of the Earth and Earthquake Focal Mechanisms. Nauka, Moscow, 191 p. (in Russian) [Балакина Л.М., Введенская А.В., Голубева Н.В., Мишарина Л.А., Широкова Е.И. Поле упругих напряжений Земли и механизм очагов землетрясений. М.: Наука, 1972. 191 с.].
- Berberian M., 1983. Continental Deformation in the Iranian Plateau (Contribution to the Seismotectonics of Iran, Part IV). Geological Survey of Iran. Report 52. 625 p.
- DeMets C., Gordon R.G., Argus D.F., Stein S., 1990. Current plate motion. *Geophysical Journal International* 101 (2), 425–478. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1990.tb06579.x>.
- Gushchenko O.I., 1975. The kinematical principle of reconstruction of directions of major stresses (from geological and seismological data). *Doklady AN SSSR* 225 (3), 557–560 (in Russian) [Гущенко О.И. Кинематический принцип реконструкции направлений главных напряжений (по геологическим и сейсмологическим данным) // Доклады АН СССР. 1975. Т. 225. № 3. С. 557–560].

- Gushchenko O.I., 1979. The method of kinematic analysis of destruction structures in reconstruction of tectonic stress fields. In: Fields of stress and strain in the lithosphere. Nauka, Moscow, 7–25 (in Russian) [Гущенко О.И. Метод кинематического анализа структур разрушения при реконструкции полей тектонических напряжений // Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 7–25].
- Gushchenko O.I., 1987. Determination of tectonic stress fields by the kinematic analysis of fracture structures in relation to seismic hazard forecasting. In: M.A. Sadovsky (Ed.), Nature and methodology for determining tectonic stresses in the upper crust. Kola Branch of the USSR Acad. Sci., Apatity, p. 35–52 (in Russian) [Гущенко О.И. Определение тектонических полей напряжений методом кинематического анализа структур разрушения в связи с прогнозом сейсмической опасности // Природа и методология определения тектонических напряжений в верхней части земной коры / Ред. М.А. Садовский. Апатиты: Кольский филиал АН СССР, 1987. С. 35–52].
- Gushchenko O.I., Kuznetsov V.A., 1979. Determination of principal stress orientations and ratios from the combinations of directions of strike-slip tectonic displacements. In: A.S. Grigoriev, D.N. Osokina (Eds.), Fields of stress and deformation in the lithosphere. Nauka, Moscow, p. 60–66 (in Russian) [Гущенко О.И., Кузнецов В.А. Определение ориентаций и соотношения величин главных напряжений по совокупности направлений сдвиговых тектонических смещений // Поля напряжений и деформаций в литосфере / Ред. А.С. Григорьев, Д.Н. Осокина. М.: Наука, 1979. С. 60–66].
- Herrmann R.B., 2013. Computer programs in seismology: An evolving tool for instruction and research. *Seismological Research Letters* 84 (6), 1081–1088. <https://doi.org/10.1785/0220110096>.
- Kostrov B.V., 1975. Mechanics of Tectonic Earthquake Source. Nauka, Moscow, 176 p. (in Russian) [Костров Б.В. Механика очага тектонического землетрясения. М.: Наука, 1975. 176 с.].
- Kreemer C., Holt W.E., Haines A.J., 2003. An integrated global model of present-day plate motions and plate boundary deformation. *Geophysical Journal International* 154 (1), 8–34. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.01917.x>.
- Lee W.H.K., Lahr J.C., 1975. HYPO71: A Computer Program for Determining Hypocenter, Magnitude, and First Motion Pattern of Local Earthquakes. U.S. Geological Survey Open File Report 75-311. California, Menlo-Park, 113 p.
- McClusky S., Reilinger R., Mahmoud S., Ben Sari D., Tealeb A., 2003. GPS constraints on Africa (Nubia) and Arabia plate motions. *Geophysical Journal International* 155 (1), 126–138. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2003.02023.x>.
- Rebetsky Yu.L., 1996. I. Stress-monitoring: Issues of reconstruction methods of tectonic stresses and seismotectonic deformations. *Journal of Earthquake Prediction Research* 5 (4), 557–573.
- Rebetsky Yu.L., 1997. Reconstruction of tectonic stresses and seismotectonic strains: Methodical fundamentals, current stress field of Southeastern Asia and Oceania. *Transactions (Doklady) of the Russian Academy of Sciences / Earth Science Sections* 354 (4), 560–563.
- Rebetsky Yu.L., 2003. The Stress-Strain State and Mechanical Properties of Natural Massifs from Earthquake Focal Mechanism Data and Structural-Kinematic Characteristics of Fractures. PhD Thesis (Doctor of Physics and Mathematics). United Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, 455 p. (in Russian) [Ребецкий Ю.Л. Напряженно-деформированное состояние и механические свойства природных массивов по данным о механизмах очагов землетрясений и структурно-кинематическим характеристикам трещин: Дис. ... докт. физ.-мат. наук. М.: ОИФЗ РАН, 2003. 455 с.].
- Seismic studies in the regional and sub-regional scale for the Block 2 site of the Bushehr Nuclear Power Plant*, 2001. Report. Institute of Physics of the Earth of RAS, Moscow, Vol. 2, 179 p. (in Russian) [Проведение сейсмологических работ в региональном и субрегиональном масштабах для площадки блока 2 АЭС «Бушер». Отчет. М.: ИФЗ РАН, 2001. Т. 2. 179 с.].
- Sokos E.N., Zahradník J., 2008. ISOLA a Fortran code and a Matlab GUI to perform multiple-point source inversion of seismic data. *Computers & Geosciences* 34 (8), 967–977. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.07.005>.
- Sokos E.N., Zahradník J., 2013. Evaluating centroid-moment-tensor uncertainty in the new version of ISOLA software. *Seismological Research Letters* 84 (4), 656–665. <https://doi.org/10.1785/0220130002>.
- Stauder W., Udías A., 1963. S-wave studies of earthquakes of the North Pacific, Part II: Aleutian Islands. *Bulletin of the Seismological Society of America* 53 (1), 59–77.
- Udias A., 1964. A least squares method for earthquake mechanism determination using S-wave data. *Bulletin of the Seismological Society of America* 54 (6A), 2037–2047.
- Vernant P., Nilforoushan F., Hatzfeld D., Abbassi M.R., Vigny C., Masson F., Nankali H., Martinod J., Ashtiani A., Bayer R., Tavakoli F., Chéry J., 2004. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurements in Iran and Northern Oman. *Geophysical Journal International* 157 (1), 381–398. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02222.x>.
- Vvedenskaya A.V., 1969. Investigation of Stresses and Ruptures in Earthquake Foci by the Theory of Dislocations. Nauka, Moscow, 136 p. (in Russian) [Введенская А.В. Исследование напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. М.: Наука, 1969. 136 с.].
- Yunga S.L., 1977. On the definition of earthquake mechanism from arrivals of longitudinal and transverse seismic waves. *Doklady AN SSSR* 233 (6), 1076–1078 (in Russian) [Юнга С.Л. Об определении механизма землетрясения по вступлениям продольных и поперечных сейсмических волн // Доклады АН СССР. 1977. Т. 233. № 6. С. 1076–1078].



Ребецкий Юрий Леонидович, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
✉ e-mail: reb@ifz.ru

Rebetsky, Yuri L., Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
✉ e-mail: reb@ifz.ru



Лукк Альберт Артурович, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
e-mail: lukk@ifz.ru

Lukk, Albert A., Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
e-mail: lukk@ifz.ru



Татевосян Рубен Эдуардович, докт. физ.-мат. наук, зав. лабораторией
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
e-mail: ruben@ifz.ru

Tatevossian, Ruben E., Doctor of Physics and Mathematics, Head of Laboratory
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
e-mail: ruben@ifz.ru



Быкова Вера Вячеславовна, канд. физ.-мат. наук, в.н.с.
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН
123242, ГСП-5, Москва Д-242, ул. Большая Грузинская, 10, Россия
e-mail: vvb@ifz.ru

Bykova, Vera V., Candidate of Physics and Mathematics, Lead Researcher
O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth of RAS
10 Bol'shaya Gruzinskaya street, Moscow D-242 123242, GSP-5, Russia
e-mail: vvb@ifz.ru