

УДК 550.34

МИКРОСЕЙСМИЧНОСТЬ ПЕРСИДСКОГО ЗАЛИВА И ГОРНОГО МАССИВА ЗАГРОС СОГЛАСНО ДОННЫМ СЕЙСМОЛОГИЧЕСКИМ НАБЛЮДЕНИЯМ

© 2023 г. С. А. Ковачев^а, *, А. А. Крылов^а

^аИнститут океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский просп., 36, Москва, 117997 Россия

*e-mail: kovachev@ocean.ru

Поступила в редакцию 18.01.2023 г.

После доработки 03.08.2023 г.

Принята к публикации 04.09.2023 г.

Донные сейсмологические наблюдения в Персидском заливе за непродолжительный период позволили обнаружить слабые землетрясения с магнитудами ($M_L = -0.2-2.9$), очаги которых расположены в мантии под его акваторией и под горным массивом Загрос. На разрезе, построенном вкрест береговой линии Персидского залива, под горами Загрос проекции очагов обнаруженных землетрясений образуют сейсмофокальные слои, круто падающие в мантию на северо-восток до глубин 120–180 км. Пространственное распределение сильных и средней силы землетрясений, полученное по данным уточненного каталога землетрясений Геологической службы США и Международного сейсмологического каталога ISC, не противоречит распределению очагов микро- и слабых землетрясений, а дополняет его, образуя отдельный сейсмофокальный слой. Согласно полученным в результате донных сейсмологических наблюдений данным сейсмически активными является вся толща земной коры района и верхняя мантия, а не только верхние слои коры, как это представлено в ряде публикаций. Возможно, коллизионные процессы и сопровождающие их явления (мантийная сейсмичность и разрушение гранитного слоя земной коры) связаны с предполагаемым наличием и вращением поверхности земли с центром вращения в районе о. Кипр.

Ключевые слова: Персидский залив, сейсмичность, сейсмологические наблюдения, донный сейсмограф, микроземлетрясения, коллизия, глубина очага, сейсмофокальные слои

DOI: 10.31857/S0203030623700335, **EDN:** XJLVUA

ВВЕДЕНИЕ

Донные сейсмологические наблюдения с использованием высокочувствительных морских автономных сейсмических станций являются сложными и весьма затратными работами, которые необходимо проводить с целью получения данных для оценки сейсмической опасности при проектировании береговых сооружений повышенной ответственности, которой является АЭС Бушер. При этом получаемая информация о местных землетрясениях изучаемого района представляет несомненную ценность для решения также не только прикладных, но и общенаучных задач. Причем это справедливо даже с учетом того, что параметры, расстановки донных сейсмографов, ограниченные требованиями технического задания, не всегда являются оптимальными с точки зрения изучения местных землетрясений.

Опыт Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН показывает, что высокочувствительные донные сейсмографы, объединенные в сеть, способны за кратчайшие сроки накапливать большие объемы сейсмологической информа-

ции. Это происходит за счет того, что из-за низкого уровня сейсмического шума на дне моря они регистрируют большое количество микроземлетрясений, которые происходят гораздо чаще, чем сильные и умеренной силы землетрясения.

Практически каждый эксперимент с донными станциями в акваториях позволяет получить новые данные, которые приводят к необходимости пересмотра тектонических моделей исследуемых районов (см. например, [Соловьев и др., 1993; Kovachev et al., 1992; 2021; Solov'ev et al., 1989]).

В задачи настоящих исследований входило изучение пространственного распределения очагов слабых и микроземлетрясений района Персидского залива и гор Загрос с использованием высокочувствительных донных сейсмических станций.

Краткий тектонический обзор исследуемого района

Согласно [Allen et al., 2004] основным процессом, управляющим региональной геодинамикой исследуемого района является столкновение

Евразийской и Аравийской литосферных плит. Это столкновение деформирует территорию площадью 3 млн км² континентальной коры, что делает район Ирано-Турецкого плато одной из самых больших областей конвергентной деформации на Земле.

В работе [Paul et al., 2010] и других Персидский залив и горный массив Загрос, примыкающий к нему с северо-востока, рассматривается как результат коллизии Аравийской плиты и микроплит Центрального Ирана после закрытия океана Неотетис. Период времени, когда началась коллизия микроплит и Аравии вдоль горного массива Загрос, попадает во временной диапазон от позднего мелового периода до плиоцена [Berberian, King, 1981; Allen et al., 2004]. По представлению ряда исследователей Загрос является молодым континентом, а точнее континентальным коллизионным поясом [Бачманов, 2002; Vachmanov et al., 2004; Bird, 1978; Bird et al., 1975].

В пределах коллизионной зоны Аравия—Евразия, по мнению авторов работ [Allen et al., 2013; Şengör, Kidd, 1979], орогенные плато формируются в результате столкновения континент—континент, таким способом образовалось Турецко-Иранское нагорье. Плато формируются в процессе сближения континентов, в местах утолщения земной коры в сочетании с поднятием поверхности.

Границы коллизионной зоны Загрос—Персидский залив четко обрамляются топографическими и сейсмологическими структурами [Jackson, McKenzie, 1988]. Резкие фронты, выраженные в рельефе в Персидском заливе, определяют широтные границы района интенсивных активных деформаций также, как вдоль северной стороны Большого Кавказа и Копетдага.

Погружение (субдукция) Аравийской плиты под Загрос, происходившее в венде, постепенно заменялась коллизией согласно В.Г. Трифонову [Трифонов, 2017; Trifonov, 2010]. В северо-западной области Загроса Фарс выделены четыре зоны (рис. 1): Чешуйчатая, Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорная. Согласно предложенной В.Г. Трифоновым интерпретации эволюции Загроса [Трифонов, 2017, рис. 30], конвергентная деформация в зоне Главного надвига Загроса привела к возникновению перед его фронтом в Чешуйчатой зоне складок, подобных тем, что сейчас развиваются в Предгорной зоне (пологие складки с плавным падением на северо-восток). Эти складки непосредственно отражались в рельефе и, разрушаясь, служили источником обломочного материала.

Провинция Фарс отделена от провинции Дезфул Казерунской зоной разломов (см. рис. 1).

Описание геофизических полей Персидского залива и структуры земной коры района

Мощность земной коры изучаемого региона согласно модельным исследованиям, выполненным в работе [Montavalli-Anbaran et al., 2011], составляет порядка 40 км, увеличиваясь под горами Загрос до 60 км. Моделирование структуры земной коры Персидского залива и гор Загрос выполнялось в вышеупомянутой работе на основе гравиметрических данных, информации о тепловом потоке, рельефе района и отклонений от геоида. Было показано, что наиболее достоверным является четырехслойное модельное приближение земной коры Персидского залива и гор Загрос. Модель состоит из слоя осадков мощностью 10 км и плотностью 2.53 г/см³, верхней коры мощностью порядка 5 км и плотностью 2.8 г/см³, средней коры мощностью 8 км и плотностью 2.82 г/см³ и нижней коры мощностью 17 км и плотностью 2.95 г/см³.

Тепловой поток по данным [Pollac et al., 1993; The Global Heat ..., 2022] достигает величины порядка 40 мВт/м², увеличиваясь до 60–70 мВт/м² под горами Загрос. Гравитационные аномалии в редукции Буге и Фая не превышают минус 20 мГал в акватории Персидского залива. В районе гор Загрос аномалии Фая возрастают до 0 мГал, а аномалии в редукции Буге уменьшаются до минус 200 мГал и менее [Dekhani, Makris, 1988].

Магнитное поле в акватории Персидского залива представлено локальными аномалиями небольшой амплитуды (не более 70 нТ) [EMAG2v3, 2022].

Обзор исследований сейсмичности района

В статье [Heidari, Mirzaei, 2009] указывается, что пояс разломов Загроса взбросового типа, как часть Альпино-Гималайского орогенного пояса, является одной из наиболее активных континентальных зон коллизии на Земле. Он протягивается от гор Тарус в юго-восточной Турции до Минабского разлома, расположенного в восточной части Ормузского пролива в Южном Иране. В структурном плане его образование относится к продолжающейся конвергенции между Аравийской плитой и Центрально-Иранским микроконтинентом.

Согласно ряду работ о сейсмичности района Загрос, выпущенных в 1980-х гг. прошлого столетия [Bird et al., 1975; Nowroozi, 1971], очаги землетрясений здесь находятся в верхнем слое земной коры и верхней части мантии. При этом отмечается, что нижняя кора района асейсмична. Эти работы ссылаются на Международный сейсмический каталог (ISC) и Каталог Геологической службы США (USGS), в которых содержались данные об очагах землетрясений в верхней коре и

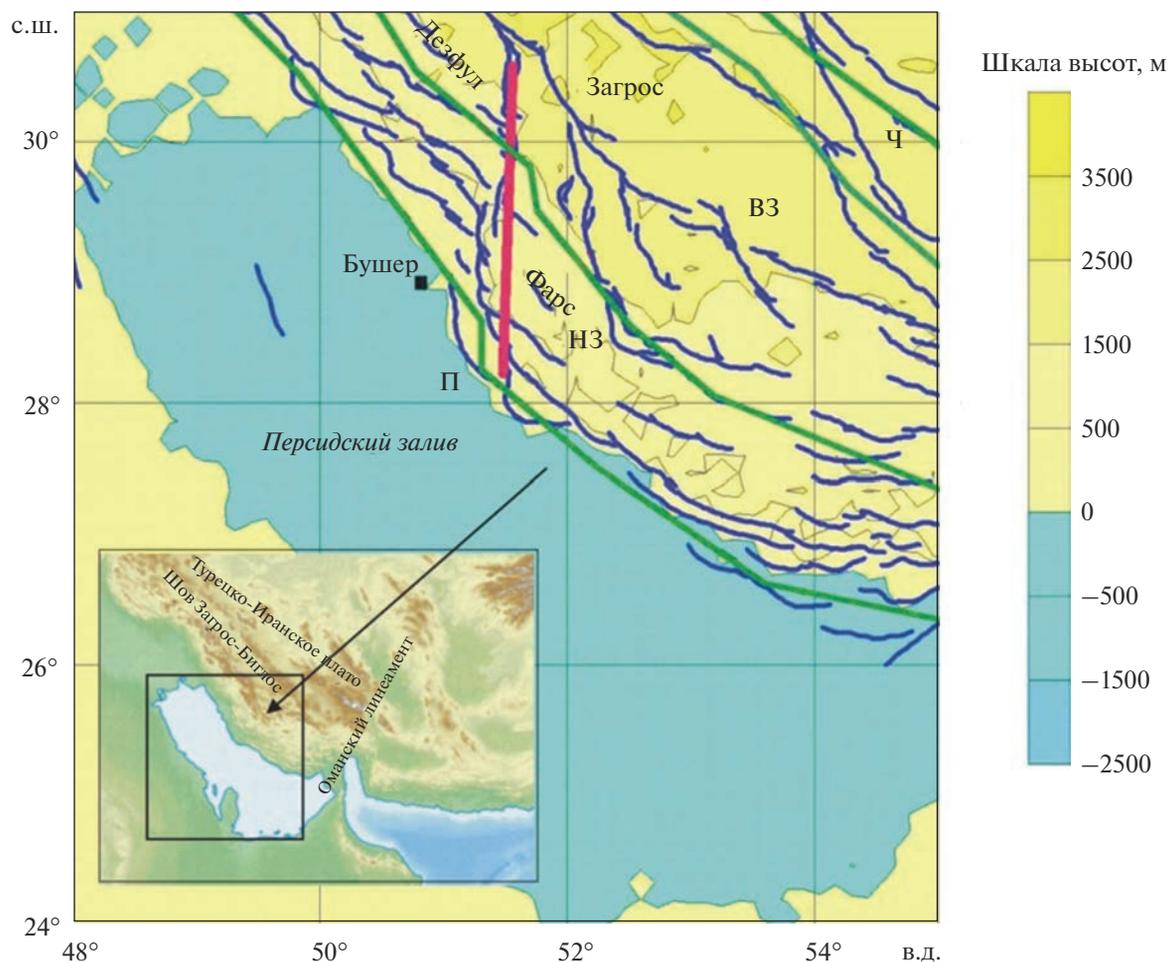


Рис. 1. Тектоническая схема Персидского залива и Загроса, построенная по данным об активных разломах [База данных ..., 2022] и зон складчатости [Алджабасини, 2021].

Синие линии показывают положение разломов. П – предгорная зона, НЗ – зона Низкого Загроса, ВЗ – зона Высокого Загроса, Ч – Чешуйчатая зона, фиолетовая толстая линия – Казерунская зона разломов. Зеленые линии – границы зон складчатости.

верхней мантии под горами Загрос, но не в нижней коре. В других, более поздних исследованиях, это предположение было пересмотрено, авторы утверждают, что землетрясения происходят только в верхней части земной коры [Baker et al., 1993; Nowroozi, 1971; Tatar et al., 2004].

В работе [Shahvar et al., 2013] утверждается, что обширная территория Иранского нагорья, первоначально подразделялась на три основных тектонических региона (Загрос, Альборз и Центральный Иран), но она может де-факто быть разделена на два района только потому, что параметры сейсмичности в Альборзе и Центральной зоне Ирана статистически неразличимы. Все эти регионы пережили несколько разрушительных землетрясения ($M \geq 6.0$), в основном приуроченные к верхней части коры. В регионе Альборз очаги землетрясений в нижней коре и мантии обусловлены Макранской зоной субдукции [Shahvar et al., 2013].

В работе [Короновский и др., 2022] утверждается, что сейсмическая активизация Загроса значительным образом определяется техногенным воздействием на недра в пределах Мессопотамской низменности и Персидского залива. Это, скорее всего, справедливо для мелкофокусной сейсмичности (верхние слои земной коры), но вряд ли актуально для мантийной сейсмичности района.

В статье [Bird et al., 1975] термические режимы зон конвергенции континент–континент моделируются методом конечных разностей, в предположении, что имеет место некоторая субдукция континентальной коры. Профили силы тяжести и теплового потока генерируются из тепловых моделей. Погружающаяся плита остается холодной, за исключением ее верхней поверхности, где происходит фрикционный нагрев. В работе [Bird et al., 1975] представлена модель геомет-

рии океанических и континентальных плит в горах Загрос, которая удовлетворяет гравитационным, тепловым, сейсмическим и геологическим ограничениям. Континентальный подвиг начинается вдоль нового разлома на краю Персидского залива, изолирующего Аравийский континентальный шельф от процесса субдукции. Проскальзывания по этому разлому относятся к плейстоцену и, вероятно, не превышают 30 км. Считается, что субдукция континентальной коры в зоне дробления, скорее всего, незначительна.

К. Бекер с соавторами [Baker et al., 1993] исследуют сейсмоактивный линеймент Казерун (см. рис. 1), который представляет собой поперечную долину длиной около 200 км, косо пересекающую правильные антиклиналы складчатого пояса Загрос на юго-западе Ирана. На его северном конце он представляется явным разломом, который можно нанести на карту на поверхности. Оси антиклиналей вымирают или изгибаются в сторону этой долины, но не пересекают ее. Шесть землетрясений средней силы, произошедших вблизи линии Казерун и в пределах 25-километровой зоны, сопровождалось правосторонним сдвиговым движением, параллельным простираению долины. Они указывают на то, что линия Казеруна является поверхностным выражением погребенного сдвигового разлома. Векторы смещения в этих сдвиговых землетрясениях отличаются от векторов соседних землетрясений взброса, что позволяет предположить, что линеймент Казерун компенсирует некоторое сокращение между Аравией и центральным Ираном за счет удлинения гор Загрос, параллельного их простираению. Глубина центра и размеры очагов этих землетрясений в сочетании с отсутствием сейсмогенных поверхностных разломов в Загросе позволяет предположить, что все эти землетрясения связаны с разломами в метаморфическом фундаменте под осадочным чехлом. Таким образом, сейсмичность линеймента Казерун демонстрирует, как латеральные нарушения регулярности складчатого пояса могут возникать из-за разломов в фундаменте, а не только из-за боковых уклонов между надвиговыми пластинами, которые деформируют осадочный чехол [Baker et al., 1993].

А. Мэгги с соавторами [Maggi et al., 2000] смоделировали телесеismicческие волны P и SH для определения глубины очага землетрясений в нескольких регионах Земного шара, включая горы Загрос, для событий, которые, представлены в каталогах с очагами в нижней части коры или верхней мантии. Моделирование показало, что очаги всех 13 событий, произошедших под горами Загрос, находились в пределах верхних 20 км земной коры.

Изучение микросейсмичности, результаты которого описаны в работе [Tatar et al., 2004], пока-

зало, что очаги слабых землетрясений образуют под горами Загрос рассеянную область землетрясений в пределах всей земной коры.

В работе [Adams et al., 2009] были переопределены очаги 6 землетрясений из района гор Загрос. Эти события были выбраны для изучения, потому что в доступных каталогах сообщалось, что их очаги расположены в нижней части земной коры и верхах верхней мантии под горами Загрос. Результаты показали, что все шесть событий произошли в верхней части земной коры (глубина <11 км) и имели надвиговые механизмы. Авторы утверждают, что это открытие подтверждается другими исследованиями, которые ставят под сомнение существование сейсмических событий в нижней части земной коры или мантии под горами Загрос. Однако, в этой работе моделировались времена прихода фаз pP , т.е. волны, отраженные от поверхности “земля–воздух” в районе эпицентра землетрясения и строились синтетические сейсмограммы с учетом механизма очагов землетрясений. Таким образом, авторы настоящего исследования пытались подтвердить гипотезу о том, что все сильные и умеренные землетрясения происходят в районе гор Загрос в верхних слоях земной коры. Необходимо отметить, что выделение фазы pP на сейсмограммах крайне затруднительно, т.к. эта фаза приходит на фоне волн P , но при этом она имеет меньшую амплитуду, чем вступление P волн. На наш взгляд результаты этой работы выглядят весьма сомнительными.

В работе [Maggi, Priestley, 2005] утверждается, что Ближний Восток представляет собой тектонически сложный регион, состоящий из ландшафтов, столь же разнообразных, как докембрийские щиты и молодые орогены. Доминирующей тектонической особенностью является Турецко-Иранское плато (см. рис. 1, врезка), недавно приподнятый, сейсмически активный регион вдоль шва Загрос–Битлис (см. рис. 1, врезка), образовавшийся в результате столкновения Аравийской плиты с Евразией. Методом сейсмической томографии поверхностных сейсмических волн авторы настоящей работы обнаруживают низкоростную аномалию в верхах мантии под Турецко-Иранским плато. О разуплотнении мантийных пород здесь также свидетельствуют аномалии геофизических полей (гравитационные, теплового потока) и наличие базальтового вулканизма. Авторы считают, что в такой ситуации наличие очагов землетрясений в мантии под Турецко-Иранским плато маловероятно.

В работах [Allen et al., 2013; Casciello et al., 2009] утверждается, что сейсмическая активность с очагами землетрясений магнитудой $M_w > 5$ ограничена изолинией высот 1250 м в горах Загрос.

В статье [Allen et al., 2006] приводятся сведения о сдвиговых разломах и связанных с ними землетрясениях района Загрос. Здесь утверждается, что

они имеют различные функции в зонах коллизии: это не только перенос материала по горизонтали (как в Турции), но и утонение земной коры (структуры Загрос и Алборз) за счет вращения сдвиговых разломов вокруг вертикальной оси.

В работе [Абрамов, Алджабасини, 2019] обозначены основные тектонические причины возникновения землетрясений района Персидского залива. Это коллизионное столкновение плит и различных тектонических блоков, глубинные структурные, фазовые и вещественные преобразования, обусловленные влиянием на литосферу потоков активной астеносферы, а также структурные трансформации, связанные с отслойкой осадочного чехла и верхней части земной коры.

В статье [Nissen et al., 2011] приводятся данные о микроземлетрясениях, происходящих в различных районах исследуемой области. Эта информация была получена с помощью временных локальных сетей сейсмических станций. Микросейсмичность концентрировалась в пределах фундамента, достигая глубин порядка 20 км и местами 30 км. Сильные землетрясения ($M_w > 5$) происходят, как правило, в диапазоне 4–14 км, некоторые достигают 20 км (и 28 км вдоль Оманского линеамента).

Аналогичный результат получен при наблюдениях за микроземлетрясениями в Центральном Загросе [Tatar et al., 2004]. В данном случае активной оказалась верхняя часть земной коры.

Согласно материалам работы [Rostam et al., 2016], Оманский линеамент на юге Ирана (см. рис. 1, врезка) является переходной зоной, разделяющей две абсолютно различающиеся в тектоническом аспекте зоны: Макранскую зону субдукции и Загросскую зону континентальной коллизии. По данной сейсмической службе Ирана [Iranian Seismological Center, 2022] в Макранской зоне наблюдается сейсмическая активность в мантии на глубинах до 150 км. В Загросской зоне глубина очагов не превышает 50 км. По этим данным в первой и второй зонах активна вся толща земной коры, в том числе ее нижний слой.

В процессе анализа длиннопериодных телесейсмических сигналов P и SH объемных сейсмических волн были переопределены глубины очагов 16 землетрясений из района гор Загрос [Talebian, Jackson, 2002, 2004]. В результате расчетов оказалось, что полученные глубины очагов не превышали 20 км.

Режимные сейсмологические наблюдения на суше в районе Бушерской АЭС [Лукк, Ребецкий, 2018; Ребецкий и др., 2017] показали, что в районе Казерунского линеамента практически все очаги микроземлетрясений приурочены к верхней части земной коры района, в нижней коре и в мантии землетрясения не происходят.

Судя по приведенному обзору работ по изучению сейсмичности региона гор Загрос и акватории Персидского залива, многие авторы, но, все же, не все склоняются к мнению об отсутствии очагов землетрясений в нижней коре и мантии, по крайней мере, в континентальной части региона. В целом, вопрос о наличии мантийной сейсмичности можно считать открытым и для попытки его решения были использованы высокоточные наблюдения с помощью высокочувствительных автономных донных сейсмографов, устанавливаемых на дно Персидского залива в районе АЭС Бушер. Основной задачей этих работ было получение сейсмологической информации, необходимой для оценки сейсмической опасности строящейся АЭС Бушер, а также выполнения глубинного сейсмического зондирования земной коры Персидского залива [Ковачев, Ганжа, 2023; Ковачев и др., 2021a, 2021b].

АППАРАТУРА И МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

В работах по глубинному сейсмическому зондированию (ГСЗ) и изучению микроземлетрясений в акватории Персидского залива использовались донные сейсмографы (ДС) Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) и Объединенного Института физики Земли РАН (ОИФЗ РАН) [Зверев и др., 1978; Соловьев и др., 1993]. Каждым прибором регистрируются сигналы вертикального сейсмоприемника типа СВ-5 с собственной частотой 5 Гц. Дополнительно приборы ИО РАН были оборудованы гидрофонами и горизонтальными сейсмоприемниками СВ-5М. Регистрация сигналов от каждого датчика после усиления производится непрерывно на магнитную ленту способом прямой записи с высокочастотным подмагничиванием. Каждый сигнал регистрировался на двух амплитудных уровнях: грубым и чувствительном. Усиление сигналов на каждом уровне различается в 10–25 раз. В ДС использовались 6 информационных дорожек записи и 2 служебные, на которые записывались пилот-сигнал и марки времени. Частотный диапазон записи составлял 3–30 Гц по уровню 0.76, а суммарный динамический диапазон записи был от 60 до 75 дБ на двух амплитудных уровнях. Продолжительность регистрации составляла 5–14 сут и зависела от скорости движения магнитной ленты, определяемой решаемой задачей. В работах ГСЗ время записи рассчитывается по общему времени отработки одного профиля – от постановки ДС и прострелки до подъема ДС на поверхность. При постановке ДС для регистрации микроземлетрясений время работы устанавливается на максимум. Точность хода кварцевых часов была не хуже 0.02 с за 10 сут записи, что обеспечивалось стабильностью используемого в часах ДС

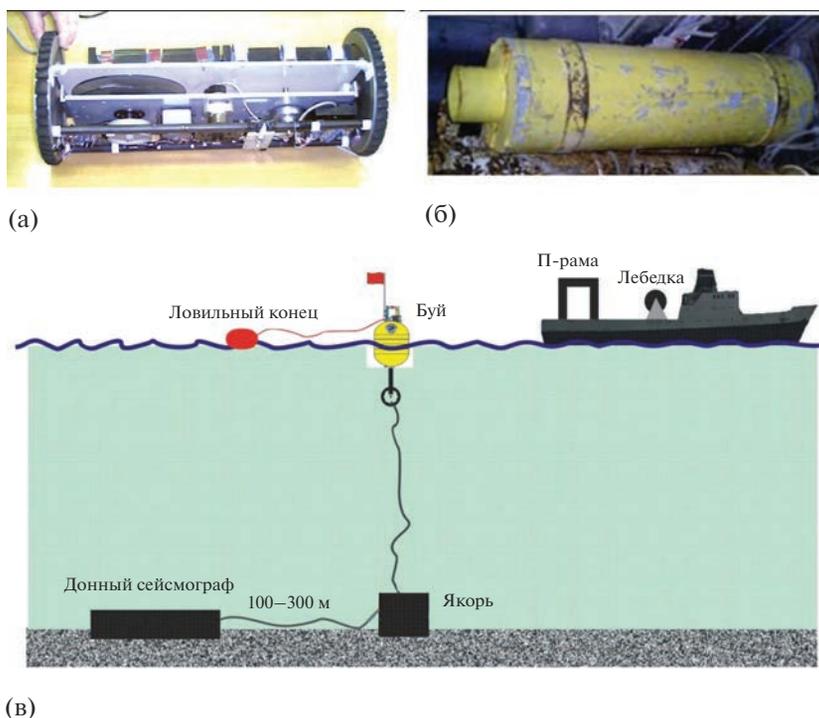


Рис. 2. Внутренний вид донного сейсмографа (а), прочный корпус донного сейсмографа (б), схема установки донного сейсмографа (в).

опорного кварцевого генератора величиной 2×10^{-8} с/с.

Электронная начинка сейсмографа (рис. 2а) помещалась в прочный корпус с подводным весом от 40 до 100 кг для разных модификаций (см. рис. 2б), который устанавливался на дно с помощью капронового фала диаметром 12 мм. Вслед за прочным корпусом за борт судна вытравливалось 60 м капронового фала, к другому концу которого прикреплялась цепь с балластным грузом весом 70–100 кг. От балластного груза отходил основной буйреп, свободный конец которого прикреплялся к выпускаемому поверхностному бую. Все операции по постановке и подъему буйев производились с помощью судовых лебедки, П-рамы и крана. Между сейсмографом, лежащим на дне, и балластным грузом, удерживающим буй, находился фал-развязка длиной 60 м, который изолировал сейсмограф от влияния поверхностного буйа (см. рис. 2в). Работы в Персидском заливе выполнялись с борта НИС «Профессор Штокман», судовладельцем которого являлся Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН.

Система воспроизведения записей ДС выполнена на базе восьмиканального модифицированного магнитографа Н-067. Скорость воспроизведения превышает скорость записи в 80–200 раз, что приводит к транспонированию сейсмическо-

го диапазона частот (3–30 Гц) в акустический (240–6000 Гц). Сейсмические сигналы, зарегистрированные на дне, начинают звучать. С помощью подсоединяемых к воспроизводящей системе наушников находились записи сигналов от пневмоисточников и природных землетрясений на слух.

Для оцифровки аналоговых записей ДС использовался персональный компьютер IBM PC с мультиплексным 12-разрядным АЦП. Оцифрованная запись визуализировалась на экране монитора и привязывалась к абсолютному времени UTC. Использование сван-диаграмм позволило оценивать эволюцию спектра сейсмического сигнала во времени при выборе оптимальной фильтрации для более тщательной обработки. Амплитудный и энергетический спектр выбранного фрагмента записи рассчитывался с учетом амплитудно-частотной характеристики сейсмометрического канала ДС.

В случае выделения сейсмических событий сохранялись фрагменты записей землетрясений. В случае работ ГСЗ формировались монтажи общей точки возбуждения (ОТВ).

Донные сейсмологические наблюдения в акватории Персидского залива проводились с борта НИС «Профессор Штокман» в марте–апреле 1999 г. Всего для регистрации землетрясений бы-

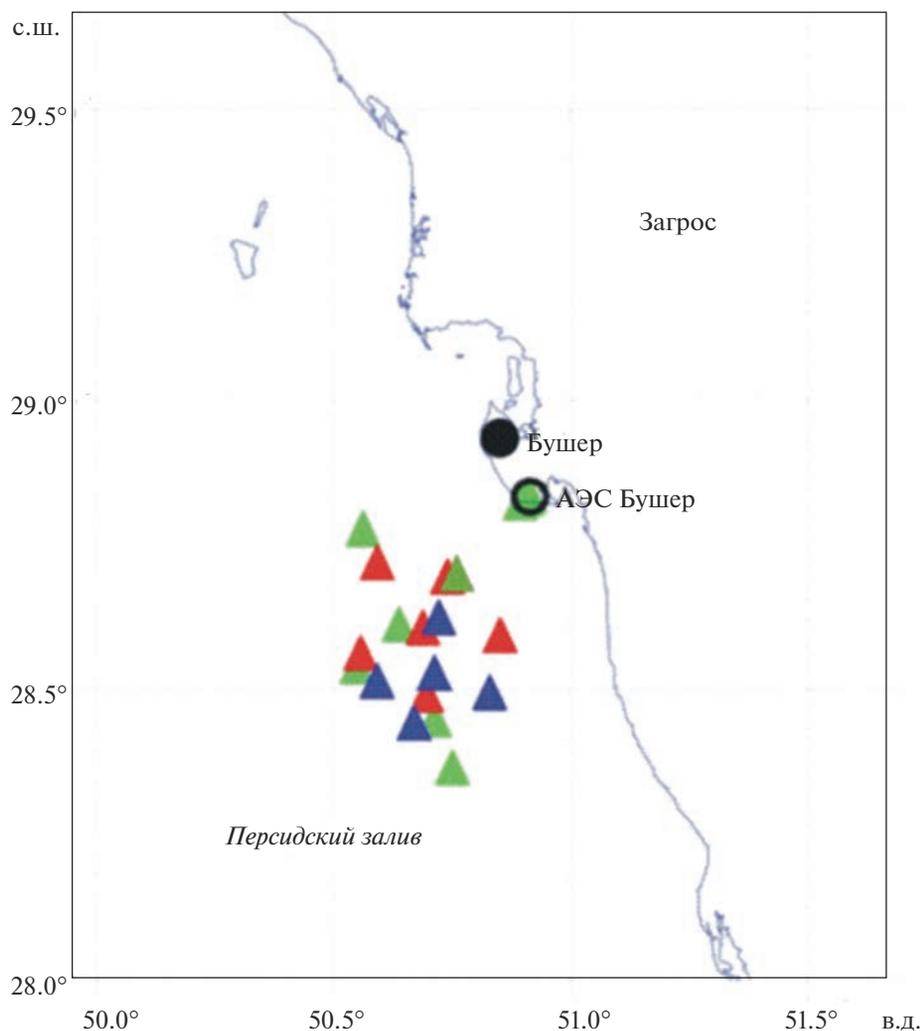


Рис. 3. Положение донных и береговых сейсмографов в Персидском заливе, использовавшихся для регистрации землетрясений в районе АЭС Бушер. Зеленые треугольники – расстановка № 4, красные треугольники – расстановка № 5, синие треугольники – расстановка № 6.

ло выполнено 3 расстановки (№ 4–6) донных сейсмографов, в которых было задействовано от 6 до 4 донных станций. В процессе обработки записей землетрясений четвертой расстановки привлекались также данные трех береговых сейсмографов ИО РАН.

Положение донных сейсмографов на расстановках № 4–6 показано на рис. 3, а координаты и сроки работы приводятся в табл. 1–3.

Суммарная продолжительность регистрации землетрясений донными сейсмографами на дне Персидского залива составила 23 дня. За это время тремя и большим числом станций было зарегистрировано 69 землетрясений, принятых к обработке. Общее число землетрясений, записанных ДС в течение 23 сут, превысило сотню сейсмических событий. (В их число попали землетрясения, записанные двумя и одной сейсмическими станциями).

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ОБРАБОТКИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

После визуализации на дисплее записи землетрясения (сейсмограммы) определялись моменты прихода продольных (P) и поперечных (S) волн для ряда сейсмических станций. При этом поиск реальных вступлений поперечных волн производился с помощью графика Вадати, который отображает зависимость разности времен прихода продольных и поперечных волн от времен вступлений продольных волн.

Времена вступлений продольных и поперечных волн на разных станциях, а также файлы, содержащие данные о скоростном строении земной коры и координаты сейсмических станций, являются входными данными для программы НУРО-71, использовавшейся для расчета координат эпицентров землетрясений, глубин очагов, ошибок

Таблица 1. Координаты и сроки работы донных и береговых сейсмографов на расстановке 4

| № ДС | Широта град. мин | Долгота град. мин | Дата и время установки | Дата и время снятия | Тип прибора |
|------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------|-------------|
| 1 | 2822.01 N | 5044.99 E | 28 мар. 6 ч 30 мин | 2 апр. 3 ч 30 мин | Донный |
| 2 | 2826.96 N | 5042.73 E | 28 мар. 7 ч 30 мин | 2 апр. 4 ч 50 мин | Донный |
| 3 | 2841.83 N | 5044.38 E | 28 мар. 8 ч 20 мин | 2 апр. 11 ч 10 мин | Донный |
| 4 | 2836.83 N | 5038.23 E | 28 мар. 10 ч 55 мин | 2 апр. 12 ч 20 мин | Донный |
| 5 | 2846.70 N | 5033.68 E | 28 мар. 11 ч 15 мин | 2 апр. 9 ч 20 мин | Донный |
| 6 | 2832.47 N | 5032.90 E | 28 мар. 11 ч 40 мин | 2 апр. 7 ч 30 мин | Донный |
| 11 | 2849.37 N | 5053.57 E | 17 мар. 6 ч 00 мин | 29 мар. 4 ч 30 мин | Береговой |
| 12 | 2849.79 N | 5054.34 E | 17 мар. 7 ч 30 мин | 29 мар. 7 ч 30 мин | Береговой |
| 13 | 2850.19 N | 5054.72 E | 16 мар. 14 ч 00 мин | 29 мар. 9 ч 00 мин | Береговой |

Примечание. Указано UTC время. Координаты станции, установленной в городе Бушер, на которой не получено информации из-за высокого уровня шума, не приводятся.

Таблица 2. Координаты и сроки работы донных сейсмографов на расстановке 5

| № ДС | Широта град. мин | Долгота град. мин | Дата и время установки | Дата и время снятия | Примечание |
|------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------|------------|
| P1 | 28 29.53 N | 50 41.74 E | 04 апр. 10 ч 40 мин | 17 апр. 19 ч 40 мин | |
| P2 | 28 35.73 N | 50 51.00 E | 04 апр. 12 ч 00 мин | | Утерян |
| P3 | 28 36.49 N | 50 41.24 E | 04 апр. 12 ч 40 мин | 12 апр. 7 ч 00 мин | |
| P4 | 28 33.86 N | 50 33.39 E | 04 апр. 14 ч 30 мин | 12 апр. 8 ч 10 мин | |
| P5 | 28 43.28 N | 50 35.50 E | 04 апр. 15 ч 10 мин | 12 апр. 10 ч 50 мин | |
| P6 | 28 41.78 N | 50 44.38 E | 04 апр. 16 ч 00 мин | 12 апр. 19 ч 30 мин | |

их вычисления, времен в очагах землетрясений, а также их магнитуд.

Использовавшаяся скоростная модель среды построена на основе данных глубинного сейсмического зондирования, выполненного в рамках исследований по ГСЗ в Персидском заливе [Ковачев, Ганжа, 2023]. В этих работах удалось получить детальную скоростную модель среды под дном Персидского залива до глубины порядка 7 км. Глубже были получены интегральные скоростные характеристики твердой среды. Эта модель приводится в табл. 4.

Использование амплитудных соотношений для определения магнитуд землетрясений по записям донных сейсмографов вызывает затруднения из-за значительных искажений сейсмического сигнала, обусловленных работой сейсмографа на рыхлом обводненном грунте (морское дно) [Левченко, 2005]. Кроме того, в настоящей работе для расчета магнитуды мы использовали записи гидрофонного канала донных сейсмографов, где отношение “сигнал—шум” более высокое, чем на записях сейсмометрических каналов.

Причины, заставляющие использовать “нетрадиционные” методы для определения магни-

Таблица 3. Координаты и сроки работы донных сейсмографов на расстановке 6

| № ДС | Широта град. мин | Долгота град. мин | Дата и время установки | Дата и время снятия | Примечание |
|------|------------------|-------------------|------------------------|---------------------|------------|
| P1 | 28 37.55 N | 50 43.26 E | 13 апр. 3 ч 30 мин | 20 апр. 12 ч 30 мин | |
| P2 | 28 31.82 N | 50 42.72 E | 13 апр. 6 ч 30 мин | 20 апр. 13 ч 30 мин | |
| P3 | 28 29.77 N | 50 49.71 E | 13 апр. 7 ч 10 мин | | Утерян |
| P4 | 28 26.64 N | 50 40.12 E | 13 апр. 7 ч 50 мин | 20 апр. 15 ч 00 мин | |
| P5 | 28 30.97 N | 50 35.45 E | 13 апр. 8 ч 20 мин | 20 апр. 16 ч 00 мин | |

Таблица 4. Скоростная модель среды, использовавшаяся для вычисления координат эпицентров землетрясений Персидского залива

| Номер слоя | Глубина кровли слоя, км | Мощность слоя, км | V_p на кровле слоя, км/с | V_p у подошвы слоя, км/с |
|------------|-------------------------|-------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1 | 0 | 1.3 | 2.10 | 3.55 |
| 2 | 1.3 | 1.1 | 3.68 | 4.30 |
| 3 | 2.4 | 2.5 | 4.80 | 5.10 |
| 4 | 4.9 | 2.1 | 5.90 | 6.10 |
| 5 | 7.0 | 13 | 6.30 | 6.60 |
| 6 | 20.0 | 20.0 | 6.70 | 6.80 |
| 7 | 40.0 | 200.0 | 8.05 | 8.50 |

Примечание. Скорости поперечных волн определялись на основе отношений V_p/V_s , определяемых с помощью графиков Вадати.

туды по записям гидрофона, изложены в работе [Левин и др., 2010, стр. 62]: “Следует отметить, что гидрофонные записи слабых сейсмических событий, удаленных от места регистрации, как правило, сильно искажены шумами, и определение периода сигнала в фазе максимальной амплитуды представляет серьезное затруднение”.

Для расчета магнитуд землетрясений была использована длительность записи сигналов (τ) в виде:

$$M_D = 3.24 \lg \tau - 3.84, \quad (1)$$

где τ — длительность коды сигнала землетрясения, т.е. время между приходом первого вступления продольной волны и временем, когда амплитуда коды не более чем в 1.5 раза превышает амплитуду фонового сейсмического шума. Это соотношение было получено в результате серии экспериментов с донными сейсмографами в районе о. Крит в Эгейском море [Ковачев, Соловьев, 1996; Соловьев и др., 1993]. Подобную формулу, полученную на основе таблицы “Соловьева–Ковачева”, авторы работ [Борисов, 2013; Левин и др., 2010; Sasorova et al., 2008] использовали при определении магнитуд микроземлетрясений в нескольких сериях гидроакустических измерений, которые проводились в различных акваториях Тихоокеанского побережья и в сейсмоактивных районах Сахалино-Курильского региона.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В табл. 5 приводится каталог землетрясений, составленный в результате донных сейсмологических наблюдений, а на рис. 4 — фрагмент карты с полученным распределением эпицентров землетрясений. Здесь же показаны эпицентры мантийных землетрясений района Персидского залива и гор Загрос (с глубинами очагов свыше 40 км) из каталога Геологической службы США [USGS, 2022].

Пример записи локального землетрясения, зарегистрированного на дне Персидского залива,

приведен на рис. 5. Сейсмограммы локальных землетрясений Персидского залива, как правило, отличает наличие достаточно четких вступлений продольных (P) и поперечных (S) волн. Это позволило построить для большей части этих сейсмических событий хорошо согласованные графики Вадати и достаточно надежно локализовать их очаги, как в горизонтальной плоскости, так и по вертикали. Магнитуды локальных землетрясений попали в диапазон от -0.2 до 2.9 .

Большая часть эпицентров локальных сейсмических событий (19 штук) расположена к югу и юго-востоку от Бушерской АЭС (см. рис. 4). Распределение эпицентров имеет скорее рассеянный характер и связано с тектонической активностью структурных неоднородностей, выявленных в данном месте методами ГСЗ и МОГТ. Очаги локальных землетрясений были обнаружены как в осадочном чехле (глубина до 2 км), так и в верхах мантии (до 50 км).

Запись удаленного землетрясения представлена на рис. 6. Судя по форме записи (близкое отношение амплитуд продольных и поперечных волн), практически половина удаленных землетрясений является глубокофокусными. Большая часть из них произошла под горами Загрос и в северной части Персидского залива. На записях горизонтальных сейсмометров этих сейсмических событий достаточно четко выделяется вступление обменных волн (по-видимому, обмен происходит на границе кристаллического фундамента и осадочной толщи непосредственно под точкой регистрации).

На записях береговых станций наблюдались очень слабые сигналы, по форме напоминавшие микроземлетрясения с отрицательными магнитудами (рис. 7). Обнаружить подобные сейсмические события, зарегистрированные одновременно тремя приборами, не удалось. Скорее всего, эти сигналы имели техногенную природу и генерировались механизмами, работавшими на площадке АЭС.

Таблица 5. Каталог землетрясений Персидского залива, составленный по записям донных и береговых сейсмографов за период времени с 28 марта по 20 апреля 1999 г.

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------------|----------|----------|--------|------|------|
| 990328 | 14h52m50.7s | 29-59.33 | 50-42.85 | 90 | 1.9 | 0.77 |
| 990328 | 16h27m41.5s | 28-34.21 | 50-48.73 | 6.1 | 1.3 | 0.58 |
| 990328 | 16h48m12.2s | 28-49.89 | 52-50.29 | 70 | 1.8 | 1.17 |
| 990328 | 19h9m32.8s | 28-46.21 | 50-50.91 | 18.96 | 2.4 | 0.71 |
| 990329 | 4h0m40.0s | 29-46.87 | 49-41.90 | 40.28 | 2.9 | 0.04 |
| 990329 | 4h10m17.9s | 29-28.13 | 50-33.30 | 157.21 | 1.7 | 0.83 |
| 990329 | 4h31m33.8s | 29-12.69 | 52-14.84 | 85.88 | 1.4 | 0.18 |
| 990329 | 6h37m26.6s | 29-51.90 | 49-55.84 | 105.67 | 1.1 | 0.84 |
| 990329 | 6h58m56.2s | 29-57.41 | 49-51.15 | 125.22 | 1.4 | 0.92 |
| 990329 | 7h42m21.7s | 29-22.56 | 51-59.83 | 26.38 | 1.1 | 1.00 |
| 990329 | 9h50m46.9s | 29-51.08 | 50-11.95 | 70.00 | 0.8 | 0.94 |
| 990329 | 11h9m54.4s | 29-46.26 | 49-54.77 | 54.18 | 2.0 | 0.34 |
| 990329 | 15h23m39.6s | 28-37.81 | 50-47.45 | 11.02 | 0.2 | 0.55 |
| 990329 | 16h5m40.6s | 28-58.60 | 51-24.15 | 42.49 | 1.3 | 0.04 |
| 990329 | 18h50m53.1s | 27-19.19 | 51-7.43 | 46.46 | 1.6 | 0.66 |
| 990330 | 1h29m38.9s | 29-24.55 | 49-56.14 | 20.25 | 2.0 | 0.53 |
| 990330 | 4h1m45.4s | 29-17.66 | 50-33.30 | 172.10 | 1.5 | 0.90 |
| 990330 | 18h28m53.4s | 28-40.19 | 50-32.61 | 1.85 | 0.2 | 0.80 |
| 990330 | 20h51m7.0s | 30-14.08 | 50-0.01 | 70.00 | 2.1 | 0.56 |
| 990331 | 10h15m57.4s | 29-8.08 | 52-7.86 | 90.00 | 1.6 | 0.20 |
| 990331 | 15h10m38.1s | 28-28.58 | 50-41.73 | 6.48 | -0.2 | 1.09 |
| 990331 | 15h59m45.3s | 28-34.88 | 50-38.94 | 35.18 | 1.4 | 0.07 |
| 990331 | 16h12m26.8s | 28-33.30 | 50-40.08 | 17.00 | -0.1 | 0.73 |
| 990401 | 2h9m27.4s | 28-3.51 | 50-1.56 | 24.42 | 2.1 | 0.34 |
| 990401 | 2h31m48.3s | 28-7.28 | 49-49.43 | 10.00 | 1.9 | 0.33 |
| 990401 | 9h4m52.8s | 29-30.65 | 49-53.67 | 25.00 | 1.4 | 0.97 |
| 990401 | 10h2m47.4s | 28-31.70 | 50-45.95 | 44.38 | 1.0 | 0.05 |
| 990401 | 11h32m25.5s | 28-59.09 | 49-35.84 | 168.46 | 1.9 | 1.40 |
| 990401 | 14h55m58.6s | 29-20.35 | 52-9.59 | 107.99 | 1.7 | 0.02 |
| 990401 | 16h15m54.6s | 29-12.42 | 52-27.81 | 61.10 | 1.6 | 0.12 |
| 990330 | 11h21m56.7s | 28-52.19 | 50-41.19 | 9.68 | -0.1 | 0.86 |
| 990406 | 4h32m25.5s | 28-31.92 | 50-51.84 | 11.63 | 1.3 | 0.00 |
| 990401 | 18h33m39.1s | 28-38.26 | 50-43.71 | 18.36 | 1.4 | 0.04 |
| 990401 | 18h53m2.6s | 29-25.39 | 51-18.17 | 74.39 | 1.4 | 0.51 |
| 990402 | 1h54m31.2s | 29-55.79 | 51-26.45 | 14.38 | 1.8 | 0.40 |
| 990404 | 19h45m13.0s | 28-45.52 | 51-9.29 | 64.63 | 0.1 | 0.06 |
| 990405 | 9h41m23.8s | 29-0.15 | 50-34.86 | 12.09 | 2.4 | 0.56 |
| 990405 | 11h41m42.4s | 27-30.60 | 51-10.41 | 28.21 | 1.4 | 0.19 |
| 990405 | 13h40m1.8s | 27-25.50 | 50-41.84 | 30.00 | 1.3 | 0.47 |
| 990405 | 14h26m46.6s | 29-19.86 | 52-13.07 | 18.32 | 1.4 | 0.40 |
| 990405 | 20h12m45.0s | 29-25.27 | 51-27.38 | 24.03 | 1.1 | 0.61 |
| 990405 | 22h8m11.8s | 29-6.76 | 52-25.38 | 7.07 | 2.4 | 0.65 |
| 990405 | 22h43m2.9s | 28-36.59 | 50-30.13 | 40.76 | 0.3 | 0.65 |
| 990406 | 4h32m22.4s | 28-37.80 | 51-4.39 | 29.49 | 1.3 | 0.33 |

Таблица 5. Окончание

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--------|-------------|----------|----------|-------|-----|------|
| 990406 | 13h38m29.3s | 28-52.92 | 50-52.54 | 30.64 | 0.7 | 0.55 |
| 990408 | 7h15m43.2s | 29-4.90 | 51-21.23 | 2.50 | 1.1 | 0.53 |
| 990408 | 8h31m15.5s | 27-55.08 | 51-38.82 | 55.63 | 1.5 | 0.19 |
| 990408 | 13h20m6.9s | 28-38.15 | 50-44.98 | 25.31 | 2.6 | 0.27 |
| 990408 | 23h47m56.5s | 29-22.66 | 50-35.52 | 23.45 | 1.2 | 0.83 |
| 990410 | 23h53m7.6s | 29-6.68 | 51-48.30 | 32.00 | 1.1 | 0.63 |
| 990410 | 9h29m30.1s | 29-43.71 | 51-50.86 | 40.00 | 1.2 | 0.24 |
| 990410 | 14h29m38.8s | 28-13.17 | 51-12.67 | 56.83 | 1.0 | 0.33 |
| 990410 | 14h38m52.6s | 28-18.22 | 51-15.64 | 30.00 | 0.9 | 0.43 |
| 990410 | 14h39m16.9s | 28-3.60 | 51-19.15 | 37.20 | 1.2 | 0.06 |
| 990410 | 14h42m4.5s | 28-22.88 | 51-12.32 | 33.54 | 1.1 | 0.53 |
| 990410 | 5h56m21.7s | 28-24.22 | 51-6.67 | 22.84 | 1.0 | 0.06 |
| 990411 | 22h36m6.2s | 30-16.64 | 51-46.87 | 63.94 | 1.9 | 0.24 |
| 990407 | 11h33m19.4s | 29-9.12 | 51-11.21 | 23.56 | 1.2 | 0.37 |
| 990408 | 2h5m37.0s | 28-58.52 | 50-48.05 | 1.48 | 0.7 | 0.05 |
| 990413 | 19h35m57.2s | 29-28.99 | 50-43.36 | 56.20 | 1.1 | 0.75 |
| 990414 | 12h30m29.1s | 29-49.25 | 51-19.08 | 55.63 | 1.2 | 0.10 |
| 990414 | 14h17m0.2s | 29-18.66 | 51-16.13 | 10.00 | 1.5 | 1.41 |
| 990414 | 22h18m43.1s | 29-59.60 | 50-55.54 | 15.46 | 1.6 | 0.12 |
| 990415 | 11h18m21.6s | 28-54.88 | 49-49.64 | 30.00 | 0.7 | 0.52 |
| 990416 | 3h42m2.5s | 29-38.33 | 49-22.17 | 50.00 | 1.3 | 0.10 |
| 990417 | 0h0m47.2s | 29-14.56 | 52-25.85 | 50.00 | 1.7 | 0.90 |
| 990417 | 6h20m52.8s | 30-15.18 | 51-29.46 | 44.47 | 2.1 | 0.13 |
| 990419 | 11h11m1.8s | 28-44.07 | 50-43.90 | 59.61 | 0.7 | 0.05 |
| 990419 | 21h56m12.5s | 29-23.69 | 52-0.30 | 40.00 | 2.2 | 0.08 |

Примечание. 1 – дата землетрясения (99 – год, 04 – месяц, 19 – день); 2 – время в очаге (21h – час, 56m – минута, 12.5s – секунда); 3 – северная широта эпицентра (29 – градусы, 23.69 – минуты); 4 – восточная долгота эпицентра (52 – градусы, 59.61 – минуты); 5 – глубина очага в км; 6 – 2.2 – магнитуда; 7 – среднеквадратичная временная невязка расчетных и наблюдаемых данных в секундах.

За непродолжительный период наблюдений (23 дня) донными сейсмическими станциями зарегистрировано более сотни локальных и удаленных сейсмических событий. Из них удалось локализовать 69 очагов. Это свидетельствует о высокой эффективности донных сейсмологических наблюдений за счет низкого уровня сейсмического фона на дне Персидского залива.

Локальные сейсмические события, параметры которых определены с достаточной степенью достоверности, были учтены при составлении сводного каталога землетрясений ОИФЗ РАН.

Выводы некоторых исследователей (например, [Maggi et al., 2000]) сводятся к тому, что в континентальной мантии и нижней коре отсутствуют землетрясения. В некоторых регионах, таких как Иран, Эгейское море, Тибет и Калифорния, сейсмичность практически ограничена верхней частью континентальной коры, тогда как в

других, включая части Восточной Африки, Тянь-Шаня и северной Индии, нижняя кора также сейсмически активна, хотя обычно меньше, чем верхняя кора. Они считают, что такие вариации пространственного распределения очагов землетрясений не могут быть надежно продемонстрированы из опубликованных каталогов или бюллетеней, даже из тех, в которых разрешение по глубине достаточно хорошее. В отличие от океанической мантийной литосферы, в которой непременно происходят землетрясения, континентальная мантийная литосфера, по их предположению, практически асейсмична и не может быть значительно прочнее нижней континентальной коры.

Авторы утверждают, что “в районах Эгейского моря, Тибете и Калифорнии сейсмичность практически ограничена верхней частью континентальной коры”, а также, что “континентальная мантийная литосфера практически асейсмична”.

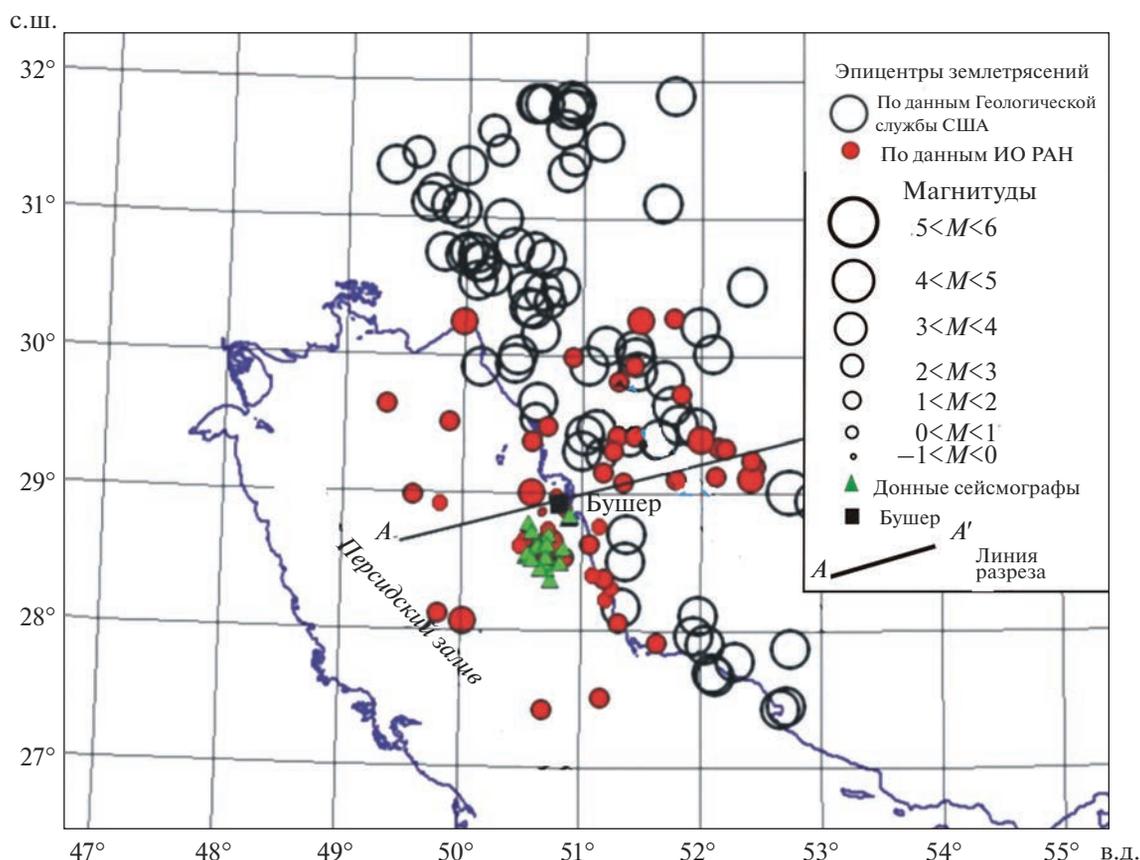


Рис. 4. Распределение эпицентров слабых и микроземлетрясений Персидского залива и гор Загрос, полученное с помощью кратковременных донных и сейсмологических наблюдений, а также эпицентров мантийных землетрясений с глубинами очагов свыше 40 км по данным Геологической службы США.

Что касается Эгейского моря, то эти утверждения не соответствуют истине. Это подтверждается данными Международного сейсмического каталога (ISC) и Каталога Геологической службы США (USGS), Средиземноморского каталога землетрясений, региональными каталогами землетрясений Греции [Kkallas et al., 2018; Papazachos et al., 2005] и каталогом микроземлетрясений Эгейского моря, полученным с помощью высокочувствительных донных сейсмологических наблюдений [Kovachev et al., 1992; Solov'ev et al., 1989]. Поэтому утверждение авторов о том, что “в горах Загрос на юге Ирана землетрясения, по-видимому, ограничиваются верхней корой (глубина < 20 км)” также вызывает сомнение.

Международный сейсмический каталог (ISC) [ISC, 2022] и каталог Геологической службы США (USGS) указывают на наличие очагов землетрясений в мантии под горами Загрос. Согласно каталогу Геологической службы США [USGS, 2022] за период наблюдений с 1911 по 2022 гг. было зарегистрировано 4242 землетрясения, из них в мантии произошло 374 сейсмических событий, т.е. почти 9% от общего количества очагов. Маг-

нитуда мантийных землетрясений по данным USGS попала в диапазон от 3.6 до 5.5.

По данным ISC (reviewed) с 1973 по 2017 гг. В районе Загроса произошло 1444 землетрясения. Из них мантийных сейсмических событий оказалось 64. Магнитуды этих сейсмических событий попали в диапазон от 3.3 до 5.5 [ISC, 2022]. За этот же период по данным USGS в мантии района произошло 77 землетрясений.

По данным иранской сейсмической службы в мантии района гор Загрос также нередко происходят землетрясения [Iranian Seismological Center, 2022].

Нами был построен глубинный разрез вкост береговой линии Персидского залива. На разрез были нанесены проекции очагов землетрясений, полученные в результате донных сейсмологических наблюдений в акватории Персидского залива и заимствованные из каталога Геологической службы США (рис. 8).

Судя по разрезу, по данным донных сейсмологических наблюдений сейсмически активной является вся толща земной коры Персидского залива и верхняя мантия района, а не только верхняя

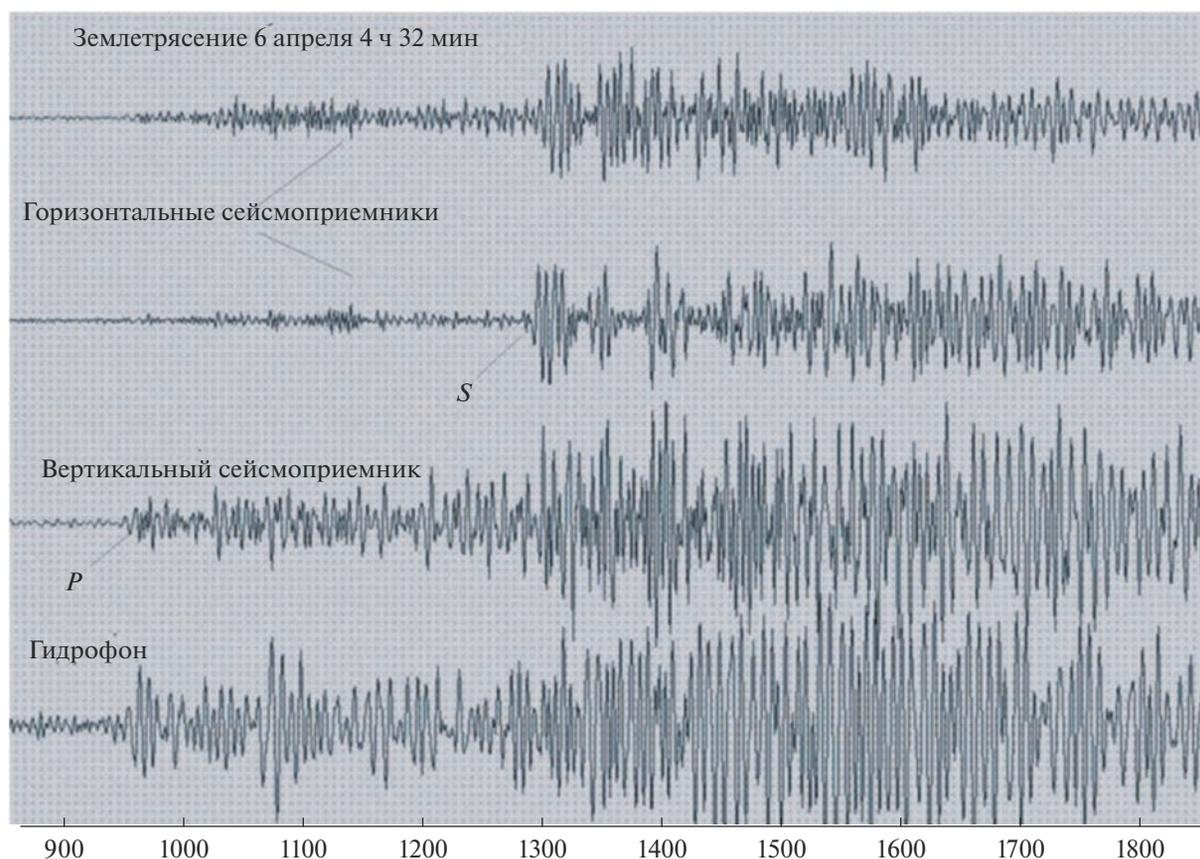


Рис. 5. Запись локального землетрясения, полученная донным сейсмографом на дне Персидского залива (100 отсчетов горизонтальной шкалы соответствуют 1 с записи).

часть кристаллической коры. Активность представлена слабыми и микро-землетрясениями с магнитудами от -0.2 до 2.9 . Глубина очагов этих землетрясений достигает 170 км. Оказалось, что очаги землетрясений образуют круто падающие на северо-восток параллельные сейсмофокальные слои. Каждый слой приурочен к одной из тектонических зон складчатых деформаций по В.Г. Трифонову [Трифонов, 2017, рис. 30]. Пространственное распределение сильных и средней силы землетрясений по данным Геологической службы США и каталога ISC не противоречит распределению очагов микро- и слабых землетрясений, а дополняет его, образуя сейсмофокальный слой, приуроченный к зоне Высокого Загроса.

Расхождение координат эпицентров двух землетрясений, локализованных сетью донных сейсмографов, и приведенных в каталогах USGS [USGS, 2022] и ISC [ISC, 2022] можно объяснить различными скоростными моделями среды, использованными для вычисления параметров очагов. Также, необходимо отметить, что среднеквадратичные временные невязки (RMS), полученные в процессе обработки данных морских сейсмологических наблюдений, в подавляющем

большинстве случаев не превышают 1 с. В каталогах USGS и ISC наблюдается обратная ситуация: для данных USGS в большинстве случаев RMS превышают 1 с, а для данных ISC – 2 с. Это может говорить о большей точности определения координат очагов землетрясений, достигнутой с помощью донных сейсмографов.

Различие в магнитудах объясняется тем, что в случае донных наблюдений магнитуда определялась по длительности сигнала землетрясения (M_D), которая может значительно отличаться от магнитуд, приведенных в каталогах USGS и ISC (M_L , m_b и др.). Кроме того, если учитывать ошибки определения магнитуд из каталога ISC [ISC, 2022], то эти различия выглядят незначительными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате донных сейсмологических наблюдений обнаружены очаги слабых землетрясений, всего свыше 100 сейсмических событий было записано за 23 дня. Из них 69 землетрясений удалось локализовать под акваторией Персидского залива и горами Загрос. Распределение эпицентров носит скорее рассеянный характер, не

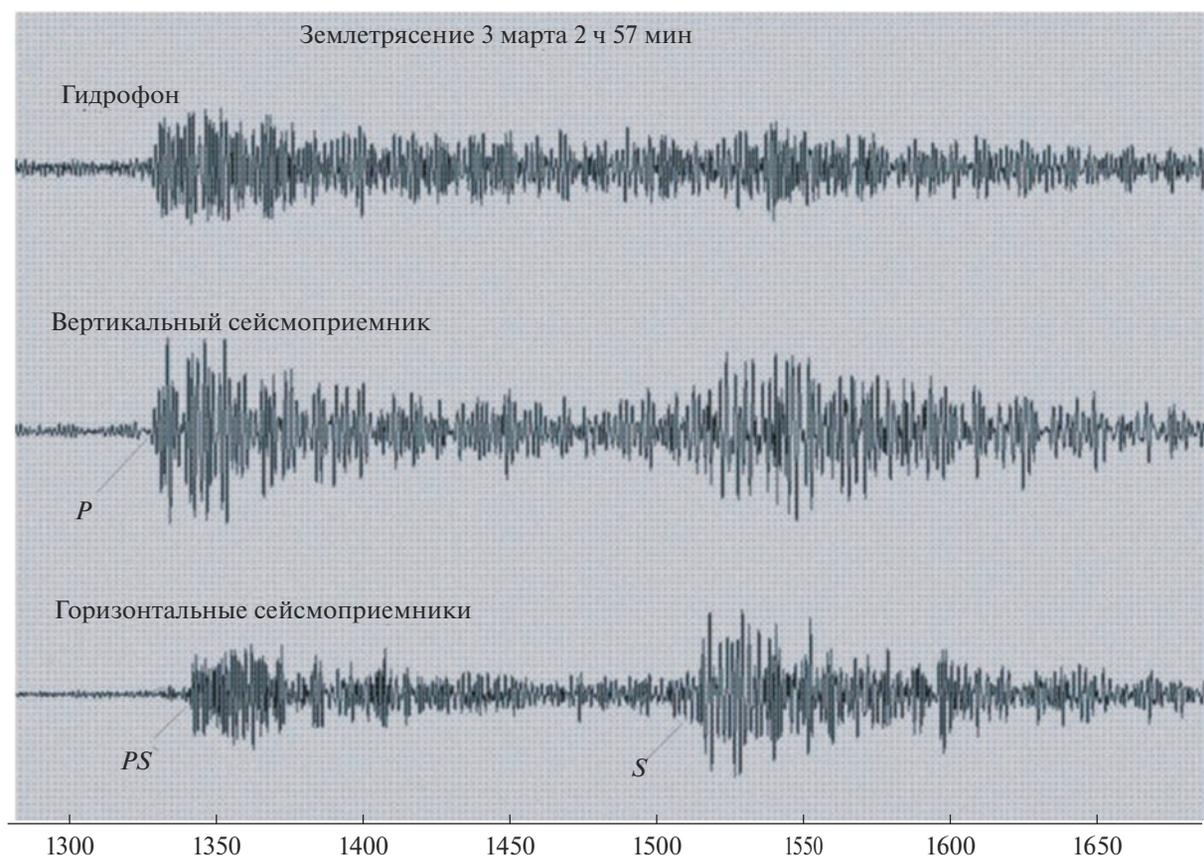


Рис. 6. Запись глубокофокусного землетрясения, произошедшего под горами Загрос на глубине 70 км с магнитудой 2.1, полученная на дне Персидского залива донным сейсмографом (100 отсчетов горизонтальной шкалы соответствуют 1 с записи, PS — вступление обменной волны).

образуя линейных цепочек. Очаги землетрясений определены с приемлемой точностью, для большей части гипоцентров ошибки определения в плане не превышают 5 км и по глубине 7 км (согласно результатам расчетов по программе NYPO-71).

Гипоцентры землетрясений Персидского залива трассируют складки, приуроченные к разным зонам Загроса (Высокого Загроса, Низкого Загроса и Предгорной), указывая на их продолжение в мантии до глубин 120–180 км. Т.е. процесс коллизии Аравийской литосферной плиты и микроплит Центрального Ирана в районе Персидского залива и горного массива Загрос таким образом прослеживается до этих глубин и захватывает верхи мантии. Либо — в соответствии с тектоническими интерпретациями результатов сейсмической томографии из работы [Paul et al., 2010] глубинные сейсмофокальные слои в Центральном и Северном Загросе связаны с зоной Санандаж—Сирджан (швом) под Центральным Загросом в верхах мантии.

Кроме того, акватория Персидского залива отличается еще одной геологической особенностью — это утонение верхнего (гранитного) слоя земной

коры до величины порядка 5 км, обнаруженное в результате работ по ГСЗ [Ковачев, Ганжа, 2023].

Подобные геолого-геофизические свойства характерны для района Южного Каспия, где по данным ГСЗ [Пийп и др., 2012] гранитный слой полностью отсутствует, а в мантии Среднего и Южного Каспия выделены сейсмофокальные слои, протягивающиеся до глубин 150–180 км [Ковачев, 2016; Ковачев и др., 2006, 2009; Уломов, 2003].

Подобная же ситуация наблюдается в акватории Черного моря, где по данным ГСЗ выделяются участки с полным отсутствием гранитного слоя земной коры [Непрочнов, 1960; Непрочнов и др., 1959; Пийп, Ермаков, 2011; Строение ..., 1989], а в верхах мантии локализованы очаги слабых землетрясений [Kovachev et al., 2021].

Наблюдается также утонение условно гранитного слоя земной коры Эгейского моря и восточной части Средиземного моря [Makris, Yegorova, 2006]. Мантийная сейсмичность здесь обусловлена процессом субдукции Африканской литосферной плиты под Эгейскую микроплиту [Parazachos, 2005]. Обнаруженный здесь сейсмофо-

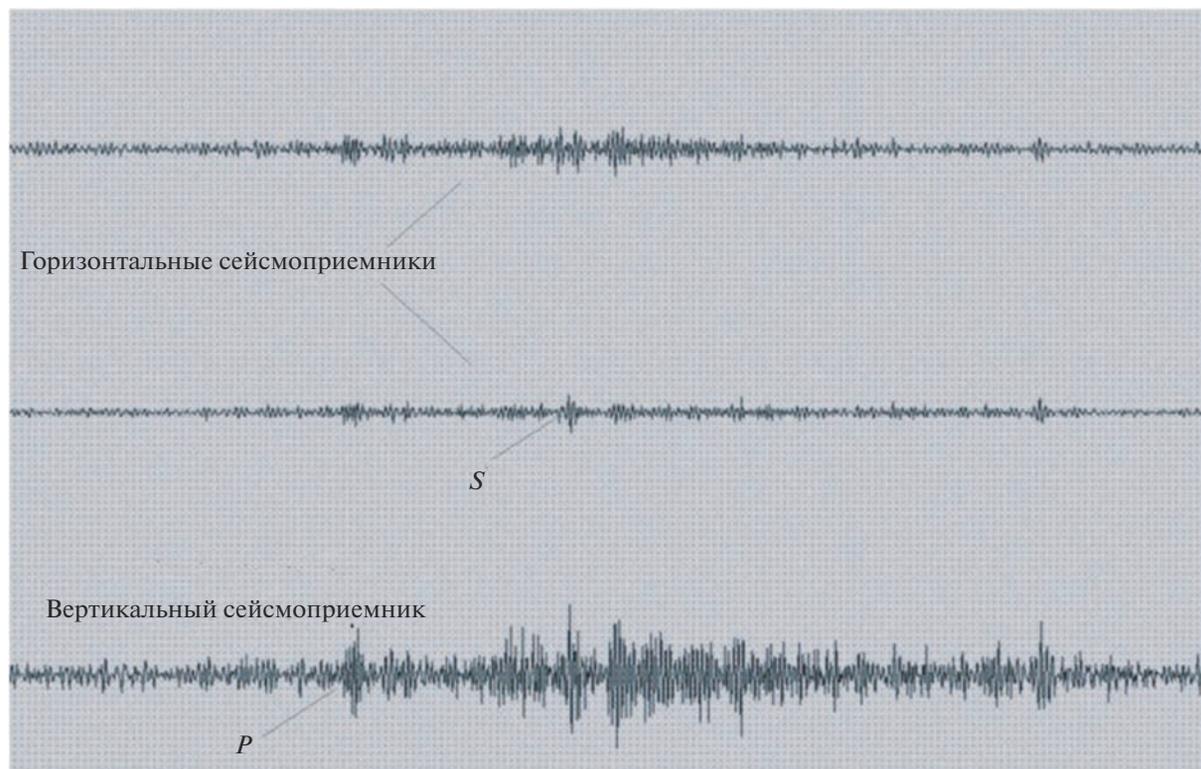


Рис. 7. Запись микроземлетрясения, вероятно, техногенной природы, зарегистрированного на площадке АЭС Бушер.

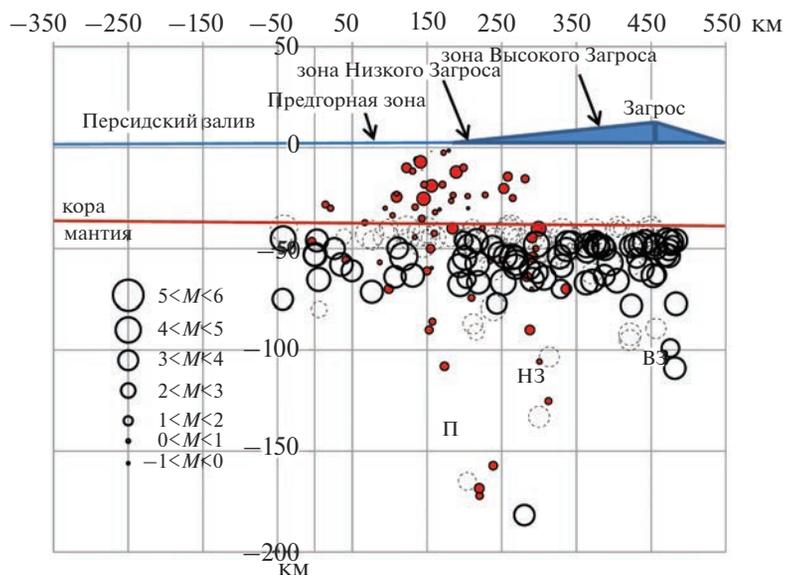


Рис. 8. Глубинный разрез вкост береговой линии Персидского залива с проекциями очагов землетрясений. Красные кружки – очаги землетрясений по данным морских наблюдений, незакрашенные кружки – мантийные землетрясения по данным Геологической службы США, незакрашенные пунктирные кружки – мантийные землетрясения по данным каталога ISC-gev. Стрелками показаны сейсмофокальные слои, приуроченные к тектоническим зонам Загроса: П – Предгорная, НЗ – Низкий Загрос, ВЗ – Высокий Загрос (см. рис. 1). Размер кружка – магнитуда землетрясения.

кальный слой погружается на глубины порядка 180–200 км [Соловьев и др., 1993; CSEM, 2022; Kkallas et al., 2018; Kovachev et al., 1992; Solov'ev et al., 1989].

Подобные эффекты обнаружены под акваторией Красного моря [El-Isa, 2015], где слабые землетрясения происходят на глубинах свыше 60 км и утонен гранитный слой земной коры.

ВЫВОДЫ

1. Согласно полученным данным сейсмически активными является вся толща земной коры Персидского залива и верхи верхней мантии, а не только верхние слои коры, как это представлено в ряде публикаций, упомянутых во введении.

2. Наблюдавшаяся активность представлена микро- и слабыми землетрясениями с магнитудами от -0.2 до 2.9 .

3. Донные сейсмологические наблюдения в отличие от данных каталогов Геологической службы США и ISC показали наличие очагов мантийных землетрясений под акваторией Персидского залива.

4. Возможно, мантийные землетрясения происходят в хрупких блоках земной коры, заглубленных в верхи мантии, из-за коллизионного сжатия региона [Allen et al., 2006].

5. Возможный эффект или причина, объединяющие вышеперечисленные районы, описаны в работе [Эппельбаум и др., 2021]. Согласно рис. 4 из этой работы, поле GPS векторов явно направлены на север от горячей точки АФАР и под (над) территорией Турции заворачивают на запад, где подлитосферное течение от ветви Африканского суперплюма может менять траекторию. Центр вращения векторов GPS находится под островом Кипр. Одновременно этот геометрический центр совпадает с критической широтой Земли 35° . На этой широте наблюдается максимум выделения сейсмической энергии в Северном полушарии Земли.

Возможно, вращение поверхности Земли против часовой стрелки обуславливает коллизионные процессы и сопровождающие их явления (мантийную сейсмичность [Хаин, 2006] и утонением слоя земной коры [Allen et al., 2006]) в акваториях, затронутых этим вращением (Персидский залив, Южный Каспий, Черное море, Восточное Средиземноморье и Красное море).

ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках Государственного задания Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН № FMWE-2021-0004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абрамов В.Ю., Алджабасини Х.* Литологические особенности стратиграфии и тектонического районирования сейсмически активного Загросского краевого прогиба в пределах акватории Персидского залива // Вестник РУДН. Серия: Инженерные исследования. 2019. Т. 20. № 1. С. 57–65. journals.rudn.ru/engineering-researches. <https://doi.org/10.22363/2312-8143-2019-20-1-57-65>
- Алджабасини Х.М.Д.* Геологическое строение и сейсмическая активность региона нефтедобычи Персидского залива / Дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2021. 120 с.
- База данных активных разломов Евразии (и прилегающих акваторий). М.: ГИН РАН, 2022. URL: <http://neotec.ginras.ru/database.html>. Дата обращения 20.10.2022.
- Бачманов Д.М.* Новейшая тектоника и геодинамика центральной части Внешнего Загроса (юго-западный Иран) / Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. М.: ГИН РАН, 2002. 24 с.
- Борисов А.С.* Широкополосные гидроакустические наблюдения сигналов микросейсмической активности южных Курильских островов в 2011–2012 гг. // Сверхширокополосные сигналы в радиолокации, связи и акустике // Материалы IV Всероссийской научной конференции. Муром: Муромский институт (филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых”), 2013. С. 34–38.
- Зверев С.М., Акимов Г.Н., Новиков В.С. и др.* Аппаратура для глубинного сейсмического зондирования и изучения местных землетрясений на суше и на море // Сейсмические приборы. 1978. Вып. 11. С. 75–77.
- Ковачев С.А.* Микросейсмичность Среднего Каспия по результатам донных сейсмологических наблюдений // Труды Каспийского филиала ИО РАН. Астрахань, 2016. С. 9–37.
- Ковачев С.А., Ганжа О.Ю.* Основные результаты исследований строения земной коры Персидского залива, полученные методом глубинного сейсмического зондирования // Океанология. 2023. Т. 63. № 5. С. 1–16.
- Ковачев С.А., Казьмин В.Г., Кузин И.П., Лобковский Л.И.* Новые данные по сейсмичности Среднего Каспия и их возможная тектоническая интерпретация // Геотектоника. 2006. № 5. С. 50–60.
- Ковачев С.А., Казьмин В.Г., Кузин И.П., Лобковский Л.И.* Новые данные о мантийной сейсмичности Каспийского региона и их геологическая интерпретация // Геотектоника. 2009. № 3. С. 30–44.
- Ковачев С.А., Крылов А.А., Ганжа О.Ю., Егоров А.В.* Глубинное сейсмическое зондирование земной коры в акватории Персидского залива // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021) // Материалы XVII международной научно-технической конференции. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021а. С. 201–204.

- Ковачев С.А., Крылов А.А., Егоров А.В. Результаты донных сейсмологических наблюдений в акватории Персидского залива // Современные методы и средства океанологических исследований (МСОИ-2021) // Материалы XVII международной научно-технической конференции. М.: Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 2021б. С. 205–208.
- Ковачев С.А., Соловьев С.Л. Определение магнитуд микроземлетрясений по донным сейсмологическим наблюдениям // Физика Земли. 1996. Т. 32. № 5. С. 26–30.
- Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Жигалин А.Д., Архипова Е.В., Анисимова О.В. Новейшие структуры и сейсмичность Загроса // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 9–18.
- Левин Б.В., Сасорова Е.В., Борисов С.А., Борисов А.С. Оценка параметров слабых землетрясений и их сигналов // Вулканология и сейсмология. 2010. № 3. С. 60–70.
- Левченко Д.Г. Регистрация широкополосных сейсмических сигналов на морском дне и возможных предвестников сильных землетрясений на морском дне. М.: Научный мир, 2005. 240 с.
- Лукк А.А., Ребецкий Ю.Л. Современная геодинамика и фокальные механизмы землетрясений в окрестности Бушерской АЭС // Геофизические процессы и биосфера. 2018. Т. 17. № 3. С. 90–108. <https://doi.org/10.21455/GPB2018.3-6>
- Непрочнов Ю.П. Глубинное строение земной коры под Черным морем по сейсмическим данным // Бюлл. МОИП. Отдел. геологии. 1960. Т. 35. С. 30–35.
- Непрочнов Ю.П., Гончарова В.П., Непрочнова А.Ф. Сейсмические данные о строении земной коры в центральной части Черного моря // Докл. АН СССР. 1959. Т. 129. № 2. С. 408–411.
- Пийн В.Б., Ермаков А.П. Океаническая кора Черноморской впадины по сейсмическим данным // Вестник МГУ. Сер. 4. Геология. 2011. № 5. С. 61–68.
- Пийн В.Б., Родников А.Г., Буваев Н.А. Исследование глубинного строения литосферы вдоль сейсмического профиля Кавказ–Южно-Каспийская впадина–Апшеронский порог–Средне-Каспийская впадина–Туранская плита // Вестник МГУ. Серия 4. Геология. 2012. № 2. С. 45–51.
- Ребецкий Ю.Л., Лукк А.А., Татевосян Р.Э., Быкова В.В. Определение фокальных механизмов слабых землетрясений и современная геодинамика юга Ирана // Geodynamics & Tectonophysics. 2017. V. 8. Iss. 4. P. 971–988.
- Соловьев С.Л., Ковачев С.А., Кузин И.П., Воронина Е.В. Микросейсмичность Эгейского и Тирренского морей по наблюдениям донных сейсмографов. М.: Наука, 1993. 159 с.
- Строение и эволюция земной коры и верхней мантии Черного моря / Под ред. В.В. Белоусова, В.С. Вольвовского. М.: Наука, 1989. 207 с.
- Трифонов В.Г. Неотектоника подвижных поясов // Тр. Геологического института РАН. М.: ГЕОС, 2017. 180 с.
- Уломов В.И. Трехмерная модель динамики литосферы, структуры сейсмичности и изменений уровня Каспийского моря // Физика Земли. 2003. № 5. С. 5–17.
- Хаин В.Е. О статье С.А. Ковачева, В.Г. Казьмина, И.П. Кузина, Л.И. Лобковского “Новые данные по сейсмичности Среднего Каспия и их возможная тектоническая интерпретация” // Геотектоника. 2006. № 6. С. 90–91.
- Эпельбаум Л., Бен-Аврахам Ц., Кац Ю., Клотинг С., Кабан М.К. Гигантская квази-кольцевая мантийная структура в зоне Африкано-Аравийского сочленения: данные комплекса геологических и геофизических исследований // Геотектоника. 2021. № 1. С. 66–93. <https://doi.org/10.31857/s0016853x21010057>
- Adams A., Brazier R., Nyblade A., Rodgers A., Al-Amri A., DuBois P.S. Source parameters for moderate earthquakes in the Zagros Mountains with implications for the depth extent of seismicity // Bulletin of the Seismological Society of America. 2009. V. 99. № 3. P. 2044–2049.
- Allen M., Blanc E., Walker R., Jackson J., Talebian M., Ghassemi M. Contrasting styles of convergence in the Arabia-Eurasia collision: Why escape tectonics does not occur in Iran // Geological Society of America. 2006. Special Paper. 409. P. 579–589.
- 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. TC2008. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1002/tect.20025>
- Bachmanov D.M., Trifonov V.G., Hessami K. et al. Active faults in the Zagros and Central Iran // Tectonophysics. 2004. V. 380. № 3–4. P. 221–241. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2003.09.0>
- Baker C., Jackson J., Priestley K. Earthquakes on the Kazerun Line in the Zagros Mountains of Iran: Strike-slip faulting within a fold and thrust belt // Geophys. J. Int. 1993. V. 115. P. 41–61.
- Berberian M., King G.C.P. Towards a paleo-geography and tectonic evolution of Iran // Canadian Journal of Earth Sciences. 1981. V. 18. P. 210–265.
- Bird P. Finite element modeling of lithosphere deformation: the Zagros collision orogeny // Tectonophysics. 1978. V. 50. P. 307–336.
- Bird P., Tokso Z.M.N., Sleep N.H. Thermal and mechanical models of continent–continent convergence zones // Journal of Geophysical Research. 1975. V. 32. P. 4405–4416.
- Casciello E., Vergés J., Saura E., Casini G., Fernández N., Blanc E., Homke S., Hunt D.W. Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros Simply Folded Belt (Iran) // Journal of the Geological Society. 2009. V. 166. P. 947–959. <https://doi.org/10.1144/0016-76492008-138>
- CSEM. Euro-Med earthquakes. URL: <https://www.emsc-csem.org/#2>. Дата обращения: 25.07.2022.

- Dekhani G., Makris J.* The gravity field and crustal structure of Iran // *Neues Jahrb. Geol. Paleontol. Abh.* 1988. V. 168. P. 182–207.
- El-Isa Z.H.* Seismicity and seismotectonics of the Red Sea Region // *Arabian Journal of Geosciences*. 2015. № 8(10). <https://doi.org/10.1007/s12517-015-1819-2>
- EMAG2v3: Earth Magnetic Anomaly Grid (2-arc-minute resolution). URL: https://www.ncei.noaa.gov/access/metadata/landing-page/bin/iso?id=gov.noaa.ngdc.mgg.geophysical_models:EMAG2_V3. Дата обращения 25.10.2022.
- Heidari R., Mirzaei N.* The seismotectonic model of main recent fault between 33° and 35° N // *Journal of the Earth and Space Physics*. 2009. <https://www.researchgate.net/publication/287189169>.
- Iranian Seismological Center. URL: <http://irsc.ut.ac.ir/>. Дата обращения: 14.08.2022.
- ISC. Bulletin: catalogue search. URL: <http://www.isc.ac.uk/iscbulletin/search/catalogue/#reviewed>. Дата обращения: 23.09.2022.
- Jackson J., McKenzie D.* The relationship between plate motion and seismic moment tensors, and the rates of active deformation in the Mediterranean and Middle East // *Geophys. J. Royal Astron. Soc.* 1988. V. 93. P. 45–73.
- Kkallas Ch., Papazachos C.B., Boore D., Margaris B.N.* Historical intermediate-depth earthquakes in the southern Aegean Sea Benioff zone: modeling their anomalous macroseismic patterns with stochastic ground-motion simulations // *Bulletin of Earthquake Engineering*. 2018. № 16(2). <https://doi.org/10.1007/s10518-018-0342-8>
- Kovachev S.A., Krylov A.A., Mironyuk S.G.* Seismic hazard assessment along the gas pipeline route in the Russian sector of the Black Sea using bottom seismological observations // *17th Conference and Exhibition Engineering and Mining Geophysics*. 2021. № 17.
- Kovachev S.A., Kuzin I.P., Soloviev S.L.* Microseismicity of the frontal Hellenic Arc according to OBS observations // *Tectonophysics*. 1992. V. 201. № 3–4. C. 317–327.
- Maggi A., Jackson J., Priestley K., Baker C.* A re-assessment of focal depth distributions in southern Iran, the Tien Shan and northern India: Do earthquakes really occur in the continental mantle? // *Int. J. Geophys.* 2000. V. 143. P. 629–661.
- Maggi A., Priestley K.* Surface waveform tomography of the Turkish-Iranian plateau // *Geophys. J. Int.* 2005. V. 160. P. 1068–1080.
- Makris J., Yegorova T.* A 3-D density–velocity model between the Cretan Sea and Libya // *Tectonophysics*. 2006. V. 417. P. 201–220.
- Montavalli-Anbaran S.H., Zeyen H., Brunet M.-F., Ardestani V.E.* Crustal and lithospheric structure of the Alborz Mountains, Iran, and surrounding areas from integrated geophysical modeling // *Tectonics*. 2011. V. 30. TC5013. DOI: TC002934 <https://doi.org/10.1029/2011>
- Nissen E., Tatar M., Jackson J., Allen M.* New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran // *Geophys. J. Int.* 2011. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05119.x>
- Nowroozi A.A.* Seismotectonics of the Persian plateau, eastern Turkey, Causasus, and Hindu Kush regions // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1971. № 61. P. 317–341.
- Papazachos B.C., Papaioannou Ch.A.* Lithospheric boundaries and plate motions in the Cyprus area // *Tectonophysics*. 1999. № 308. P. 193–204.
- Papazachos B.C., Dimitriadis S.T., Panagiotopoulos D.G., Papadimitriou E.* Deep structure and active tectonics of the Southern Aegean Volcanic arc // *Developments in Volcanology*. 2005. V. 7. P. 47–64.
- Paul A., Hatzfeld D., Kaviani A., Tatar M., Péquegnat C.* Seismic imaging of the lithospheric structure of the Zagros // *Geological Society. London. Special Publications*. 2010. V. 330. P. 5–18. <https://doi.org/10.1144/SP330.2>
- Pollac H.N., Hurter S.J., Johnson J.R.* Heat flow from the Earth's interior: Analysis of the global data set // *Earth Planet Sci. Lett.* 1993. V. 244. № 1–2. P. 285–301. DOI: 1029/93RG01249
- Rostam G.G., Sakhaei S.R., Ebadati N.* Geodynamic and Tectonic Setting of Oman Line in South of Iran // *American Journal of Geophysics, Geochemistry and Geosystems*. 2016. V. 2. № 5. P. 64–73. <http://www.aiscience.org/journal/aj3g>
- Sasorova E.V., Levin B.W., Morozov V.E.* Hydro-seismicacoustical monitoring of submarine earthquakes preparation: observations and analysis // *Adv. Geosci.* 2008. № 14. P. 99–104. www.adv-geosci.net/14/99/2008/
- Shahvar M.P., Zare M., Castellaro S.* A Unified Seismic Catalog for the Iranian Plateau (1900–2011) // *Seismological Research Letters*. 2013. № 84(2). P. 233–249. <https://doi.org/10.1785/0220120144>
- Şengör A.M.C., Kidd W.S.F.* Postcollisional tectonics of the Turkish-Iranian plateau and a comparison with Tibet // *Tectonophysics*. 1979. V. 55. P. 361–376.
- Solov'ev S.L., Kovachev S.A., Kuzin I.P., Tassos S.* Seismicity of the crust of the Aegean Sea from sea bottom seismological observations // *Доклады АН СССР*. 1989. Т. 305. № 5. С. 1085.
- Talebian M., Jackson J.* A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 156. P. 506–526.
- Talebian M., Jackson J.* Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia–Eurasia collision zone // *Geophys. J. Int.* 2002. V. 150. P. 422–439.
- Tatar M., Hatzfeld D., Ghafory-Ashtiany M.* Tectonics of the Central Zagros (Iran) deduced from microearthquake seismicity // *Geophys. J. Int.* 2004. V. 156. P. 255–266.
- The Global Heat Flow Database. URL: <https://ihfciugg.org/products/global-heat-flow-database/>. Дата обращения: 15.09.2022.
- Trifonov V.G.* Zagros structure of the mountain belt (Iran) // *Geological Society. London. Special Publications*. 2010. V. 330. P. 5–18. <https://doi.org/10.1144/SP330.2>
- USGS. Search Earthquake Catalog. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>. Дата обращения: 25.09.2022.

Microseismicity of the Persian Gulf and the Zagros Mountain Massif According to Bottom Seismological Observations

S. A. Kovachev¹, * and A. A. Krylov¹

¹*Shirshov Institute of Oceanology RAS, Nakhimovsky prosp., 36, Moscow, 117997 Russia*

**e-mail: kovachev@ocean.ru*

Bottom seismological observations in the Persian Gulf over a short period made it possible to detect weak earthquakes with magnitudes ($M_L = -0.2-2.9$), whose sources are located in the mantle under its water area and under the Zagros mountain range. On the section built across the coastline of the Persian Gulf, under the Zagros Mountains, the projections of the sources of the detected earthquakes form seismic focal layers, steeply dipping into the mantle to the northeast to depths of 120–180 km. The spatial distribution of strong and medium earthquakes, obtained from the updated earthquake catalog of the US Geological Survey and the ISC International Seismological Catalog, does not contradict the distribution of sources of micro- and weak earthquakes, but complements it, forming a separate seismic focal layer. According to the data obtained as a result of bottom seismological observations, the entire thickness of the earth's crust of the region and the upper mantle, and not only the upper layers of the crust, as presented in a number of publications, are seismically active. It is possible that collision processes and accompanying phenomena (mantle seismicity and destruction of the granitic layer of the earth's crust) are associated with the presumed presence and rotation of the earth's surface with the center of rotation in the area of about. Cyprus.

Keywords: Persian Gulf, seismicity, seismological observations, bottom seismograph, micro-earthquakes, collision, focus depth, seismic layers