

УДК 551.248.2:550.348(55)

НОВЕЙШИЕ СТРУКТУРЫ И СЕЙСМИЧНОСТЬ ЗАГРОСА

Николай Владимирович Короновский¹, Галина Владимировна Брянцева²✉,
Александр Дмитриевич Жигалин³, Елена Витальевна Архипова⁴,
Ольга Витальевна Анисимова⁵

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; koronovsky@rambler.ru

² Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; bryan.bryan@yandex.ru ✉

³ Институт Физики Земли имени О.Ю. Шмидта РАН; Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; zhigalin.alek@yandex.ru

⁴ Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская обл., Россия; olenageo@mail.ru

⁵ Государственный университет «Дубна», Дубна, Московская обл., Россия; kachestvo@uni-dubna.ru

Аннотация. Современная структура складчато-надвигового сооружения Загрос сформировалась под влиянием коллизионных процессов на восточном фланге зоны коллизии Евразии и Аравии. На основе структурно-геоморфологического анализа и пространственно-временных особенностей распределения сейсмичности рассмотрены особенности новейшего и современного геодинамического развития Загроса как классического коллизионного орогена. Отмечено, что ороген находится на стадии конэрозионного развития, его сейсмическая активизация связана в большей степени с локальными деформациями внутри отдельных блоков и трансформируется под влиянием интенсивных техногенных воздействий, связанных с добычей углеводородов в пределах Месопотамской низменности и Персидского залива.

Ключевые слова: неотектоника, Иран, Загрос, Месопотамская впадина, сейсмичность, структурная геоморфология

Для цитирования: Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Жигалин, А.Д., Архипова Е.В., Анисимова О.В. Новейшие структуры и сейсмичность Загроса // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 4. Геология. 2022. № 5. С. 9–18.

THE LATEST STRUCTURES AND SEISMICITY OF ZAGROS

Nikolay V. Koronovskiy¹, Galina V. Bryantseva²✉, Alexander D. Zhigalin³,
Elena V. Arkhipova⁴, Olga V. Anisimova⁵

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; koronovsky@rambler.ru

² Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; bryan.bryan@yandex.ru ✉

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS, Moscow, Russia;

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; zhigalin.alek@yandex.ru

⁴ State University "Dubna", Dubna, Moscow region, Russia; olenageo@mail.ru

⁵ State University "Dubna", Dubna, Moscow region, Russia; kachestvo@uni-dubna.ru

Annotation. The modern structure of the Zagros folding-thrust structure was formed under the influence of collision processes on the eastern flank of the collision zone of Eurasia and Arabia. Based on structural-geomorphological analysis and spatio-temporal features of the seismicity distribution, the article considers the features of the latest and modern geodynamic development of Zagros as a classical collision orogen. It is noted that the orogen is at the stage of erosion development, its seismic activation is associated to a greater extent with local deformations within individual blocks and is transformed under the influence of intense man-made impacts associated with the extraction of hydrocarbons within the Mesopotamian Lowland and the Persian Gulf.

Key words: neotectonics, Iran, Zagros, Mesopotamian depression, seismicity, structural geomorphology

For citation: Koronovsky N.V., Bryantseva G.V., Zhigalin A.D., Arkhipova E.V., Anisimova O.V. The latest structures and seismicity of Zagros. *Moscow University Geol. Bull.* 2022; 5: 9–18. (In Russ.).

Введение. Складчато-надвиговое сооружение Загроса расположено на восточном фланге Аравийско-Евразийской коллизионной области и простирается в виде дугообразно-изогнутых субпараллельных хребтов и долин-впадин, ориентированных вдоль Месопотамского прогиба. Внешнее крыло прогиба и его осевая часть заняты Месопотамской низменностью и Персидским заливом, в пределах последнего сосредоточены и активно разрабатываются значительные мировые запасы углеводородов.

Горные массивы Загроса представляют собой внешний край Месопотамского прогиба, деформированный в ходе коллизии Евразии и Аравии.

Особенность строения осадочного чехла — наличие нескольких горизонтов солей. Мощная толща вендско-нижнекембрийских эвапоритов ормузской формации находится в основании разреза, в составе верхних горизонтов присутствуют прослои верхнеюрских и нижнемиоценовых соленосных пород. Помимо эвапоритов, особую пластичность отложе-

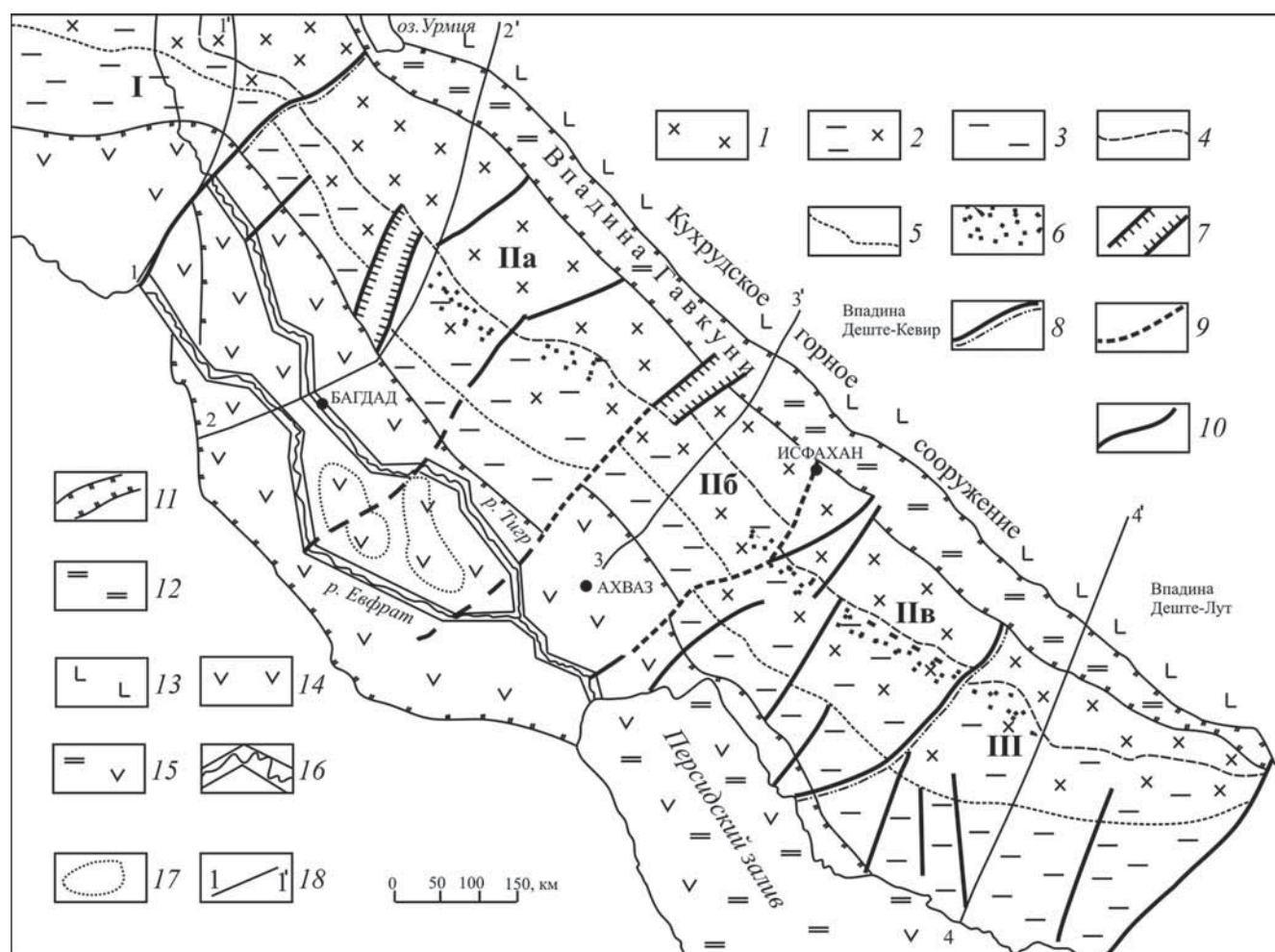


Рис. 1. Схема геоморфологического районирования позднеорогенной структуры Загроса

Горное сооружение Загроса: системы хребтов-поднятий (обобщенные очертания в плане): 1 — Внутренние; 2, 3 — Внешние (предгорье: 2 — высокое, 3 — низкое); 4 — граница между Внутренним и Внешним Загросом; 5 — граница высокой и низкой (предгорье) ступени в пределах Внешнего Загроса; 6 — внутренние горные впадины; 7 — грабенообразные впадины; 8 — зоны изменения общих простираний хребтов-поднятий орогена (I–III); 9 — границы районов (Па, б, в) с разной шириной складчатого сооружения; 10 — предполагаемые секущие разломы

Сопредельные с Загросом структуры: 11 — граница сопредельных впадин Гавкуни и Месопотамской с горным сооружением Загроса; 12 — горная впадина Гавкуни; 13 — Кухрудское горное сооружение; 14–16 — Месопотамская впадина: 14 — Месопотамско-Персидский предгорный прогиб, 15 — акватория Персидского залива, 16 — структурно-приуроченные долины рек Тигр и Евфрат; 17 — предполагаемые внутридепрессийные поднятия; 18 — линии профилей

ний Месопотамского прогиба обеспечивают многочисленные глинистые прослои мел-палеогенового возраста. Современное развитие структур Загроса происходит под влиянием поперечного укорочения, а также субширотного сжатия с формированием складок и структур выжимания с надвиганием в юго-западном направлении. Благодаря наличию слоев пониженной вязкости чехол Загроса слабо связан с фундаментом и дисгармонично деформируется в ходе коллизионных процессов с образованием складок, чешуйчатых надвигов и соляных диапиров [Трифонов, 2012].

Современное строение Загроса позволяет рассматривать его как классический пример орогена в структуре Альпийско-Гималайского коллизионного пояса [Бачманов и др., 2000; Копп, 1997]. Чтобы выявить специфические особенности новейшего развития Загроса как типичного коллизионного

орогена, нами выполнен структурно-геоморфологический анализ. Для выявления особенностей современного сейсмотектонического развития, в том числе в условиях интенсивной добычи углеводородов, проанализировано пространственно-временное распределение сейсмичности.

Материалы и методы исследования. Структурно-геоморфологический анализ. В формировании рельефа орогенов выделяют два этапа. К первому и, по-видимому, более длительному этапу относится *конденудационный* этап развития, при котором поднятия и впадины орогена еще не выражены в рельефе. Второй этап — *конэрозионный*, при котором зарождаются морфологически выраженные структурные формы. Ороген Загроса сформировался в результате эволюции и закрытия мезозойского океана Тетис. Начало первого (конденудационного) этапа относится к среднему–позднему миоцену,

когда в результате коллизии после смыкания Аравийской плиты со структурами Центрального Ирана на северо-востоке началось развитие складчатости [Трифонов, 2016]. Начало второго (конэрозионного) этапа в пределах горного сооружения Загрос приурочено главным образом к плиоцену и соответствует морфологическому становлению горного сооружения. На завершающем — орогенном — этапе развития происходила перекомпоновка структуры горного сооружения по системе региональных надвигов и сдвигов с большой амплитудой. Интенсивность деформаций постепенно смещалась в юго-западном направлении. В результате внутреннее складчатое крыло Месопотамского прогиба было втянуто в общее поднятие Загроса в конце миоцена [Хаин, 2001], а формирование антиклинальных складок, вытянутых вдоль горного сооружения Загроса, началось в раннем плейстоцене и продолжается в настоящее время [Трифонов, 2016]. В современном рельефе Месопотамская низменность выражена равниной с отметками высоты, не превышающими 100–200 м. Однако на этом фоне хорошо дешифрируются развивающиеся локальные поднятия, особенно вдоль его северо-восточной границы с горным сооружением.

Формирование горного сооружения Загроса связано с перемещением Аравийской плиты на север и северо-восток, когда отложения пассивной окраины Неотетиса, представленные породами палеозоя, мезозоя и кайнозоя с мощной эвапоритовой формацией венд-кембрийского возраста в основании общей мощностью до 8–10 км, были смяты в протяженные складки [Хаин, 2001].

В результате новейшего тектонического развития в рассматриваемом регионе широкое развитие получили складчато-блоковые и сводово-блоковые структурные формы, выраженные в рельефе в виде новейших хребтов-поднятий и межгорных впадин. Эта важнейшая особенность развития определила применение специальных методов структурно-геоморфологического анализа. В пределах складчато-блоковой орогенной структуры Загроса, сформировавшейся в позднеорогенный этап развития, с северо-запада на юго-восток наблюдается изменение простирания хребтов-поднятий, что позволяет выделить три района (рис. 1): Западный (I), Центральный (II) и Восточный (III).

Коллизионный процесс в Загросе последовательно смещался в сторону Месопотамского передового прогиба, что привело к формированию различных по строению продольных зон, связанных с временем начала складчатости в соответствующей зоне орогена [Бачманов, 2001]. В соответствии с этим по изменению морфологии складок [Короновский и др., 2017] и их внутренней структуры [Хаин, 1984] горное сооружение Загроса можно подразделить на Внешний и Внутренний.

Западный район (рис. 1, I) характеризуется субширотным простиранием и общим сокращением

горного сооружения в направлении к Диярбакырской впадине, а полное его вырождение происходит в районе свода Рутба, представляющего собой погребенный выступ Аравийско-Нубийского щита [Хаин, 2001]. Именно здесь Загрос обрамляет с севера Месопотамский передовой прогиб.

Ширина поднятия складчато-блокового сооружения Внутреннего Загроса на этом участке значительно превосходит ширину Внешнего. Хребты Внешнего Загроса расположены кулисообразно, их высота редко превышает 1000 м, они разделены широкими впадинами. Брахиморфные структуры Внутреннего Загроса имеют ширину до 50 км, высота их достигает 2–3 км [Короновский и др., 2017]. Граница Западного района с Центральным четкая, определяется переходом субширотного простирания всех орогенных хребтов-поднятий Загроса в юго-восточное.

Центральный район (рис. 1, II) на всем протяжении имеет общее юго-восточное простирание. Для горного сооружения этого района характерно морфологическое отличие между поднятиями Внешнего и Внутреннего Загроса. Внешний Загрос характеризуется ярко выраженным простиранием линейных цепей хребтов горст-антиклиналей и сопредельных грабенообразных впадин. Большинство складок здесь имеет небольшую (10–15 км) ширину при значительном протяжении (100 км и более), с кулисообразным замещением хребтов-поднятий. Это свидетельствует о существенной роли горизонтальных смещений, сопровождавших формирование новейших структур, и наличии складок срыва [Короновский и др., 2017]. Внешняя зона Загроса сложена осадочными образованиями от вендских до миоценовых общей мощностью 10–12 км. В развитии складчатости этой зоны важную роль играли горизонты эвапоритов [Бачманов, Иванова и др., 2000]. Во Внутреннем Загросе хребты-поднятия и долины-впадины становятся шире, их линейный облик выражен менее четко, чем у Внешнего Загроса. Здесь преобладают брахиморфные очертания орогенных поднятий, особенно в его северо-западной части. Ширина хребтов достигает 30 км и более.

В пределах Центрального района в соответствии с изменением ширины горного сооружения Внешнего Загроса можно выделить 3 подрайона (а, б, в), которые несколько отличаются по размеру. *Первый подрайон* (рис. 1, IIa) характеризуется значительным развитием и большей шириной складчато-блоковых систем хребтов-поднятий и впадин. В пределах первого подрайона Внутреннего Загроса брахиморфные структуры отличаются от линейных структур Внешнего Загроса. Последний осложнен крупным секущим грабеном, моделированным рекой. На юго-востоке от грабена происходит постепенное расширение Внешнего Загроса и предгорий. *Второй подрайон* (рис. 1, IIб) выделяется своими очертаниями — он сужается в плане, что сопровождается здесь расширением Месопотамской впадины. Гра-

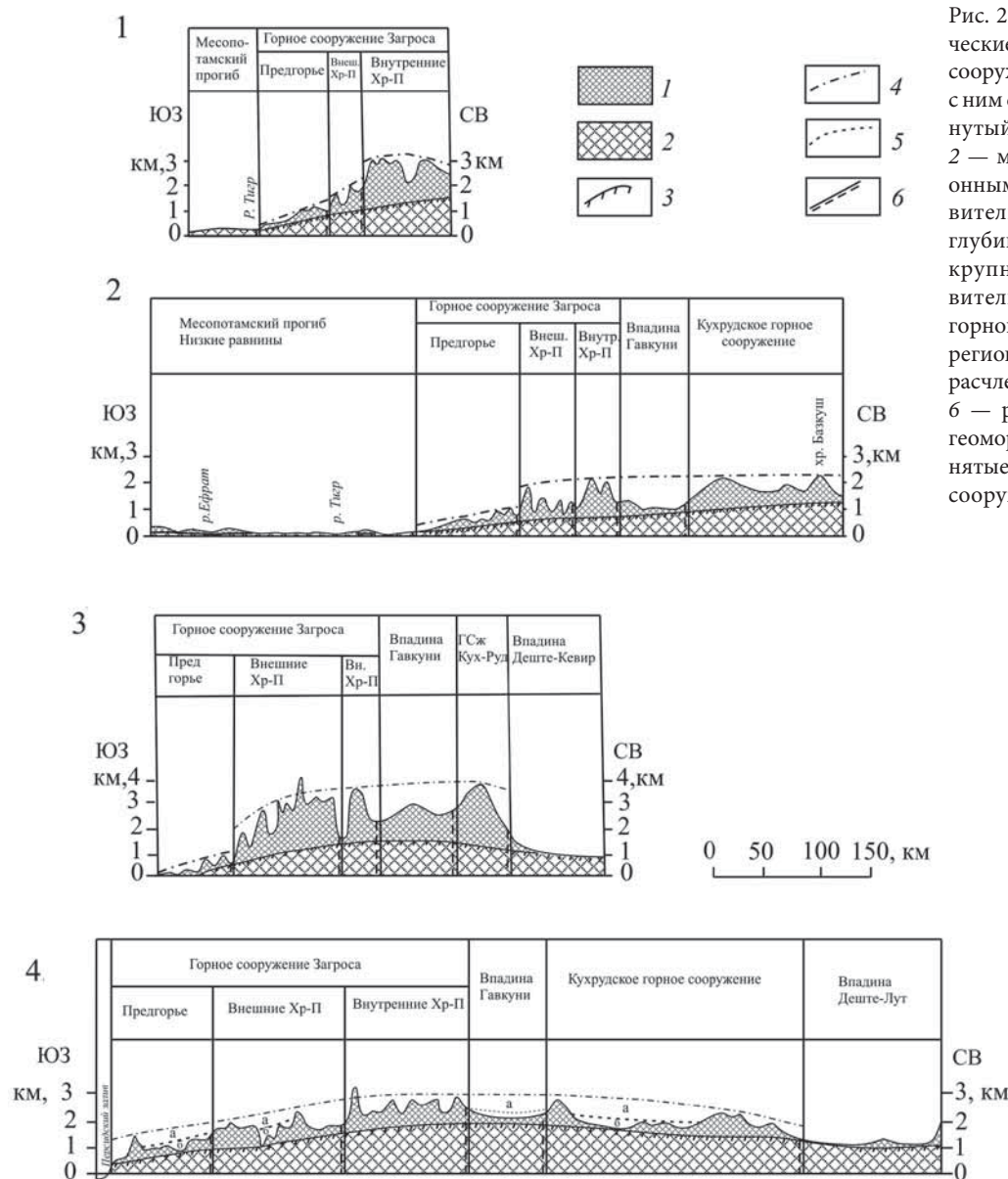


Рис. 2. Поперечные геоморфологические профили (1–4) через горное сооружение Загроса и сопредельные с ним структуры: 1 — массив, затронутый эрозионным расчленением; 2 — массив, не затронутый эрозионным расчленением; 3 — сопоставительная линия, объединяющая глубину эрозионного расчленения крупными реками; 4 — сопоставительные линии реконструкции горного сооружения; 5 — границы региональных циклов эрозионного расчленения (а, б — номера циклов); 6 — разрывы, определенные по геоморфологическим данным. Принятые сокращения: ГСЖ — горное сооружение, Хр-П — хребты-поднятия

ница с первым подрайоном проходит по грабену, секущему по отношению к горному сооружению Загроса. Выражение в рельефе грабена отчетливее на участке пересечения им Кухрудского горного сооружения. *Третий подрайон* (рис. 1, Пв), как и первый, характеризуется значительной шириной горного сооружения. Однако здесь наблюдается сокращение зоны Внутреннего Загроса и расширение Внешнего Загроса, а также обилие секущих разрывов субмеридионального простирания, осложняющих строение складчато-блоковых хребтов-поднятий.

Восточный район Загросского горного сооружения (рис. 1, III) простирается до Оманского разлома, проходящего в западной части Ормузского залива. На этом участке происходит изменение простирания орогенных поднятий Внешнего и Внутреннего Загроса с юго-восточного на субширотное. Здесь, в восточном направлении, наблюдается сужение горного сооружения Внутреннего Загроса и значительное расширение зоны предгорий.

Особенность метода геоморфологического исследования — объемный (трехмерный) анализ орографических форм в плане и в двух вертикальных сечениях — продольном и поперечном, а также в их взаимной увязке. В поперечном строении складчатая система Загроса может быть подразделена на Предгорье, Внешнюю и Внутреннюю зоны (рис. 2). Хамаданскую зону, которая примыкает к системе Загроса с северо-востока, большинство исследователей также включают в складчатую систему Загроса [Короновский и др., 2017].

В результате исследования вертикальных поперечных сечений Загроса (рис. 2) установлены следующие особенности его строения. В пределах Западного района (профиль 1) отчетливо выделяется по высоте зона предгорий и система хребтов-поднятий. Их разная морфология позволяет считать, что все три зоны (Предгорье, Внешняя и Внутренняя горные зоны) разделены разломами, которые определяют своеобразие и особенности их новейшего

развития. По мнению Д.М. Бачманова и др. [2000], эти разломы, служащие границами главных зон, достигают фундамента.

В Центральном районе (профили 2 и 3) все упомянутые уже различия между зонами становятся еще более выраженными. Впадина Гавкуни морфологически отчетливо выражена, но ее южный склон уже испытывает тенденцию к поднятию и причленению к горному сооружению Загроса. Начинается формирование общего сводообразного гетерогенного поднятия, в котором участвует и Кухрудское горное сооружение. В Восточном районе (профиль 4) особенно ярко выражено формирование единого сводообразного поднятия Загрос-Кухрудского гетерогенного горного сооружения. Высота Предгорья изменяется от 200 до 2000 м. Граница предгорья и Загросского горного сооружения поводится по резкому увеличению наклона южного горного склона (профиль 1) или по резкому изменению высоты (профили 2 и 3), превышение составляет до 1,5 км.

Таким образом, в пределах Загросского горного сооружения наблюдается повсеместное морфологическое преобладание хребтов над впадинами, что позволяет считать хребты более активным компонентом позднеорогенной структуры горного сооружения. Вертикальные сечения через Загрос, сопредельную горную впадину Гавкуни и Кухрудское горное сооружение свидетельствуют, что в целом эти горные сооружения активно разрастаются за счет сопредельной впадины. Это привело к возникновению в рельефе новой сложной гетерогенной структуры — общего обширного сводообразного поднятия — Загросско-Кухрудского. Такое строение структурно обусловленного рельефа свидетельствует о направленном положительном конэрозионном развитии горного рельефа в плиоцене–плейстоцене.

Анализ пространственно-временного распределения сейсмичности. Сейсмичность Загроса находится под влиянием нескольких процессов различных масштаба и генезиса, включая конвергентное движение Евразии и Аравии, преобразование отложений чехла и верхней части фундамента во внешней части Месопотамского прогиба, а также изменение флюидного режима, связанного с интенсивной добычей углеводородов, особенно интенсивной в районе Персидского залива. Пространственно-временной анализ сейсмичности выполнен для того, чтобы, с одной стороны, выявить пространственно-временные особенности распределения сейсмичности в условиях взаимодействия этих процессов, а с другой — оценить динамику и степень влияния этих процессов на основе анализа временного хода сейсмичности для региона в целом, для отдельных участков концентрации эпицентров землетрясений, а также для различных уровней локализации сейсмических очагов.

Пространственное распределение эпицентров землетрясений. Для выявления пространственно-временных закономерностей распределения сейс-

мичности использовали Мировой каталог USGS за период с 1973 по 2021 г. [Мировой каталог ... USGS]. Пространственное распределение эпицентров землетрясений в пределах Загроса выявлено в результате построения карты плотности эпицентров с окном осреднения $1^\circ \times 1^\circ$ с нанесением отдельных эпицентров сильных событий с $M \geq 6$. (рис. 3).

На карте плотности эпицентров землетрясений с $M \geq 4,5$ отчетливо обособляются три основных кластера событий, которые согласуются со сменой простирания геологических структур Загроса и приурочены к зонам изменения общих простираний хребтов-поднятий орогена (рис. 1). Кластер I приурочен к северному сегменту Загроса, который ограничивает с севера впадину Месопотамского прогиба. Наиболее протяженный кластер II расположен в центральной части Загроса с общим северо-западным простиранием структур. Внутри кластера отчетливо обособляются северо-западное и юго-восточное скопления эпицентров, которые выделены как отдельные домены Π^1 и Π^2 . Кластер III находится на юго-восточном замыкании Загроса с субширотным простиранием структур. Приуроченность к центральным частям складчато-надвигового сооружения Загроса указывает на то, что основная сейсмическая активность проявляется не вблизи региональных магистральных разломов, обрамляющих Загрос, а сосредоточена именно в центральной части и, по-видимому, в большей степени обусловлена деформациями локального характера в пределах каждого кластера.

Эпицентры сильных событий в пределах большинства кластеров локализованы в основном в их центральных частях. Только в домене Π^2 сильные события тяготеют к его периферии и отсутствуют на западе. Возможно, снижение активности сильных событий в центральной и западной частях домена Π^2 связано со сменой сильных событий сериями более слабых событий в условиях интенсивной добычи углеводородов в районе Персидского залива. В целом для кластера II, расположенного в пределах наиболее протяженного центрального сегмента Загроса, характерна приуроченность сильных событий к Внутреннему Загросу (рис. 3).

На гистограмме, которая показывает распределение гипоцентров сейсмических событий по глубине, отчетливо обособляются два сейсмически активных уровня (рис. 4). Один из них приурочен к небольшой глубине (до 10 км), а другой — к глубине от 30 до 40 км. Отчетливая неоднородность распределения сейсмических событий по глубине, на наш взгляд, связана с разными причинами — активизация верхнекоровых событий происходит под влиянием техногенных воздействий, в то время как высокая концентрация гипоцентров на глубине от 30 до 40 км обусловлена современными сейсмотектоническими процессами.

Временной ход сейсмических событий. Анализ временного хода сейсмических событий за период

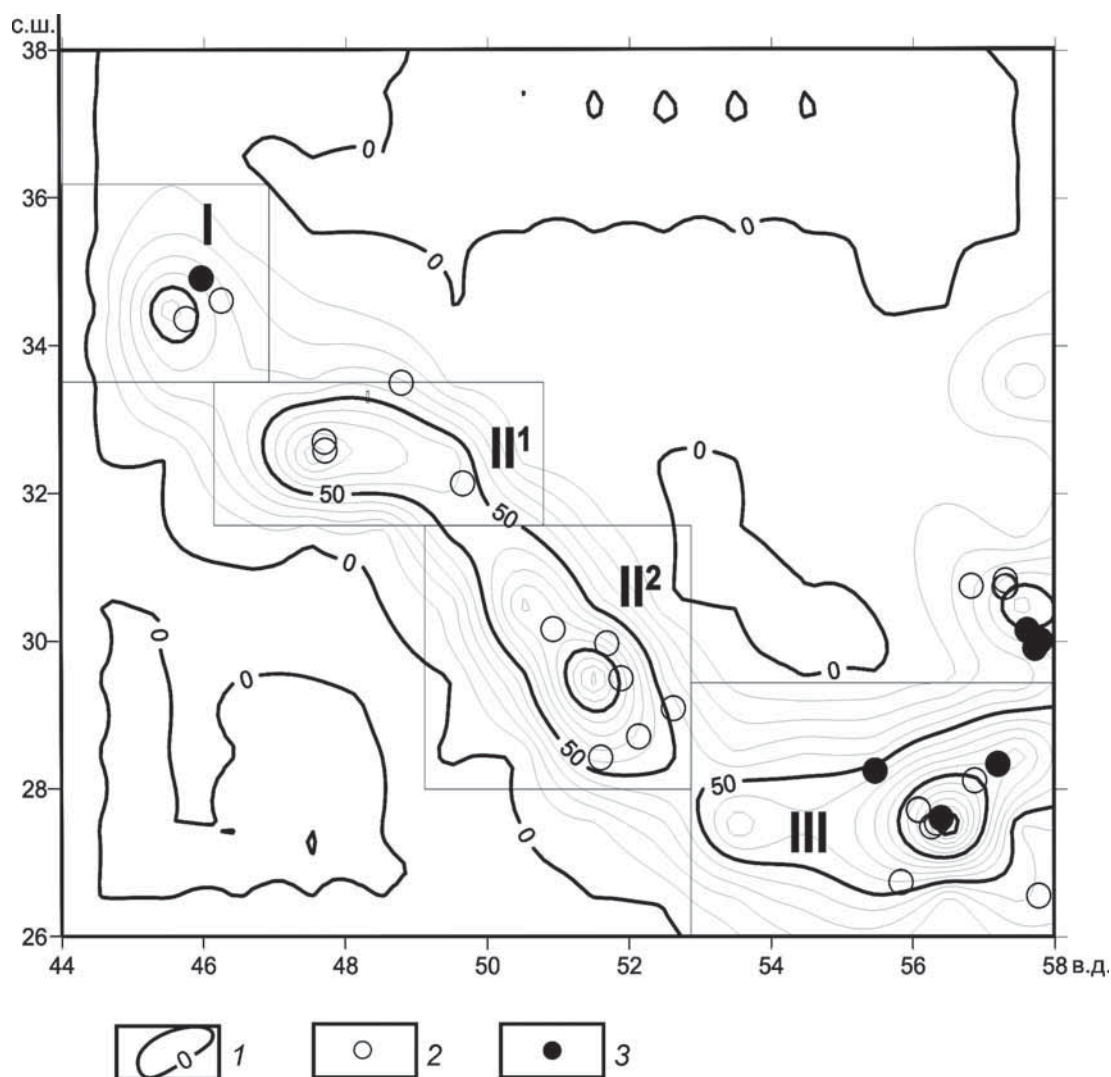


Рис. 3. Карта плотности эпицентров сейсмических событий с $M \geq 4,5$. Прямоугольниками обозначены кластеры с высокой концентрацией событий: I — Западный Загрос; II¹, II² — Центральный Загрос; III — Восточный Загрос; 1 — изолинии плотности эпицентров; 2, 3 — эпицентры сильных землетрясений: 2 — с $M=6\div 6,5$; 3 — с $M \geq 6,5$

с 1973 по 2021 г. для всего Загроса, а также для отдельных доменов проводился путем построения временных рядов со скользящим осреднением по 5 годам, а также их корреляционного сопоставления. Минимальная магнитуда представительных событий, начиная с которой делали выборки для построения временных рядов, определена по изменению прямолинейности графика повторяемости землетрясений общей выборки по Загросу в области малых значений магнитуды (рис. 5).

На общем графике изменения числа сейсмических событий со скользящим осреднением по 5 годам и сдвигом в один год видны флуктуации среднегодовых значений в интервале от 24 до 58 событий с общим трендом на активизацию к концу рассматриваемого периода (рис. 6). Построенный по той же методике график изменения числа сильных событий с $M \geq 6$ демонстрирует относительное увеличение активности в начале и в конце рассматриваемого периода, при этом наиболее контрастная активизация приурочена к последнему десятилетию периода наблюдений. Анализируя пространствен-

но-временную локализацию сильных событий, отметим, что резкое увеличение активности во второе десятилетие XXI в. реализуется за счет наличия 3-х событий в I кластере в 2017 и 2018 г., 2-х событий в домене II¹ в 2014 г., а также одного события в домене II² и в кластере III в 2013 г. В активизации сильных событий в Загросе в интервале с 2013 по 2018 г. прослеживается миграция в направлении с юго-востока на северо-запад, что в целом согласуется с направлением воздействия в результате северного дрейфа Аравийской литосферной плиты. Возможно, сильное событие в кластере III в 2021 г. — начало нового цикла активности, которая в дальнейшем будет реализована вдоль Загроса в северо-западном направлении.

На следующем этапе анализа построены временные ряды, отражающие вариации активности землетрясений с $M \geq 4,5$ в кластерах I и III, а также в доменах II¹ и II² в соответствии с выделением участков с высокой плотностью эпицентров в кластере II (рис. 7). В целом для всего периода наблюдений значимые корреляции временных рядов не выявлены

Рис. 4. Распределение гипоцентров землетрясений Загроса с $M \geq 4,5$ по глубине, по [Мировой каталог ... USGS]

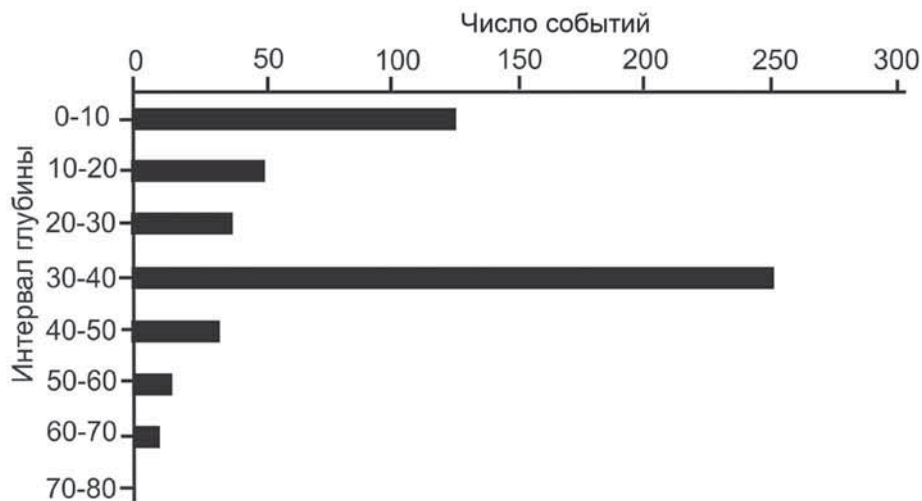


Рис. 5. График повторяемости землетрясений Загроса за период с 1973 по 2021 г., по [Мировой каталог ... USGS]. 1 — прямолнейная часть графика повторяемости землетрясений, 2 — график повторяемости землетрясений для событий с $M \geq 3$

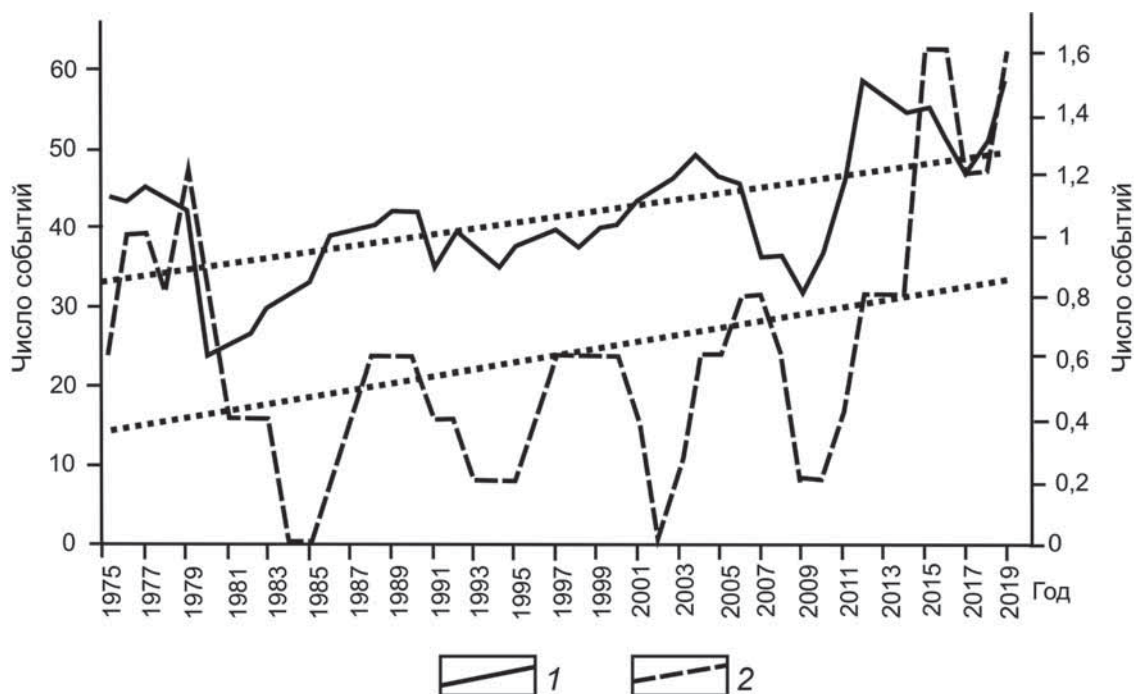
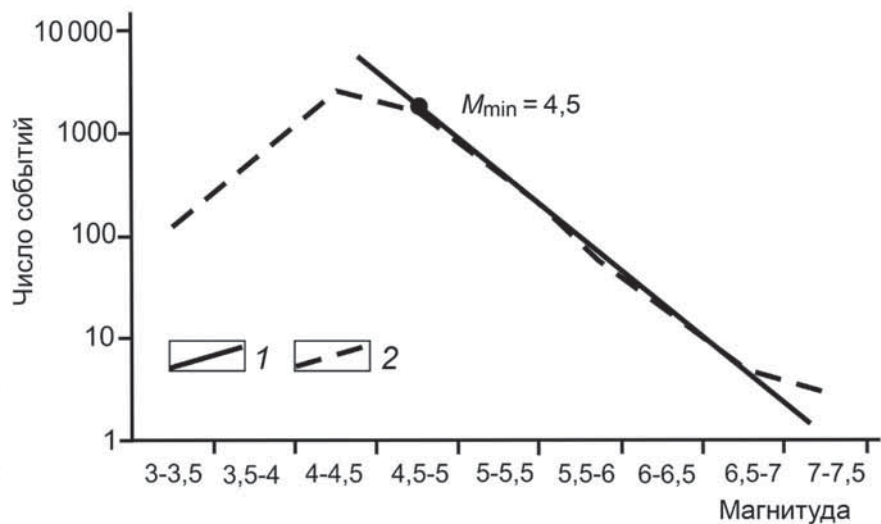


Рис. 6. Временной ход землетрясений Загроса с $M \geq 4,5$ (1) и $M \geq 6$ (2, ось справа) в период с 1973 по 2021 г. Скользящее среднее по 5 годам, год на горизонтальной оси — год середины 5-летнего интервала, пунктиром показаны линии трендов

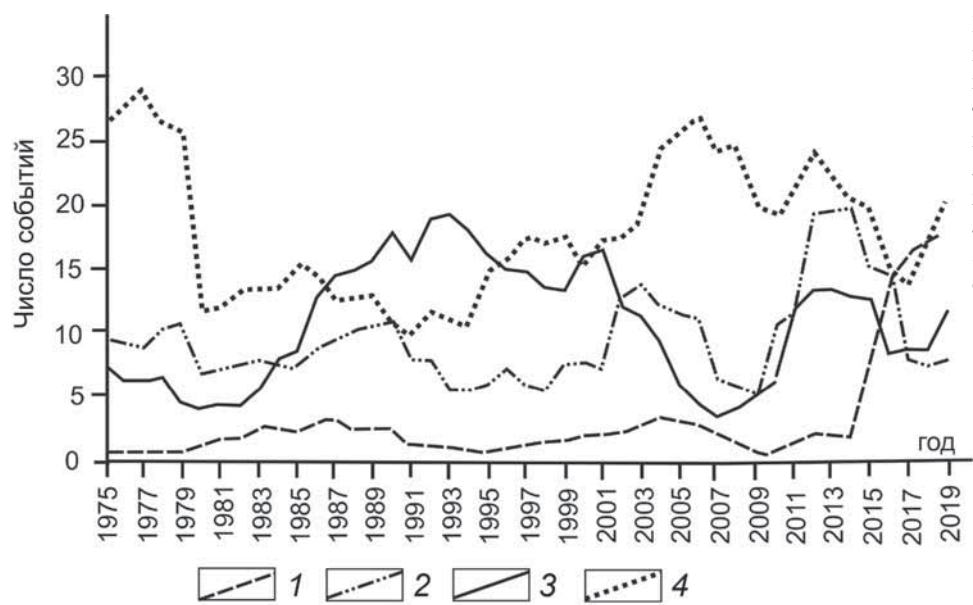


Рис. 7. Временной ход землетрясений Загроса с $M \geq 4,5$ в кластерах с высокой концентрацией эпицентров землетрясений в период с 1973 по 2021 г.: 1 — Западный Загрос; 2, 3 — Центральный Загрос (2 — домен 1, 3 — домен 2); 4 — Восточный Загрос. Скользящее среднее по 5 годам, год на горизонтальной оси — год середины 5-летнего интервала

(таблица). При сопоставлении временных рядов отмечены два случая временной синхронизации вариаций сейсмичности: синхронизация для кластера I и домена II¹ в период с начала наблюдений до 2011 г.; противофазное изменение сейсмичности для домена II² и III кластера в интервале от 1987 до 2010 г. с коэффициентом корреляции, равным $-0,9$. Для кластеров I и II, соответствующих северо-западному и центральному сегментам Загроса, отмечен общий пик активности в период 2010–2016 гг. Для кластера III на юго-востоке Загроса пиковая активизация наступила несколько позже, к концу рассматриваемого периода наблюдений. В итоге анализ временных вариаций в отдельных кластерах показывает, что, несмотря на отдельные периоды и эпизоды временной синхронизации, изменение активности кластеров носит мозаичный характер и, скорее всего, обусловлено локальными деформациями в различных сегментах Загроса под влиянием коллизии.

Следующая группа временных рядов построена для разных уровней глубины. Отдельно рассматривались верхнекоровые события с глубиной гипоцентров до 10 км, промежуточный уровень активности на глубине от 10 до 25 км, а также в основном нижнекоровые события с глубиной очага >25 км (рис. 8). На рис. 8 отчетливо видна относительная активизация событий с глубиной очагов >25 км в середине рассматриваемого периода и резкое сниже-

ние к его концу. В то же время события на глубине ≤ 25 км, напротив, активизировались к концу периода наблюдений. На графике, отражающем изменение числа событий с глубиной очагов до 10 км, с 2010 г. прослеживается резкое увеличение активности. Последний пик в 4 раза превышает среднегодовой уровень в 11 событий, отмеченный для предыдущего периода максимальной активности в 1987 г.

При сопоставлении отдельных графиков выяснилось, что тенденции изменения активности верхнекоровых и нижнекоровых событий противоположны, это подтверждается и более ранними нашими исследованиями [Короновский и др., 2017]. Временной ряд с промежуточной глубиной от 10 до 25 км, который приблизительно соответствует нижней части деформированного осадочного чехла, по тенденции изменения сейсмичности ближе к временному ряду в интервале глубины 0–10 км. При корреляционном сопоставлении с временным рядом для глубины >25 км выяснилось, что оба временных ряда, отражающие вариации относительно мелких событий, находятся с ним в противофазе (таблица). Таким образом, выявлена обратная динамическая взаимосвязь изменения сейсмичности для событий выше и ниже уровня 25 км.

Результаты исследований и их обсуждение. Складчато-надвиговое сооружение Загроса развивается под влиянием коллизионных процессов на

Значения коэффициента корреляции временных рядов годового числа землетрясений с $M \geq 4,5$ с 1973 по 2021 г. со скользящим осреднением по 5 годам и сдвигом в один год для различных кластеров (1.1) и уровней глубины (1.2) в пределах Загроса

1.1.					1.2.			
Кластер	I	II ¹	II ²	III	<i>h</i>	<i>h</i> ≤ 10	25 ≤ <i>h</i> < 10	<i>h</i> > 25
I		0,08	−0,06	−0,07	<i>h</i> ≤ 10		0,54	−0,55
II ¹	0,08		0,04	0,33	25 ≤ <i>h</i> < 10	0,54		−0,75
II ²	−0,06	0,04		−0,5 (−0,9)	<i>h</i> > 25	−0,55	−0,75	
III	−0,07	0,33	−0,5 (−0,9)					

Примечание. Курсивом выделены значения коэффициента корреляции на временном интервале с 1987 по 2010 г.



Рис. 8. Временной ход землетрясений Загроса с $M \geq 4,5$ на разных уровнях глубины гипоцентров в период с 1973 по 2021 г.: 1 — глубина 10–25 км, 2 — 0–10 км, 3 — >25 км. Скользящее среднее по 5 годам, год на горизонтальной оси — год середины 5-летнего интервала

восточном фланге области сближения Евразии и Аравии. Динамика этого процесса находит отражение в постепенном изменении морфологии рельефа и сейсмических проявлениях. Результаты структурно-геоморфологического анализа показывают интенсивное протекание процессов орогенеза с вовлечением в поднятие межгорных впадин. При этом максимальная плотность сейсмических событий отмечена в центральных частях складчатой системы, где она сопровождается современным интенсивным поднятием горной системы Загроса. Протекание сейсмического процесса в отдельных кластерах во времени носит хаотичный характер, с периодичной синхронизацией проявлений отдельных кластеров или их фрагментов.

По вертикали отчетливо обособляются два уровня максимальной активности. Один из них расположен в приповерхностной части земной коры до глубины 10 км, а другой — в верхах нижней коры на глубине 30–40 км, где связан с хрупкими деформациями по чешуйчатым надвигам и другим структурам дробления, образование которых сопровождается утолщением нижней коры в процессе орогенеза. Относительно более низкая активность других уровней связана с особенностями состояния вещества на разной глубине. В пределах глубоких частей чехла пониженная вязкость обеспечивается литологическим составом пород и их высокой флюидонасыщенностью, а в пределах более глубоких частей нижней коры — особыми термодинамическими условиями [Трифонов, 2012]. Учитывая особенности строения и изменения вязкости коры на разной глубине, а также данные о распределении гипоцентров, можно сказать, что большинство

относительно глубоких землетрясений отражает деформационные процессы, связанные с поперечным сжатием и утолщением коры, и приурочено к наиболее хрупкой части фундамента с наличием надвигов и иных структур дробления.

Верхний уровень с глубиной очагов до 10 км становится активным лишь в последние 15 лет вследствие появления землетрясений, в том числе и сильных, на малой глубине. По-видимому, тенденция к резкому увеличению числа землетрясений связана здесь с изменениями в ходе интенсивной добычи углеводородов в Персидском заливе и примыкающих частях восточного борта Месопотамской впадины и Внешнего Загроса [Алджабасини, 2021]. Одна из последних работ о возможной природно-техногенной природе землетрясений Загроса — исследование сейсмической последовательности событий Халили в 2019–2020 гг. в районе газового месторождения Шануль на территории Юго-Восточного Загроса [Jamalreyhani, 2021]. Один из главных аргументов в пользу антропогенного происхождения этой последовательности — снижение глубины очагов по сравнению с фоновой сейсмичностью района. Современная сейсмическая активизация земной коры на малой глубине свидетельствует о важной роли добычи углеводородов в изменении общей системы накопления и разрядки тектонических напряжений и для Загроса в целом.

Индущирующие техногенные воздействия, которые накладываются на естественные деформационные процессы, могут неоднозначно сказываться на сейсмической опасности региона. С одной стороны, такие воздействия ведут к некоторому смягчению сейсмических сценариев со сменой сильных событий

на серии относительно слабых. По-видимому, это наблюдается для Центрального Загроса (кластер II), в пределах которого сильные события тяготеют к его восточному краю (рис. 3). С другой стороны, дефлюидизация и изменение напряженно-деформированного состояния верхов коры приводят к более жестким сценариям разрушения, которые сопровождаются увеличением активности землетрясений на небольшой глубине.

Выводы. 1. Формирование общего структурно-географического плана, региональные деформации с образованием магистральных разрывов, продольной и поперечной зональности складчато-надвигового сооружения Загроса происходят в условиях новейшего развития региона как восточного фланга области коллизии Евразии и Аравии.

2. Строение структурно обусловленного рельефа, а именно преобладание горных хребтов над

впадинами и постепенное вовлечение впадин в процесс поднятия, свидетельствует о направленном положительном конэрозионном развитии горного рельефа Загроса в плиоцене–плейстоцене.

3. Наличие зон высокой концентрации эпицентров в центральных частях Западного, Центрального и Восточного сегментов Загроса указывает на то, что наиболее активно проявляются в современной сейсмичности локальные деформации отдельных блоков, связанные с общим утолщением коры в условиях сжатия и орогенеза.

4. Пиковая активизация верхнекоровых землетрясений на глубине до 10 км в последние десятилетия сигнализирует о перестройке системы накопления и разрядки тектонических напряжений под влиянием изменений напряженно-деформированного состояния и флюидного режима в ходе интенсивной добычи углеводородов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Алджабасини Мухаммад Диб Хиба. Геологическое строение и сейсмическая активность региона нефтедобычи Персидского залива: Автореф. канд. дисс. М., 2021.

Бачманов Д.М. Возрастная зональность грубой молассы Внешнего Загроса и миграция новейшего орогенеза // Геотектоника. 2001. № 6. С. 90–94.

Бачманов Д.М., Иванова Т.П., Кожурин А.И., Трифонов В.Г. Проблемы континентальной коллизии: современный коллизионный пояс Загроса // Общие вопросы тектоники. Тектоника России: Мат-лы XXXIII тектонич. совещ. М.: ГЕОС, 2000. С. 36–39.

Копп М.Л. Структуры латерального выжимания в Альпийско-Гималайском коллизионном поясе. М.: Научный мир, 1997. 314 с.

Короновский Н.В., Брянцева Г.В., Архипова Е.В., Анисимова О.В. Структурно-геоморфологический анализ и сейсмичность Иранского региона // Бюлл. МОИП. Отд. геол. 2017. Т. 93, № 3. С. 12–22.

Мировой каталог землетрясений геологической службы USGS [Электрон. ресурс]. URL: <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/> (дата обращения: 21.02.2022)

Трифонов В.Г. Неотектоника подвижных поясов. М.: ГЕОС, 2017 (Тр. ГИН РАН; вып. 614). 180 с.

Трифонов В.Г., Додонов А.Е., Бачманов Д.М. и др. Неотектоника, современная геодинамика и сейсмическая опасность Сирии / Отв. ред. В.Г. Трифонов. М.: ГЕОС, 2012. (Тр. ГИН РАН; вып. 598). 216 с.

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

Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.

Jamalreyhani M., Pousse-Beltran L., Büyükkapınar P. et al. The 2019–2020 Khalili (Iran) earthquake sequence — anthropogenic seismicity in the Zagros simply folded belt // J. Geophys. Res.: Solid Earth. 2021. Vol. 126. e2021JB022797. С. 1–19. URL: <https://doi.org/10.1029/2021JB022797>

Статья поступила в редакцию 31.05.2022,
одобрена после рецензирования 08.06.2022,
принята к публикации 22.11.2022