

УДК 551.2.03

DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

Оригинальная статья

Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона

В.Б. Свалова ^{1,2}, В.Б. Заалишвили ^{1,3}

¹ Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН,
Россия, 362002, г. Владикавказ, ул. Маркова 93а, e-mail: vzaal@mail.ru;

² Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН, Россия,
101000, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2,
e-mail: v-svalova@mail.ru;

³ Северо-Осетинский государственный университет
им. К.Л. Хетагурова, Россия, 362025, г. Владикавказ, ул. Ватутина 44-46

Статья поступила: 19.01.2024, доработана: 22.03.2024, принята к публикации: 25.03.2024

Резюме: Актуальность работы. Активизация природных катаклизмов в мире требует разработки новых подходов к изучению геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит. Геодинамика исследуемого региона определяется столкновением Евразийской и Аравийской литосферных плит, а также сложной историей развития Альпийско-Гималайского пояса и прилегающих территорий. Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции и северо-западе Сирии 6 февраля 2023 года. Это самое смертоносное стихийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения (включая второе событие 6 февраля 2023 года магнитудой 7,7) нанесли ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США. **Целью исследования** является снижение геоэкологического риска опасных природных и природно-техногенных процессов в литосфере и выявление их связей с глубинной геодинамикой. **Методы исследования.** Построение геодинамических моделей глубинного строения районов стихийных бедствий является важным вкладом в изучение активных континентальных окраин и необходимо для прогнозирования землетрясений, оценки геоэкологических рисков и разработки соответствующих мероприятий, что требует анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных и постановки и решения задач механико-математического моделирования. **Результаты исследования.** Построены геодинамические модели районов с опасными природными процессами с целью смягчения последствий стихийных бедствий и катастроф. На основе анализа геолого-геофизических данных, сейсмотомографии и метода аналогий можно прогнозировать сильное землетрясение в регионе Стамбула через несколько лет (1–10 лет). На той же основе делается заключение, что, если сильное землетрясение в регионе Восточно-Анатолийского разлома не произойдет через 1–2 года, то оно случится только через 100 лет.

Ключевые слова: стихийные бедствия, землетрясения, геодинамика, сейсмичность, геотермия, Кавказ, Турция, моделирование, сейсмотомография, прогноз.

Для цитирования: Свалова В.Б., Заалишвили В.Б. Глубинная геодинамика и сейсмичность Кавказско-Анатолийского региона. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 77-89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

Original paper

Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region

V.B. Svalova ^{1,2}, V.B. Zaalishvili ^{1,3}

¹ Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation, e-mail: vzaal@mail.ru;

² Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences, 13 Ulansky lane, 2 p., Moscow 101000, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru;

³ North Ossetian State University named after K.L. Khetagurov, 44-46 Vatutina Str., Vladikavkaz 362025, Russian Federation

Received: 19.01.2024, revised: 22.03.2024, accepted: 25.03.2024

Abstract: Relevance. The intensification of natural disasters in the world requires the development of new approaches to the study of geological processes, in particular, at the boundaries of lithospheric plates. The geodynamics of the region is determined by the collision of the Eurasian and Arabian lithospheric plates, as well as the complex history of the development of the Alpine-Himalayan belt and adjacent territories. A magnitude 7.8 earthquake struck southeastern Turkey and northwestern Syria on February 6, 2023. It is the deadliest natural disaster in Turkey's modern history (46,100 in Turkey and more than 6,700 in Syria). The earthquakes caused more than US\$100 billion in damage. **The aim of the study is** to mitigate the geoeological risk of dangerous natural-technological processes in the lithosphere and identify their connections with deep geodynamics. **Research methods.** The construction of geodynamic models of the deep structure of natural disaster areas is an important contribution to the study of active continental margins and is necessary for predicting earthquakes, assessing geo-ecological risks and developing appropriate measures, which requires the analysis of all available geological and geophysical data and the formulation and solution of mechanical and mathematical modeling problems. **Results.** Geodynamic models of areas with hazardous natural processes have been constructed in order to mitigate the consequences of natural disasters. Based on the analysis of geological and geophysical data, seismic tomography and the method of analogies, it is possible to predict a strong earthquake in the Istanbul region in a few years (1-10 years). On the same basis, it is concluded that if a strong earthquake in the East Anatolian Fault region does not occur in 1-2 years, then it will occur only in 100 years.

Keywords: natural disasters, earthquakes, geodynamics, seismicity, geothermy, Caucasus, Turkey, modeling, seismic tomography, prediction.

For citation: Svalova V.B., Zaalishvili V.B. Deep geodynamics and seismicity of the Caucasus-Anatolian region. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 77-89. DOI: 10.46698/VNC.2024.97.46.006

Введение

Активизация природных катастроф в мире требует разработки новых подходов к исследованию геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит, характеризующихся землетрясениями, повышенной сейсмичностью, вулканизмом, оползневыми процессами, цунами и другими опасными природными процессами и катастрофами. Построение геодинамических моделей глубинного строения для регионов с опасными природными процессами и катастрофами вносит большой вклад в изучение глубинной геодинамики активных континентальных

окраин, необходимый для оценки геоэкологических рисков и подготовки действий населения на случай природных бедствий и катастроф.

Одной из основных фундаментальных и прикладных проблем современной науки является прогноз, предупреждение и снижение геоэкологического риска опасных природных и природно-техногенных процессов в литосфере и выявление их связей с глубинной геодинамикой.

На базе геодинамических моделей строится прогноз напряженно-деформированного состояния литосферы для регионов с опасными природными процессами, стихийными бедствиями и катастрофами и разрабатывается система комплексного геоэкологического мониторинга [Гончаров и др., 2015; Свалова, 2019].

Турецко-сирийское землетрясение 2023 г.

Землетрясение магнитудой 7,8 произошло на юго-востоке Турции и северо-западе Сирии 6 февраля 2023 года в 04:17 по местному времени. Эпицентр находился в 37 км к западу-северо-западу от Газиантепа. По данным Геологической службы США, гипоцентр землетрясения находился на глубине 10,0 км. За этим землетрясением последовало землетрясение магнитудой 7,7 в 13:24. Это землетрясение произошло в 95 км к северо-северо-востоку от первого.

Землетрясение магнитудой 7,8 является крупнейшим в Турции после землетрясения той же магнитуды в Эрзинджане 1939 года и вторым по силе землетрясением в стране после землетрясения 1668 года в Северной Анатолии. Были нанесены обширные повреждения на площади около 350 000 км². Пострадали 14 миллионов человек (16 процентов населения Турции). Около 1,5 млн человек остались без крова.

Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6 700 в Сирии. Это самое смертоносное стихийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения причинили ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США.

Место землетрясения связано с тройным сочленением Анатолийской, Аравийской и Африканской плит (рис. 1, 2).

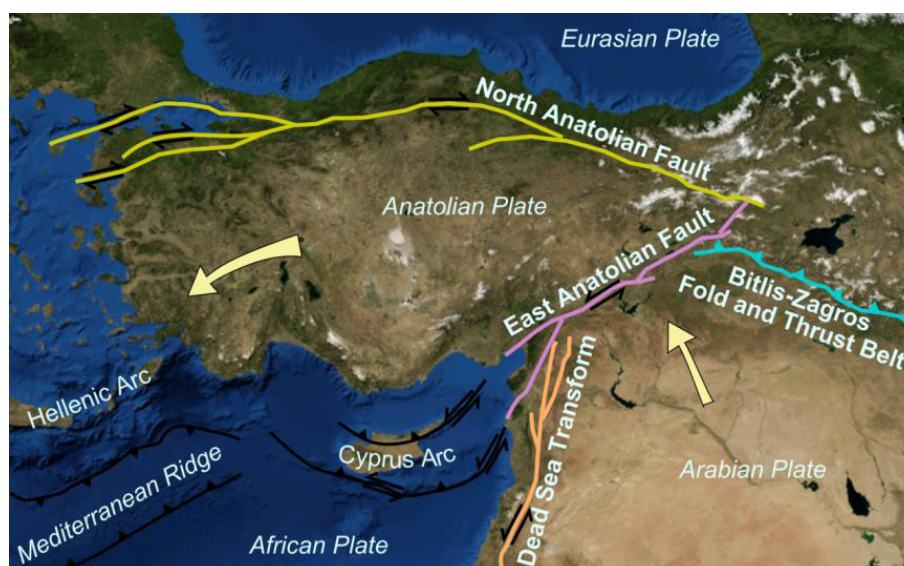


Рис. 1. Крупнейшие системы активных разломов Ближнего Востока: Северо-Анатолийская – Загросская и Леванто-Восточно-Анатолийская. (USGS) / Fig. 1. The largest systems of active faults in the Middle East: North Anatolian – Zagros and Levant – East Anatolian. (USGS)

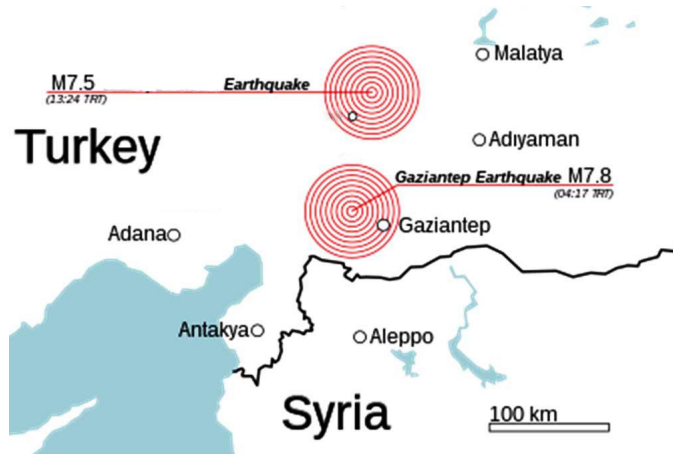


Рис. 2. Расположение эпицентров первого и второго землетрясений. (USGS) /
Fig. 2. Epicenter locations of the first and second major earthquakes. (USGS)

Восточно-Анатолийский разлом представляет собой левосторонний трансформный разлом протяженностью 700 км с северо-востока на юго-запад и образует границу между Анатолийской и Аравийской плитами. Этот внутриконтинентальный трансформный разлом является вторым по величине разломом в Турции.

Скорость подвижек уменьшается с востока на запад от 10 мм в год до 1–4 мм в год. К разлому приурочены сильные землетрясения в 1789 г. (M 7,2), 1795 г. (M 7,0), 1872 г. (M 7,2), 1874 г. (M 7,1), 1875 г. (M 6,7), 1893 г. (M 7,1) и 2020 г. (M 6,8) (рис. 3). С 1905 г. здесь произошло только пять землетрясений (1905, 1945, 1986, 1998) магнитудой 6,0 и более. Все эти землетрясения произошли вдоль Восточно-Анатолийского разлома или в его окрестностях.

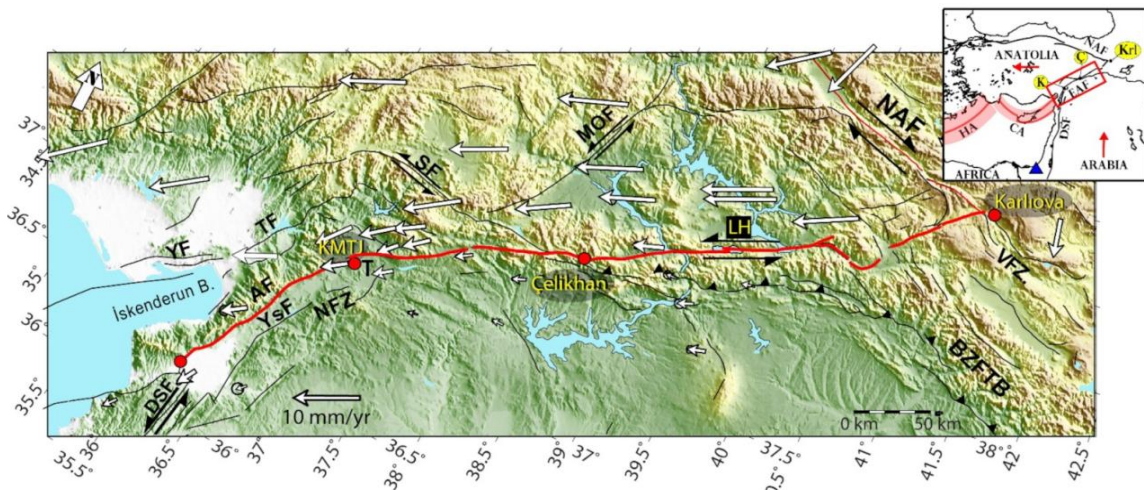


Рис. 3а. Тектоническая обстановка в районе Восточно-Анатолийского разлома (обозначена ярко-красной линией). Черные стрелки вдоль оси указывают на относительное движение стенок разлома. Белые стрелки указывают скорости движения в фиксированной системе отсчета, определенные с помощью GPS (длина стрелок указывает на величину скорости) [Güvercin et al., 2022] /

Fig. 3a. Tectonic setting in the region of the East Anatolian Fault (indicated by a bright red line). The black arrows along the axis indicate the relative motion of the fault walls. The white arrows indicate the speeds of movement in a fixed frame of reference, determined using GPS (the length of the arrows indicates the magnitude of the speed) [Güvercin et al., 2022]

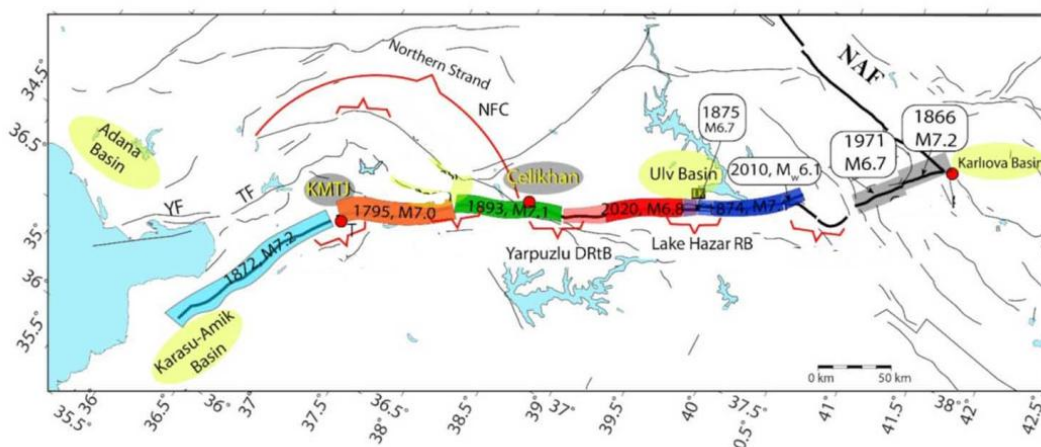


Рис. 3б. Участки Восточно-Анатолийского разлома с указанием дат и эпицентров крупнейших землетрясений до события 6 февраля 2023 г. NAF – Северо-Анатолийский разлом [Güvercin et al., 2022] /

Fig. 3b. Sites on the East Anatolian Fault, showing the dates and epicenters of the largest earthquakes before the event of February 6, 2023. NAF – North Anatolian Fault [Güvercin et al., 2022]

Северо-Анатолийский разлом, первый по величине сдвиговый разлом в Турции, вызвал 11 крупных землетрясений в 20 веке (рис. 4) [Güvercin et al., 2022].

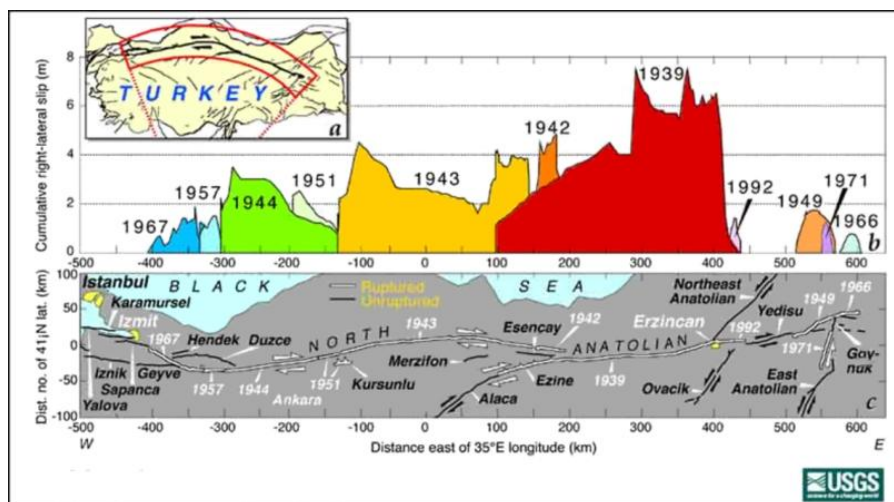


Рис. 4. Активные разломы в Турции, Северо-Анатолийский разлом выделен жирным шрифтом. GPS-наблюдения установили скорость смещения 24 ± 4 мм/год по Северо-Анатолийскому разлому. (b) Кумулятивный правосторонний сдвиг, связанный с землетрясениями с магнитудой $M \geq 6,7$; последовательность разломов изменяется от теплых к холодным цветам.

Проскальзывание вдоль толчков 1949, 1966 и 1971 годов является приблизительным.

(c) Область, отмеченная сплошной красной линией на (a), проецируется относительно Анатолии-Евразии [Ross et al., 1997] /

Fig.4. Active faults in Turkey with the North Anatolian fault in bold. GPS observations establish a 24 ± 4 mm/yr deep slip rate on the North Anatolian fault. (b) Cumulative right-lateral slip associated with $M \geq 6,7$ earthquakes; the sequence ruptured from warm to cool colors. Slip in the 1949, 1966, and 1971 shocks is approximate. (c) The region inscribed by the solid red line in (a) is projected relative to the Anatolia-Eurasia rotation pole, so that a transform fault would strike due east-west; the North Anatolian fault is seen to deviate less than 40 km from being a simple right-lateral transform [Ross et al., 1997]

Турция расположена в сейсмоопасной зоне [Duman et al., 2018], ее территорию пересекает активная Северо-Анатолийская зона разломов (САЗР), которая разделяет Евразийскую и Анатолийскую тектонические плиты, скользящие относительно друг друга со скоростью 2 см в год. Вдоль нее постоянно происходят землетрясения, и активность постепенно смещается все дальше и дальше на запад, в Мраморное море, в сторону Стамбула.

Сегмент этой зоны, примыкающий к городу, не активировался 250 лет (рис. 5), и это дает два следующих варианта развития событий.

В первом случае происходит постоянное и малоамплитудное скольжение плит относительно друг друга и снимается тектоническое напряжение в виде «тихого землетрясения». Во втором случае отсутствие подвижки означает накопление напряжения в зоне разлома, которое при достижении критического значения может быть снято резким толчком огромной силы. И это означает неминуемую катастрофу для Стамбула, города с населением 14 миллионов человек. Поэтому изучение и мониторинг состояния САЗР жизненно важны для Турции.

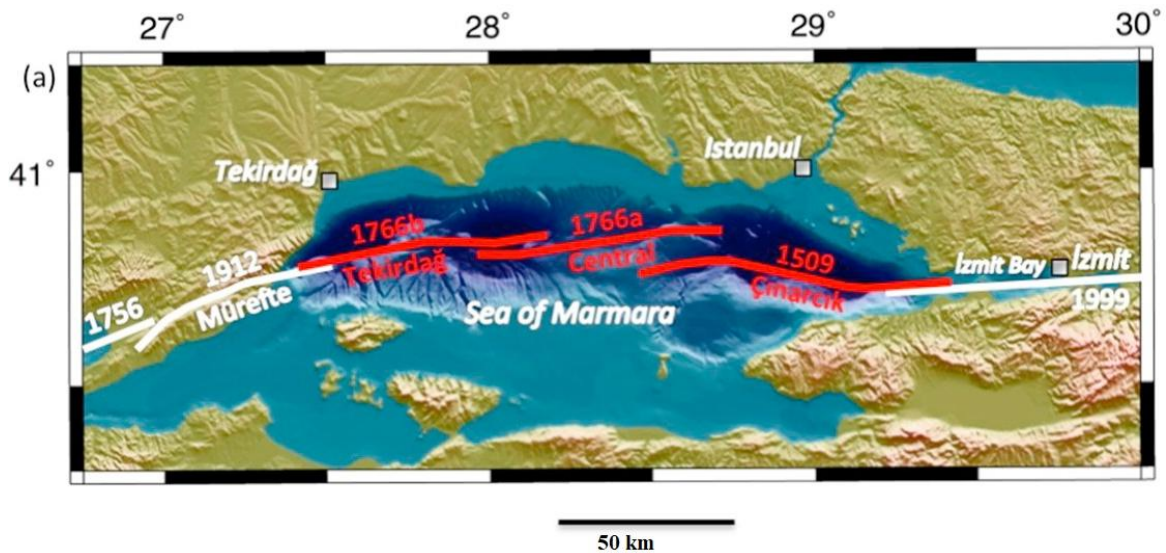
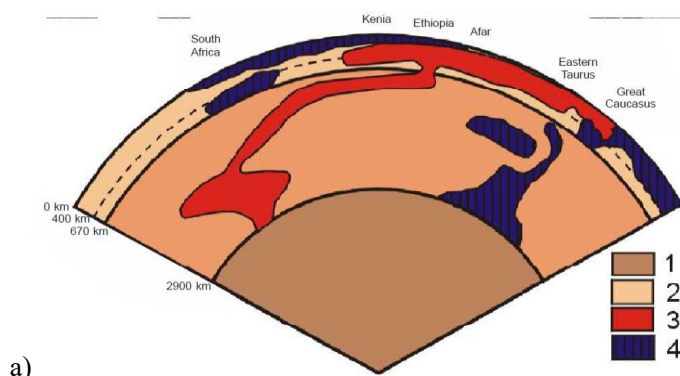


Рис. 5. Мраморное море. Красная линия – разлом, бездействующий с 1766 г. (USGS) /

Fig. 5. Sea of Marmara. Red line – fault, inactive since 1766. (USGS)

Методика исследований. Анализ геолого-геофизических данных и геодинамические модели опасных природных процессов

Геолого-геофизические и сейсмотомографические исследования позволяют связать сложную геодинамику и напряженно-деформированное состояние района с подъемом мантийного потока от границы ядра [Becker, Boschi, 2002; Ershov, Nikishin, 2004; Bijwaard et al., 1998; Grand et al., 1997; Zhao, 2001; Zhou, 1996; Koulikov et al., 2012; Mertoglu et al., 2016]. (Рис. 6а). Этот апвеллинг огромного мантийного потока подтверждается магматизмом и базальтовым вулканизмом [Ershov, Nikishin, 2004; Sharkov, Lebedev, 2021].



a)

Рис. 6а. Схематический сейсотомографический разрез мантии вдоль 120-градусного сегмента большой окружности, проходящей через точку с координатами 0° с.ш. и 35° в.д. по азимуту 10°, 1 – ядро Земли; 2 – мантия; 3 – горячие низкоскоростные зоны; 4 – холодные зоны высоких скоростей [Bijwaard et al., 1998; Zhou, 1996] /

Fig. 6a. Schematic seismotomographic section across the mantle along 120° segment of the great circle passing through the point with coordinates 0° N and 35° E at azimuth 10°, 1 – the Earth core; 2 – mantle; 3 – hot low-velocity zones; 4 – cold high-velocity zones [Bijwaard et al., 1998; Zhou, 1996]

Поверхностные скорости необходимо анализировать из разных источников [Милюков и др., 2015; Несмеянов, 2004; Рогожин и др., 2015; Уломов и др., 2007; Хаин и др., 2005; Stern, Johnson, 2010]. Для целей механико-математического моделирования вертикальные и горизонтальные скорости необходимо оценивать детально и в больших масштабах в зависимости от области моделирования.

Сейсотомографические данные подтверждают существование литосферного окна под восточной Анатolieй, через которое поднимается горячий материал астеносферы, и это помогает прояснить глубинное строение под восточной Анатolieй в районе Восточно-Анатолийского разлома [Medved et al., 2021].

Сейсотомографический разрез [Medved et al., 2021] был выполнен за год до сильных землетрясений в Восточно-Анатолийском разломе и, по всей видимости, демонстрирует очаг землетрясения. Было бы полезно проанализировать имеющиеся данные более детально.

Важно отметить, что на глубине 50 км зона Битлиса, маркирующая коллизия Евразийской и Аравийской плит, характеризуется выпуклостью расплавленного слоя к Кавказу, что говорит о направлении движения вещества.

Поле скоростей Северного Кавказа характеризуется горизонтальным смещением в северо-восточном направлении со скоростью 26–28 мм/год. Относительно неподвижной Евразии выявлено общее сжатие региона со скоростью 1–2 мм/год, что является источником современной геологической и сейсмической активности в приграничном районе Кавказа и Восточно-Европейской платформы.

Современные вертикальные движения Северо-Кавказского региона характеризуются небольшими вертикальными подъемами порядка 2,5 мм/год в низменной части Осетии, самыми высокими для региона скоростями подъема около 3,5–4,5 мм/год в горной части Северного Кавказа и умеренным устойчивым подъемом 2,9 мм/год в северной части северного склона Большого Кавказа [Милюков и др., 2015] (рис. 6б).

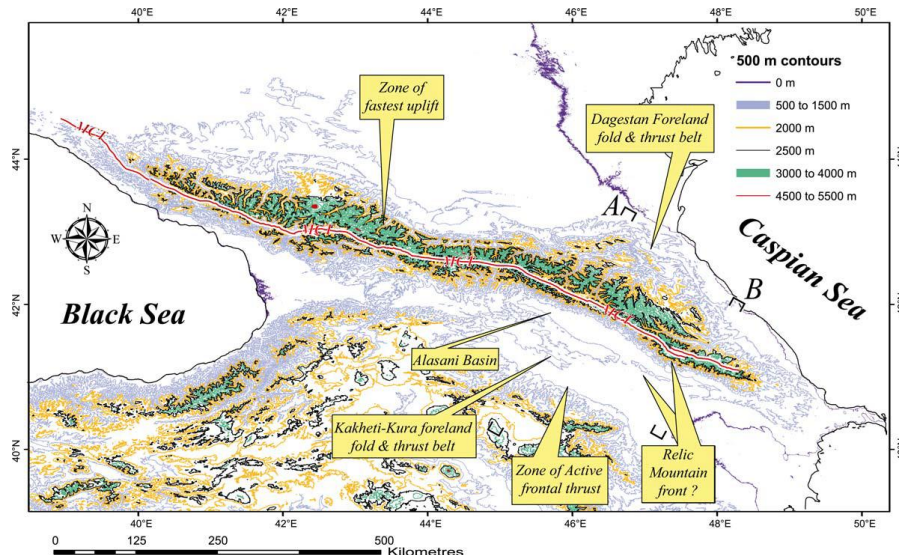


Рис. 6б. Кавказские разломы и топографическая карта. Зона наивысшего рельефа (зеленый цвет) и зона быстрого подъема [Sosson et al., 2010] /
 Fig. 6b. Caucasus faults and topography map. The zone of highest topography (green colour) and zone of fastest uplift [Sosson et al., 2010]

На основе геодинамического и сейсмического анализа Кавказского региона делается среднесрочный прогноз сильных землетрясений. Так в 2007 г. Уломов сделал прогноз сильного землетрясения интенсивностью 8–9 баллов на северо-востоке Кавказа с наиболее вероятным интервалом времени возникновения в 2013–2036 гг. [Уломов и др., 2007] (рис. 7).

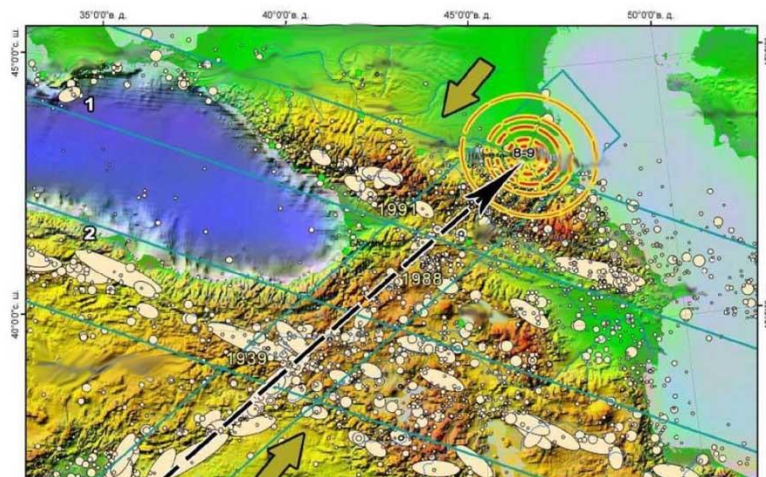


Рис. 7. Фрагмент карты Иран–Кавказ–Анатолийского региона. Направление миграции очагов землетрясений вдоль профиля Кипр–Кавказ указано пунктирной стрелкой. Крупные стрелки иллюстрируют направления взаимодействия Аравийской и Евразийской литосферных плит. Датой помечены относительно недавние очень крупные землетрясения в Турции (Эрзинжан, 1939), Армении (Спитак, 1988) и Грузии (Рачинское, 1991). Условные изосейсты на востоке Северного Кавказа иллюстрируют ожидавшийся сейсмический эффект интенсивностью 8–9 баллов [Уломов и др., 2007] /

Fig. 7. Fragment of the map of Iran-Caucasus-Anatolian region. Direction of migration of earthquake sources along the Cyprus–Caucasus profile indicated by the dotted arrow. Large arrows illustrate the directions of mutual actions of the Arabian and Eurasian lithospheric plates. The dates are marked relative to but recent very large earthquakes in Turkey (Erzincan, 1939), Armenia (Spitak, 1988) and Georgia (Racha-Java, 1991). Conditional isoseists in the east of the Northern Caucasus illustrate the expected seismic effect with an intensity of 8–9 points [Ulomov et al., 2007]

Результаты исследования

Геодинамическая модель Кавказско-Анатолийско-Аравийского региона определяется мантийным потоком, поднимающимся с поверхности ядра и распространяющимся под литосферой, создавая сложные поверхностные скорости в Анатолии на запад, в Аравийской плите на восток и на Кавказе на север. Этот поток будет продолжать перемещать вещество вдоль Северо-Анатолийского и Восточно-Анатолийского разломов.

По всей видимости, цепочки землетрясений трассируют распространение глубинных потоков астеносферы. Ключом к решению проблемы может стать карта активных и сейсмогенных разломов как маркеров областей максимальных напряжений и нарушения пределов прочности вещества в литосфере.

Существует разная частота сильных землетрясений вдоль разломов, что объясняется различной толщиной коры и различной реологией геологической среды разломов. Глубина границы Мохо Восточно-Анатолийского разлома около 40 км, а Северо-Анатолийского около 50 км [Güvercin et al., 2022]. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1–10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992, 1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км с направлением на запад (рис. 4) [Allen, 1969; Ross et al., 1997].

Землетрясение 1999 года в Измите было землетрясением магнитудой 7,6, произошедшим в провинции Коджаэли в Турции 17 августа 1999 года. В результате погибло от 17 127 до 18 373 человек, ущерб оценивается в 6,5 миллиардов долларов США. Оно было названо в связи с близостью землетрясения к городу Измит. Землетрясение произошло в 03:01 по местному времени на небольшой глубине 15 км. Землетрясение длилось 37 секунд и широко известно как одно из самых смертоносных стихийных бедствий в современной истории Турции.

Землетрясение 1999 года было частью сейсмической последовательности вдоль Северо-Анатолийского разлома, которая началась в 1939 году, вызвав сильные землетрясения, которые постепенно перемещались с востока на запад в течение 60 лет. Необходимо отметить, что именно указанное землетрясение способствовало установлению так называемого налога на землетрясение, направленного на оказание помощи пострадавшим от землетрясения.

В связи с тем, что Измитское землетрясение 1999 г. произошло в 80 км к востоку от Стамбула, ожидать землетрясения в районе Стамбула, учитывая рассмотренную выше последовательность событий, можно через несколько лет (1–10 лет). Таким образом, на основе способа аналогий с высокой вероятностью прогнозируется сильное землетрясение в районе Стамбула через несколько лет (1–10 лет). Отсюда, Стамбул можно считать «горячим пятном» сейсмического риска.

Регион наибольшей сейсмичности в Турции (красный цвет на рис. 8) можно рассматривать как «горячую зону» сейсмического риска, а крупные города как – «горячие пятна» сейсмического риска. Стамбул – «горячее пятно» сейсмического риска (рис. 8). В любом случае, на наш взгляд, необходимо проверить и укрепить здания и сооружения в городах из «горячей зоны» [Svalova, 2018; Svalova et al., 2019].

Анализ данных показывает, что Восточно-Анатолийский разлом производил сильные землетрясения 1789 (M 7.2), 1795 (M 7.0), 1872 (M 7.2), 1874 (M 7.1), 1875 (M 6.7), 1893 (M 7.1), 2020 (M 6.8), 2023 г. (M 7.8, M 7.7) с повторяемостью групп (1790 – 1880 – 2020) около 100 лет. При этом внутри групп, как правило, происхо-

дят 2–4 близких по времени сильных землетрясения. Отсюда, можно ожидать, что сильное землетрясение в пределах Восточно-Анатолийского нарушения или разлома, если не произойдет через 1–2 года, то с большой вероятностью произойдет только через 100 лет.

Необходимо отметить определенную закономерность в распределении землетрясений в региональных нарушениях (разломах), отражающую реологическое взаимодействие глубинных мантийных потоков и прочностных свойств пород в областях очагов землетрясений в литосфере. Причем эти закономерности по-разному проявляются на Северо-Анатолийском и Восточно-Анатолийском разломах, что объясняется различной толщиной коры в областях разломов и различными свойствами глубинных мантийных потоков (скорости и направления движения).

Таким образом, анализ результатов исследований позволяет дать объяснение механизма формирования цепочек и групп землетрясений вследствие глубинных мантийных потоков, имеющих большую силу и длительность.

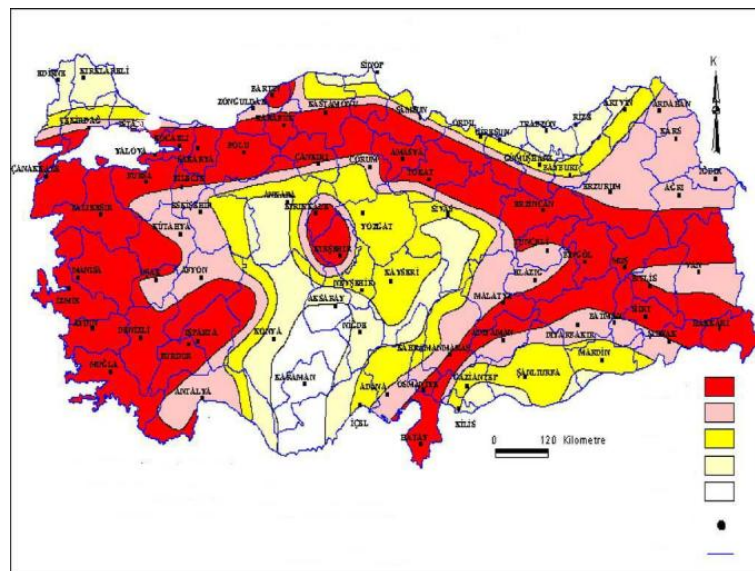


Рис. 8. Карта зон землетрясений Турции. Стамбул как «горячее пятно» риска землетрясений (белый круг на северо-западе страны). «Горячая зона» опасности землетрясений (красный цвет) в Турции. Основа: Карта зон землетрясений. Отдел исследования землетрясений.

Главное управление по делам стихийных бедствий, Турция (1997). Уровень сейсмической опасности: красный – очень высокий, розовый – высокий, желтый – средний, светло-желтый – низкий, белый – очень низкий /

Fig. 8. Map of earthquake zones in Turkey. Istanbul as an earthquake risk hotspot (white circle in the North-West). Earthquake hazard hot zone (red) in Turkey. Base: Map of earthquake zones. Department of Earthquake Research. General Directorate of Disaster Affairs, Turkey.

To the right of the legend is the degree of seismic hazards. Red is very high, pink is high, yellow is medium, light yellow is low, white is very low

Выводы

Геодинамическая модель региона с опасными природными процессами дает возможность делать предположительный среднесрочный прогноз о возможных сильных землетрясениях в регионе. Аналогия с предшествующими землетрясениями свидетельствует о развитии цепочки землетрясений вдоль Северо-Анатолийского разлома, которая характеризуется определенным местоположением и временем

активизации. На основе метода аналогий с высокой вероятностью прогнозируется сильное землетрясение в районе Стамбула через несколько лет (1–10 лет).

Сильное землетрясение в регионе Восточно-Анатолийского разлома в 2023 г. не ожидалось и не прогнозировалось и явилось полной неожиданностью. В то же время Восточно-Анатолийский разлом стабильно продуцировал сильные землетрясения в 1789...2023 годах. Можно рассматривать эти сильные землетрясения в виде групп в окрестностях около 1790 года, 1880 года, 2020 года. Повторяемость групп событий соответствует (1790 – 1880 – 2020) экспозиции около 100 лет. При этом внутри групп происходят 2–4 близких по времени сильных землетрясения. Отсюда можно прогнозировать, что сильное землетрясение на Восточно-Анатолийском разломе, если не произойдет в ближайшие несколько лет, то с большей вероятностью произойдет только через 100 лет.

Литература

1. Гончаров М.А., Короновский Н.В., Разницин Ю.Н. Свалова В.Б. Вклад мантийного диапиризма в процесс формирования новообразованных впадин Средиземноморья и Карибского бассейна и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Геотектоника. – 2015. – № 6. – С. 80–93.
2. Милуков В.К., Миронов А.П., Рогожин Е.А., Стеблов Г.М. Оценки скоростей современных движений Северного Кавказа по GPS наблюдениям. // Геотектоника. – 2015. – № 3. – С. 56–65.
3. Несмеянов С.А. Инженерная геотектоника. М.: Наука, – 2004. 780 с.
4. Рогожин Е.А., Горбатов А.В., Степанова М.Ю., Овсяченко А.Н., Андреева Н.В., Харазова Ю.В. Структура и современная геодинамика мегантиклинория Большого Кавказа в свете новых данных о глубинном строении. // Геотектоника. – 2015. – № 2. – С. 36–49.
5. Свалова В.Б. Геотермия и сейсмичность Кавказского региона и обратная задача геодинамики. // Геология и Геофизика Юга России. – 2019. – Т. 9. № 3. – С. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485.
6. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., Л.С. Шумилина Л.С. К оценке сейсмической опасности на Северном Кавказе. // Физика земли. – 2007. – № 7. – С. 31–45.
7. Хаин В.Е., Ломизе М.Г. Геотектоника с основами геодинамики. М.: КДУ, – 2005. 560 с.
8. Allen C.R. Active faulting in northern Turkey. California Institute of Technology, California. – 1969. pp. 32–34.
9. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. // Geochemistry. Geophysics. Geosystems. – 2002. – Vol. 3. Issue 1. – pp. 1–48. DOI: 10.1029/2001GC000168.
10. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region. // Geotectonics. – 2004. – No. 2. – pp. 55–72.
11. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography. // Journal of Geophysical Research. – 1998. – Vol. 103. – pp. 30055–30078.
12. Duman T.Y. et al. Seismotectonic database of Turkey. // Bulletin of earthquake engineering. – 2018. – Vol. 16. No. 8. – pp. 3277–3316. DOI: 10.1007/s10518-016-9965-9.
13. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. // GSA Today. – 2019. – Vol. 7. No. 4. – pp. 1–7.
14. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.Ö., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. // Geophysical Journal International. – 2022. – Vol. 230. No. 1. – pp. 50–69.

15. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. // *Solid Earth*. – 2012. – No. 3. – pp. 327–337.
16. Medved I., Koulakov I., Polat G. Crustal structure of the eastern Anatolia region (Turkey) based on seismic tomography. // *Geosciences (Switzerland)*. – 2021. – Vol. 11. No. 2. – pp. 1–12.
17. Mertoglu O., Sakir S., Nilgun B. Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey. // *European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016*. – 10 p.
18. Sosson M., Rolland Y., Müller C., Danelian T., Melkonyan R., Kekelia S., Adamia Sh., Babazadeh V., Kangarli T., Avagyan A., Galoyan Gh., Mosar J. Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia, Azerbaijan, Georgia), new insights. // *Geological Society, London, Special Publications*. – 2010. – Vol. 340. No. 1. – pp. 329–352.
19. Sharkov E., Lebedev V. Caucasian-Arabian Segment of Alpine-Himalayan Convergence: an Example of Continental Collision above Mantle Plume. // *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. V. Svalova (ed.) Springer book: 89082526. – 2021. – pp. 381–390.
20. Ross S. Stein, Aykut A. Barka, James H. Dieterich. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. // *Geophysical Journal International*. – 1997. – Vol. 128. Issue 3. – pp. 594–604. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x.
21. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. // *Earth-Science Reviews*. – 2010. – Vol. 101. – pp. 29–67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002.
22. Svalova V. (editor). Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech. – 2018. 334 p. DOI: 10.5772/intechopen.71298.
23. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. // *Geology and Geophysics of Russian South*. – 2019. – Vol. 9. No. 2. – pp. 109–127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981.
24. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. // *Earth and Planetary Science Letters*. – 2001. – Vol. 192. Issue 3. – pp. 423–436.
25. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle. // *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. – 1996. – Vol. 101. Issue 12. – pp. 27791–27810. DOI: 10.1029/96JB02487.

References

1. Goncharov M.A., Koronovsky N.V., Raznitsin Yu.N., Svalova V.B. The contribution of mantle diapirism to the process of formation of the newly formed basins of the Mediterranean and the Caribbean and the surrounding centrifugal-vergent folded-cover orogens. *Geotectonics*. 2015. No. 6. pp. 80–93. (In Russ.)
2. Milyukov V.K., Mironov A.P., Rogozhin E.A., Steblov G.M. Estimates of the velocities of modern movements of the North Caucasus from GPS observations. *Geotectonics*. 2015. No. 3. pp. 56–65. (In Russ.)
3. Nesmeyanov S.A. *Engineering geotectonics*. Moscow. Nauka. 2004. 780 p. (In Russ.)
4. Rogozhin E.A., Gorbaticov A.V., Stepanova M.Yu., Ovsyuchenko A.N., Andreeva N.V., Kharazova Yu.V. Structure and modern geodynamics of the meganticlinorium of the Greater Caucasus in the light of new data on the deep structure. *Geotectonics*. 2015. No. 2. pp. 36–49. (In Russ.)
5. Svalova V.B. Geothermy and seismicity of the Caucasus region and the inverse problem of geodynamics. *Geology and Geophysics of the South of Russia*. 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77–93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485. (In Russ.)
6. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. Towards the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Physics of the Earth*. 2007. No. 7. pp. 31–45. (In Russ.)

7. Khain V.E., Lomize M.G. *Geotectonics with the basics of geodynamics*. Moscow. KDU. 2005. 560 p. (In Russ.)
8. Allen C.R. *Active faulting in northern Turkey*. California Institute of Technology, California. 1969. pp. 32–34.
9. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2002. Vol. 3. Issue 1. pp. 1–48. DOI: 10.1029/2001GC000168.
10. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region. *Geotectonics*. 2004. No. 2. pp. 55–72.
11. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography. *Journal of Geophysical Research*. 1998. Vol. 103. pp. 30055–30078.
12. Duman T.Y. et al. Seismotectonic database of Turkey. *Bulletin of earthquake engineering*. 2018. Vol. 16. No. 8. pp. 3277–3316. DOI: 10.1007/s10518-016-9965-9.
13. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth. *GSA Today*. 2019. Vol. 7. No. 4. pp. 1–7.
14. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.Ö., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault. *Geophysical Journal International*. 2022. Vol. 230. No. 1. pp. 50–69.
15. Koulakov I., Zabelina I., Amanatashvili I., Meskhia V. Nature of orogenesis and volcanism in the Caucasus region based on results of regional tomography. *Solid Earth*. 2012. No. 3. pp. 327–337.
16. Medved I., Koulakov I., Polat G. Crustal structure of the eastern Anatolia region (Turkey) based on seismic tomography. *Geosciences (Switzerland)*. 2021. Vol. 11. No. 2. pp. 1–12.
17. Mertoglu O., Sakir S., Nilgun B. *Geothermal Energy Use, Country Update for Turkey*. European Geothermal Congress 2016 Strasbourg, France, 19–24 Sept 2016. 10 p.
18. Sosson M., Rolland Y., Müller C., Danelian T., Melkonyan R., Kekelia S., Adamia Sh., Babazadeh V., Kangarli T., Avagyan A., Galoyan Gh., Mosar J. Subductions, obduction and collision in the Lesser Caucasus (Armenia, Azerbaijan, Georgia), new insights. *Geological Society, London, Special Publications*. 2010. Vol. 340. No. 1. pp. 329–352.
19. Sharkov E., Lebedev V. *Caucasian-Arabian Segment of Alpine-Himalayan Convergence: an Example of Continental Collision above Mantle Plume. Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere*. V. Svalova (ed.) Springer book: 89082526. 2021. pp. 381–390.
20. Ross S. Stein, Aykut A. Barka, James H. Dieterich. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering. *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 128. Issue 3. pp. 594–604. DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x.
21. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis. *Earth-Science Reviews*. 2010. Vol. 101. pp. 29–67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002.
22. Svalova V. (editor). *Earthquakes – Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction*. InTech. 2018. 334 p. DOI: 10.5772/intechopen.71298.
23. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2019. Vol. 9. No. 2. pp. 109–127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981.
24. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes. *Earth and Planetary Science Letters*. 2001. Vol. 192. Issue 3. pp. 423–436.
25. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*. 1996. Vol. 101. Issue 12. pp. 27791–27810. DOI: 10.1029/96JB02487.