



ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ И СИРИИ 2023 ГОДА И ГЕОДИНАМИКА КАВКАЗСКО-АНАТОЛИЙСКОГО РЕГИОНА

В.Б. СВАЛОВА

*ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук»
13, Уланский переулок, стр. 2, г. Москва 101000, Россия*

*Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук
93а, ул. Маркова, г. Владикавказ 362002, Россия*

АННОТАЦИЯ

Введение. Активизация природных катаклизмов в мире требует разработки новых подходов к изучению геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит, характеризующихся землетрясениями, повышенной сейсмичностью, вулканизмом, повышенным тепловым потоком, геотермическими проявлениями, оползневыми процессами, цунами и другими опасными природными процессами и явлениями. Кавказско-Анатолийско-Аравийский регион представляет собой сложную высоконапряженную геодинамическую структуру, характеризующуюся повышенным тепловым потоком, высокой сейсмичностью, магматизмом и вулканизмом. Геодинамика Кавказско-Анатолийско-Аравийского 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. Землетрясение магнитудой 7,8 является крупнейшим в Турции после землетрясения в Эрзинджане 1939 года и вторым по силе в стране после землетрясения в Северной Анатолии 1668 года. Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6700 в Сирии. Это самое смертоносное стихийное бедствие в современной истории Турции. Землетрясения нанесли ущерб на сумму более 100 миллиардов долларов США.

Цель. Основная цель работы — построение геодинамических моделей глубинного строения районов стихийных бедствий, что является важным вкладом в изучение активных континентальных окраин и необходимо для предсказания и прогнозирования землетрясений, оценки геоэкологических рисков и подготовки действий населения в случае стихийных бедствий и катастроф.

Материалы и методы. Решение задач формирования и эволюции геологических структур в различных сложных геодинамических обстановках, а также прогноза и предсказания природных опасностей требует анализа всех имеющихся геолого-геофизических данных, а также постановки и решения задач механического и математического моделирования.

Результаты. Построены геодинамические модели районов опасных природных процессов с целью прогнозирования и предотвращения стихийных бедствий и катастроф. Предложен алгоритм создания систем мониторинга.

Заключение. Землетрясение под Стамбулом можно ждать через несколько лет (1—10 лет). Можно прогнозировать, что если сильное землетрясение в Восточно-Анатолийском разломе не произойдет через 1—2 года, то случится только через 100 лет.

Ключевые слова: геотермия, сейсмичность, геодинамика, Кавказ, Турция, моделирование, сейсмотомография

Конфликт интересов: автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Финансирование: статья подготовлена в рамках выполнения госзадания № 122022400105-9 по теме «Прогноз, моделирование и мониторинг эндогенных и экзогенных геологических процессов для снижения уровня их негативных последствий».

Для цитирования: Свалова В.Б. Землетрясения в Турции и Сирии 2023 года и геодинамика Кавказско-Анатолийского региона. *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2023;65(3):28—41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>

Статья поступила в редакцию 06.05.2023

Принята к публикации 29.06.2023

Опубликована 30.06.2023

EARTHQUAKES IN TURKEY AND SYRIA IN 2023 AND GEODYNAMICS OF THE CAUCASUS–ANATOLIAN REGION

VALENTINA B. SVALOVA

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences
13, bld. 2 Ulansky lane, Moscow 101000, Russia*

*Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences
93a, Markova str., Vladikavkaz 362002, Russia*

ABSTRACT

Background. The intensification of natural disasters all over the world requires the development of new approaches to the study of geological processes. This particularly concerns the areas at the boundaries of lithospheric plates, which are characterized by earthquakes, increased seismicity, volcanism, intensive heat flows, geothermal manifestations, landslide processes, tsunamis, and other dangerous natural processes and hazards. The Caucasus-Anatolian-Arabian region is a complex highly-stressed geodynamic structure, characterized by an increased heat flow, seismicity, magmatism, and volcanism. The geodynamics of this region is determined by the collision of the Eurasian and Arabian lithosphere plates, as well as by the evolution of the Alpine-Himalayan belt and surrounding areas.

A 7.8 magnitude earthquake hit the South-East Turkey and North-West Syria on February 6, 2023. This was the largest earthquake in Turkey since the 1939 Erzincan earthquake, and the second-strongest since the 1668 North Anatolia earthquake. More than 52,800 deaths were confirmed, with about 46,100 in Turkey and 6,700 in Syria. It is the deadliest natural disaster in Turkey's modern history with the estimated damage of over \$100 billion.

Aim. To construct geodynamic models for the deep structure of natural hazard regions, which can contribute to the study of active continental margins. This information is necessary for earthquake forecasting and prognosis, as well as for assessing geocological risks and preparing the population in the event of natural disasters and catastrophes.

Materials and methods. The formation and evolution processes of geological structures in complex geodynamic settings, as well as the forecasting and prognosis of natural hazards, required an analysis of all available geological and geophysical data. The methods of mechanical and mathematical modeling were used to formulate and solve the research problems.

Results. Geodynamic models of the regions of hazardous natural processes were constructed with the purpose of forecasting and preventing natural disasters and catastrophes. An algorithm for creating monitoring systems was proposed.

Conclusion. In several years (1–10 years), another earthquake near Istanbul can be expected. In the case that no large earthquake occurs in the East Anatolian fault in 1–2 years, this event is likely to occur in 100 years only.

Keywords: geothermy, seismicity, geodynamics, Caucasus, Turkey, modeling, seismotomography

Conflict of interest: the author declares no conflict of interest.

Financial disclosure. The article was prepared in response to a government assignment No. 122022400105-9 on the topic “Forecast, modeling and monitoring of endogenous and exogenous geological processes to reduce their negative consequences”.

For citation: Svalova V.B. Earthquakes in Turkey and Syria in 2023 and geodynamics of the Caucasus-Anatolian region. *Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*. 2023;65(3):28—41. <https://doi.org/10.32454/0016-7762-2023-65-3-28-41>

Manuscript received 06 May 2023

Accepted 29 June 2023

Published 30 June 2023

Активизация природных катастроф в мире требует разработки новых подходов к исследованию геологических процессов, в частности, на границах литосферных плит, характеризующихся землетрясениями, повышенной сейсмичностью, вулканизмом, оползновыми процессами, цунами и другими опасными природными процессами и катастрофами. Построение геодинамических моделей глубинного строения регионов опасных природных процессов и катастроф является важным вкладом в изучение глубинной геодинамики активных континентальных окраин, необходимым для оценки геоэкологических рисков и подготовки действий населения на случай природных бедствий и катастроф.

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, эпицентр землетрясения находился

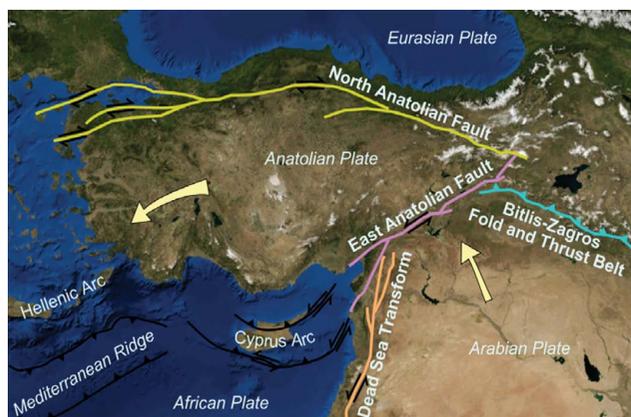


Рис. 1. Крупнейшие системы активных разломов Ближнего Востока: Северо-Анатолийская — Загросская и Леванто-Восточно-Анатолийская. https://ru.wikipedia.org/wiki/Восточно-Анатолийский_разлом#/media/Файл:Anatolian_Plate.png

Fig. 1. The largest systems of active faults in the Middle East: North Anatolian — Zagros and Levant — East Anatolian. https://ru.wikipedia.org/wiki/Восточно-Анатолийский_разлом#/media/Файл:Anatolian_Plate.png

на глубине 10,0 км. За 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 в стране после землетрясения 1668 года в Северной Анатолии. Были нанесены обширные повреждения на площади около 350 000 кв. км. Пострадали 14 миллионов человек (16% населения Турции). Около 1,5 миллиона человек остались без крова.

Подтверждено более 52 800 смертей: более 46 100 в Турции и более 6700 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).

Восточно-Анатолийский разлом представляет собой левосторонний трансформный разлом протяженностью 700 км с северо-востока

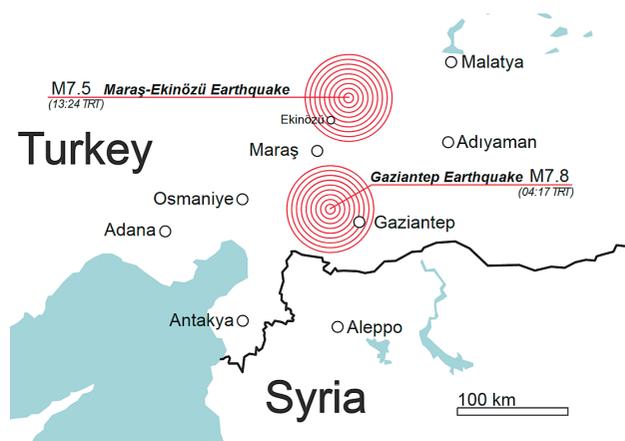


Рис. 2. Расположение эпицентров первого и второго землетрясений. https://en.wikipedia.org/wiki/File:2023_Gaziantep-Marash_Earthquakes.svg

Fig. 2. Epicenter locations of the first and second major earthquakes. https://en.wikipedia.org/wiki/File:2023_Gaziantep-Marash_Earthquakes.svg

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 до 1—4 мм в год. К разлому приурочены сильные землетрясения в 1789 г. (M 7,2), 1795 (M 7,0), 1872 (M 7,2), 1874 (M 7,1), 1875 (M 6,7), 1893 (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 они произошли вдоль Восточно-Анатолийского разлома или в его окрестностях.

Северо-Анатолийский разлом, первый по величине сдвиговой разлом в Турции, вызвал 11 крупных землетрясений в XX веке (рис. 4).

Турция расположена в сейсмоопасной зоне [13] (рис. 5), 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, и это дает два 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.

Геодинамические модели регионов опасных природных процессов

Геолого-геофизические и сейсмотомаграфические исследования позволяют связать сложную геодинамику и напряженно-деформированное состояние района с подъемом мантийного потока от границы ядра [10, 12, 15, 26, 27] (рис. 6). Этот апвеллинг огромного мантийного потока подтверждается магматизмом и базальтовым вулканизмом (рис. 7, 8).

Поверхностные скорости необходимо анализировать из разных источников [2, 3, 6, 7, 22]. Для целей механико-математического моделирования вертикальные и горизонтальные скорости необходимо оценивать детально и в больших масштабах в зависимости от области моделирования (рис. 9).

Сейсмотомаграфические данные подтверждают существование литосферного окна под восточной Анатолией, через которое поднимается горячий материал астеносферы, и это помогает прояснить глубинное строение под восточной Анатолией в районе Восточно-Анатолийского разлома [18] (рис. 10).

Механико-математическая модель глубинной геодинамики

Рассмотрим слой высоковязкой несжимаемой жидкости, описывающей поведение вещества

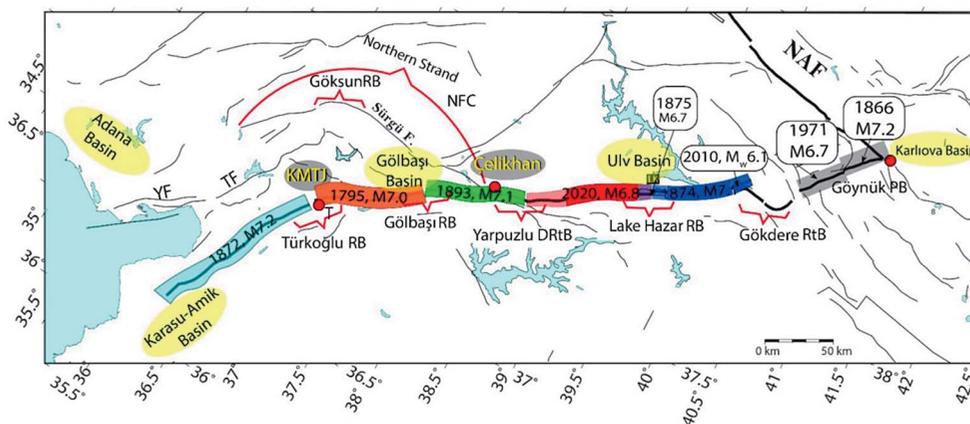


Рис. 3. Участки Восточно-Анатолийского разлома с указанием дат и эпицентров крупнейших землетрясений до события 6 февраля 2023 г. NAF — Северо-Анатолийский разлом [16]

Fig. 3. 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 [16]

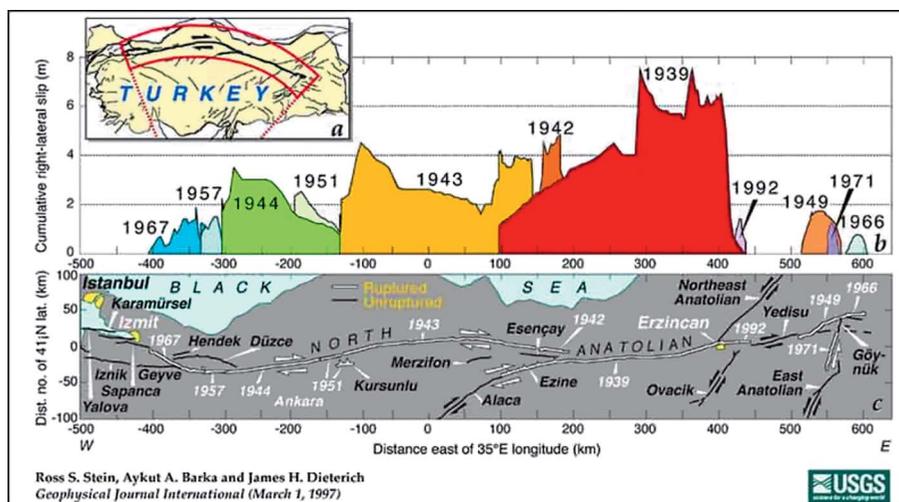


Рис. 4. Северо-Анатолийский разлом: а — активные разломы в Турции, Северо-Анатолийский разлом выделен жирным шрифтом. GPS-наблюдения установили скорость смещения 24 ± 4 мм/год по Северо-Анатолийскому разлому; б — кумулятивный правосторонний сдвиг, связанный с землетрясениями с магнитудой $M \geq 6,7$; последовательность разломов изменяется от теплых к холодным цветам. Проскальзывание вдоль толчков 1949, 1966 и 1971 годов является приблизительным; с — область, отмеченная сплошной красной линией на «а», проецируется относительно Анатолии-Евразии [21]

Fig. 4. North Anatolian fault: a — 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 [21]

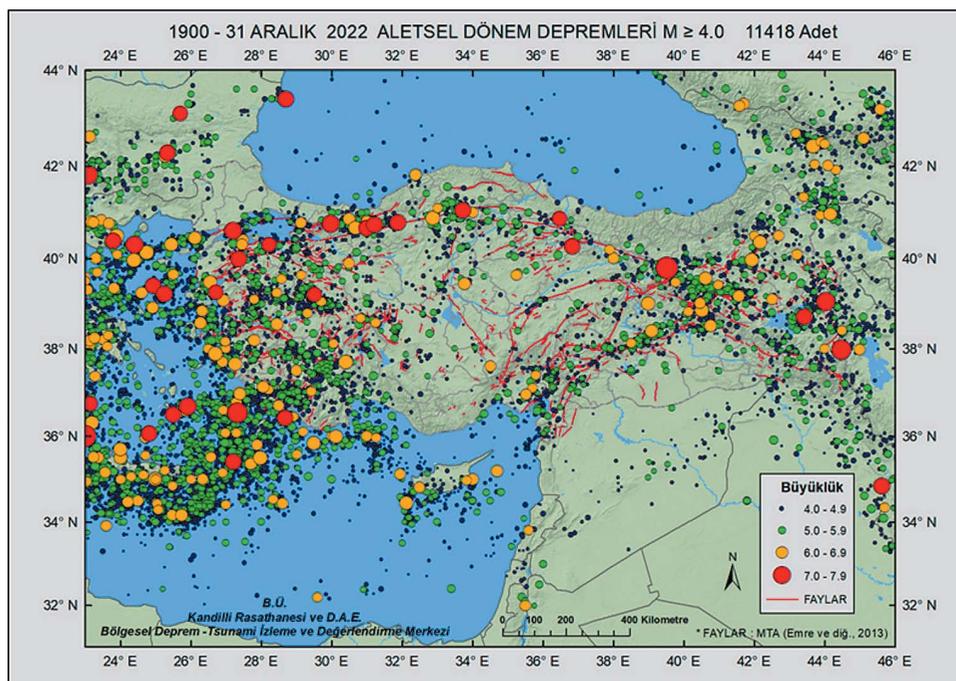


Рис. 5. Карта сейсмичности Турции и близлежащих регионов за период с 1900 по 2022 год (региональный центр мониторинга землетрясений и цунами, Университет Богазици)

Fig. 5. Seismicity map of Turkey and nearby regions for the period from 1900 to 2022 (regional Earthquake-Tsunami Monitoring Center, Boğaziçi University)

литосферы с помощью уравнения Навье — Стокса и уравнения неразрывности:

$$dv/dt = F - (1/\rho)\text{grad } p + (\mu/\rho)\Delta v, \quad (1)$$

$$\text{div } \mathbf{v} = 0, \quad (2)$$

где \mathbf{v} — вектор скорости, F — сила тяжести, p — давление, ρ — плотность, μ — вязкость, t — время.

Пусть характерный размер моделируемых структур по латерали L значительно превосходит характерную толщину слоя h .

Введем безразмерные значения координат, скоростей и давления X, Y, Z, U, V, W, P :

$$\begin{aligned} x = LX, y = LY, z = hZ, u = u_0U, \\ v = u_0V, w = u_0(h/L)W, p = \rho_0ghP. \end{aligned} \quad (3)$$

Тогда, используя уравнение неразрывности и приближенное уравнение Навье – Стокса, для достаточно медленных движений в тонком слое можно получить в безразмерном виде для двумерного случая [1, 5, 8, 20]:

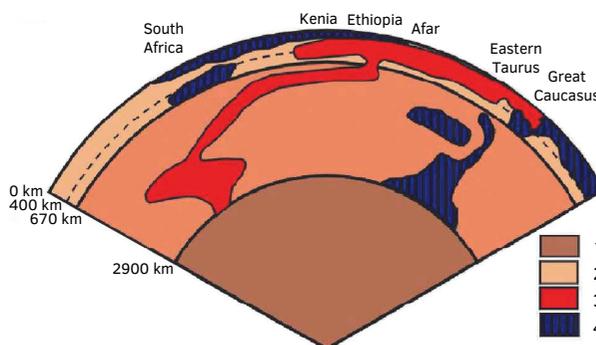


Рис. 6. Схематический сейсмотомографический разрез мантии вдоль 120-градусного сегмента большой окружности, проходящей через точку с координатами 0° с.ш. и 35° в.д. по азимуту 10°: 1 — ядро Земли; 2 — мантия; 3 — горячие низкоскоростные зоны; 4 — холодные зоны высоких скоростей [12, 27]
Fig. 6. Schematic 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 [12, 27]

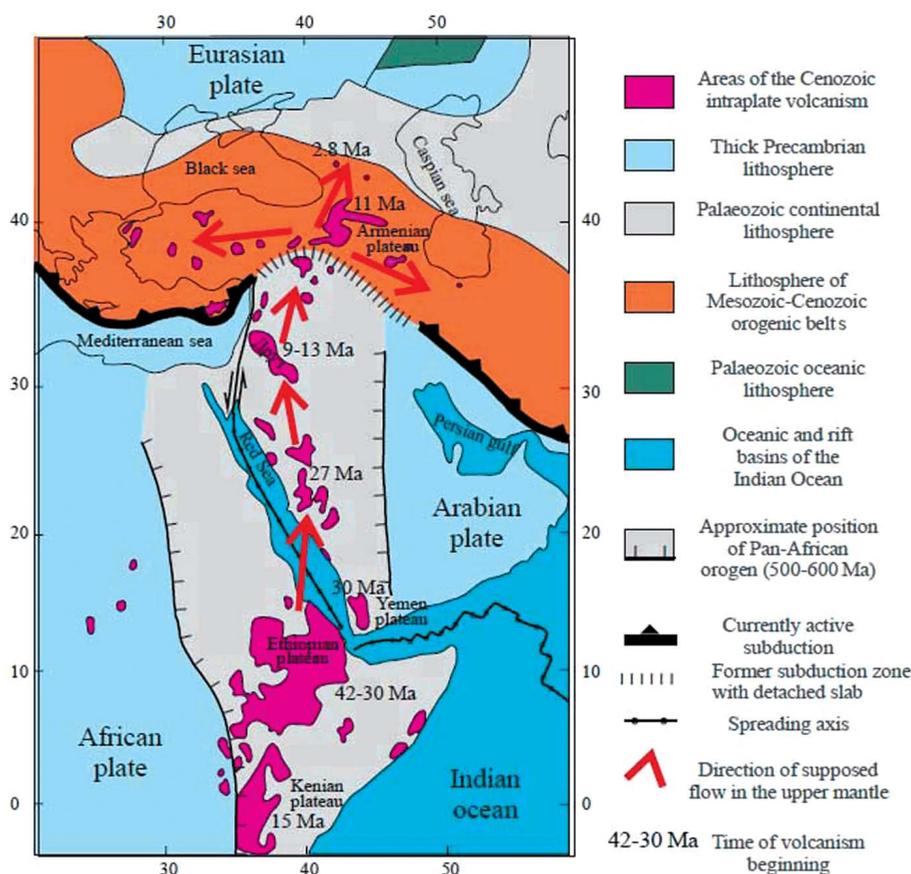


Рис. 7. Распространение базальтового вулканизма кайнозойских внутрилитных плато и его возраст, млн лет [11]
Fig. 7. Tectonic units and distribution of Cenozoic intraplate plateau basalt volcanism and its ages. Numbers near volcanic plateaus designate their age, Ma [11]

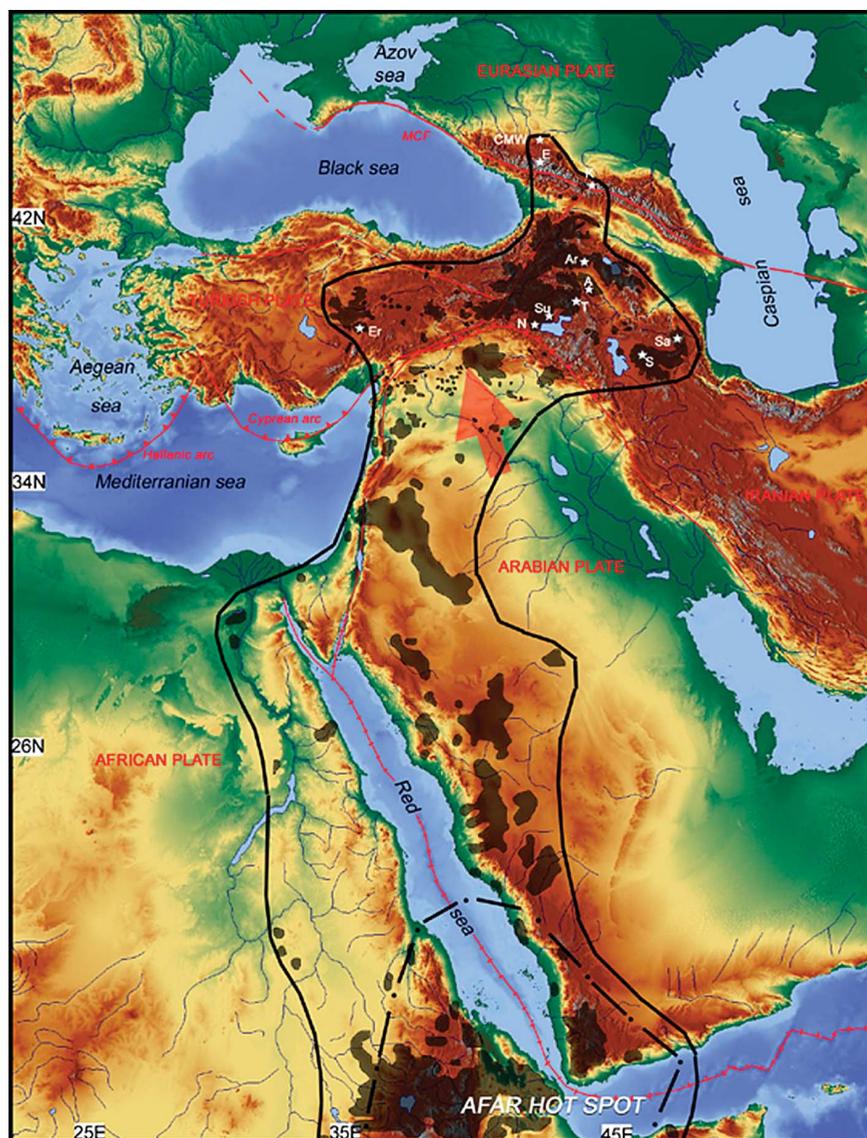


Рис. 8. Распространение современного плюмового вулканизма в Афро-Аравийской литосферной плите. Черная линия — контур проекции мантийного плюма на поверхность. Поля, окрашенные черным цветом, — области молодой вулканической активности. Крупнейшие четвертичные вулканы: А — Арарат, Ar — Арагац, CMW (КМВ) — Кавказские Минеральные Воды, E — Эльбрус, Er — Эрциес, K — Казбек, N — Немрут, S — Савалан, Sa — Саханд, Su — Сунхан, T — Тендюрек [19]

Fig. 8. Distribution of the modern plume-related volcanism in the Afro-Arabian LIP (lithosphere plate) up to the Greater Caucasus. Black line — contour of projection of proposed mantle plume head to the surface. The fields painted by black represent the areas of young volcanic activity. The largest Quaternary volcanoes: A — Ararat, Ar — Aragats, CMW — Caucasian Mineral Waters, E — Elbrus, Er — Ercies, K — Kazbek, N — Nemrut, S — Savalan, Sa — Sahand, Su — Suphan, T — Tendürek. [19]

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial X} = \alpha \mu \frac{\partial^2 U}{\partial Z^2}, \\ \frac{\partial P}{\partial Z} = -\rho \end{cases}, \quad (4)$$

$$\alpha = \frac{F}{R \left(\frac{h}{L}\right)^3}, \quad F = \frac{u_0^2}{gL}, \quad R = \frac{u_0 L \rho_0}{\mu_0}, \quad (6)$$

где P — безразмерное давление, U, W — безразмерные скорости, F — число Фруда, R — число Рейнольдса, ρ — плотность, μ — вязкость, ρ_0, μ_0, u_0 — характерный масштаб плотности, вязкости и скорости.

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial W}{\partial Z} = 0, \quad (5)$$

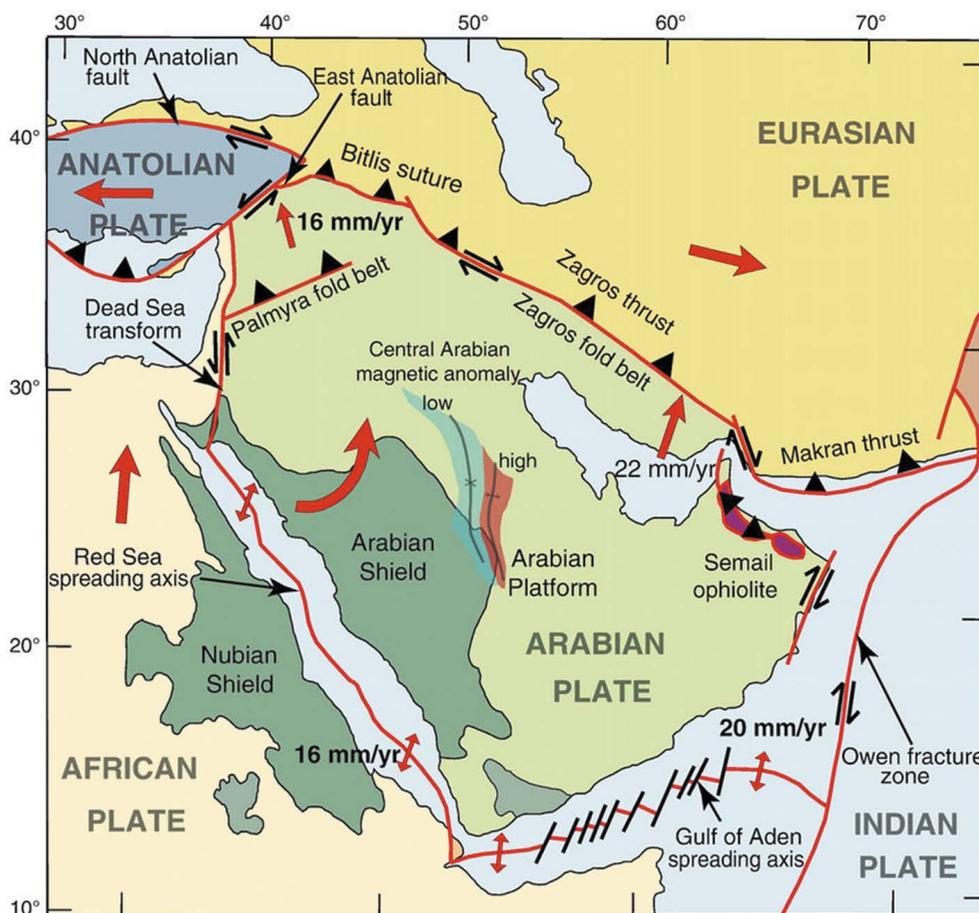


Рис. 9. Упрощенная карта Аравийской плиты с границами плит, приблизительными векторами конвергенции плит и основными геологическими особенностями. Обращает на себя внимание расположение Центрально-Аравийской магнитной аномалии (ЦАМА) [22]

Fig. 9. Simplified map of the Arabian Plate, with plate boundaries, approximate plate convergence vectors, and principal geologic features. Note location of Central Arabian Magnetic Anomaly (CAMA) [22]

Пусть на верхней границе поле сил равно нулю (свободная поверхность). Также пусть задано поле скоростей U^* , W^* на верхней границе моделирования ζ^* . Тогда можно найти распределение скоростей и давлений в слое:

$$P = \rho(\zeta^* - Z), \quad (7)$$

$$U = U^* + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} (\zeta^* - Z)^2, \quad (8)$$

$$W = W^* + \frac{\partial U^*}{\partial X} (\zeta^* - Z) + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \left[\frac{\partial^2 \zeta^*}{\partial X^2} \frac{1}{3} (\zeta^* - Z)^3 + \left(\frac{\partial \zeta^*}{\partial X} \right)^2 (\zeta^* - Z)^2 \right]. \quad (9)$$

Таким образом, по известным скоростям на поверхности определены скорости и давления

на глубине, что дает возможность получить поля напряжений в слое.

На верхней границе должно также выполняться кинематическое условие свободной поверхности, означающее, что точки поверхности не покидают ее в процессе движения:

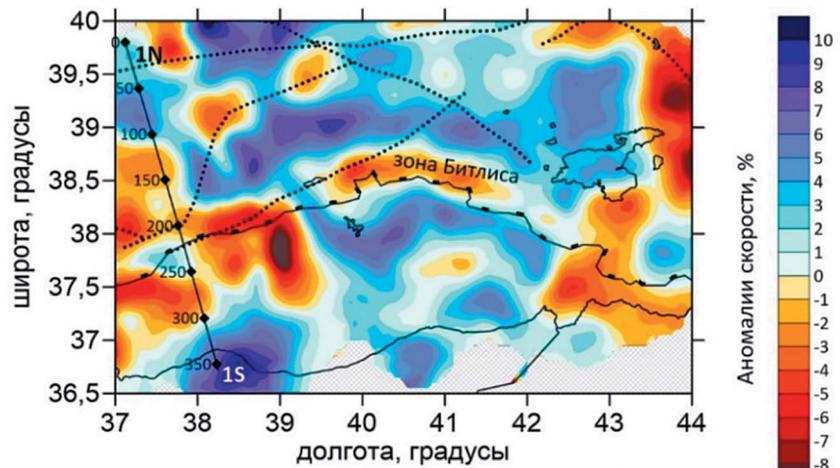
$$S \frac{\partial \zeta^*}{\partial t} + U^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} - W^* = 0, \quad (10)$$

$$S = \frac{L}{u_0 t_0}, \quad (11)$$

где S — число Струхаля, t_0 — характерный масштаб времени.

Аналогично можно рассмотреть нижнюю границу моделирования как поверхность, точки которой остаются на ней в процессе эволюции (условие непротекания). Тогда, подставляя

а



б

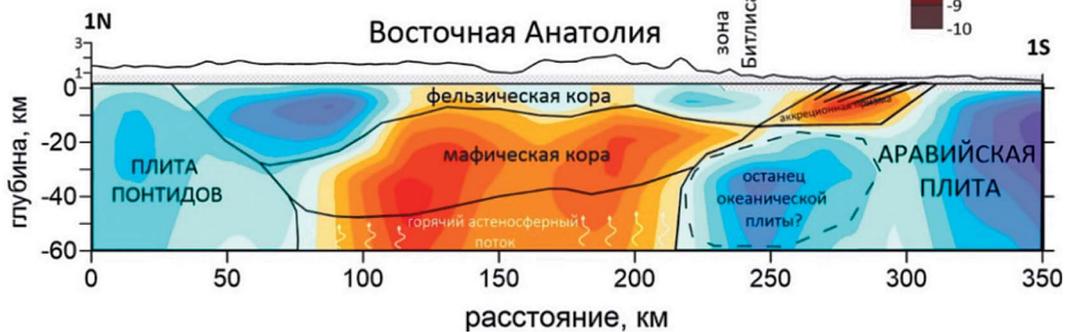


Рис. 10. Сейсмотомография Восточной Анатолии и зоны Битлиса. а — горизонтальный разрез аномалий P-скорости на глубине 50 км. Широта, градусы (слева); долгота, градусы (внизу); зона Битлиса (в центре); аномалии скорости (справа); б — схема строения земной коры по профилю 1N-1S под Восточной Анатолией [18]
Fig. 10. Seismotomography of Eastern Anatolia and Bitlis zone. а — horizontal section of P-velocity anomalies at a depth of 50 km. Latitude, degrees (left); longitude, degrees (below); Bitlis zone (center); speed anomalies (right); б — scheme of the Crustal Structure along profile 1N -1S under Eastern Anatolia [18]

скорости, получаем уравнение движения нижней границы ζ_* :

$$S \frac{\partial \zeta_*}{\partial t} - W^* + U^* \frac{\partial \zeta_*}{\partial X} (\zeta_* - \zeta_*) + \frac{\rho}{2\alpha\mu} \left[\frac{\partial \zeta_*}{\partial X} \frac{\partial \zeta_*^*}{\partial X} (\zeta_* - \zeta_*)^2 - \frac{\partial^2 \zeta_*^*}{\partial X^2} \frac{1}{3} (\zeta_* - \zeta_*)^3 - \left(\frac{\partial \zeta_*^*}{\partial X} \right)^2 (\zeta_* - \zeta_*)^2 \right] = 0. \quad (12)$$

На основе анализа полученных соотношений можно говорить о наличии нисходящих движений в литосфере и погружения подошвы литосферы под горными структурами, что может иметь место в случае Кавказа (рис. 11).

Интересно сравнить результаты механико-математического моделирования с данными геолого-геодинамической реконструкции и сейсмотомографии [14, 17] (рис. 12).

Обсуждение и выводы

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.

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 [18]. Вдоль Северо-Анатолийского разлома сильные землетрясения происходят каждые 1—10 лет (1939, 1942, 1943, 1944, 1953, 1957, 1966, 1967, 1971, 1992,

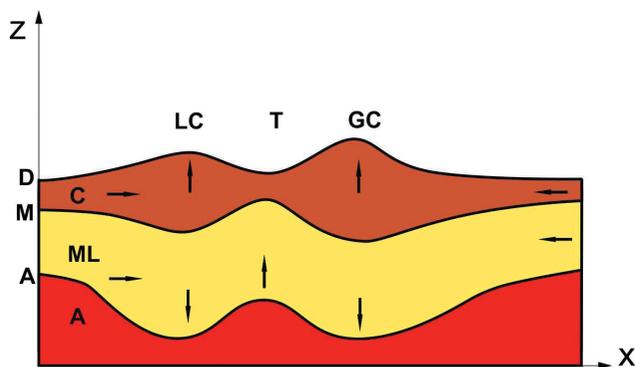


Рис. 11. Схематический разрез Кавказского региона на основе механико-математического моделирования. D — дневная поверхность, M — граница Мохо, A — поверхность астеносферы, C — кора, ML — мантейная литосфера, LC — малый Кавказ, GC — Большой Кавказ, T — Закавказский прогиб. Стрелки — возможные направления движения вещества

Fig. 11. Schematic section of the Caucasus region based on mechanical and mathematical modeling. D — day surface, M — Moho boundary, A — asthenosphere surface, C — crust, ML — mantle lithosphere, LC — Lesser Caucasus, GC — Greater Caucasus, T — Transcaucasian trough. Arrows indicate possible directions of motion of matter

1999) с расстоянием между гипоцентрами около 100 км с направлением на запад (рис. 13).

Поскольку Измитское землетрясение 1999 г. произошло в 80 км к востоку от Стамбула, ждать землетрясения в районе Стамбула можно через несколько лет (1—10 лет). Стамбул можно считать «горячим пятном» сейсмического риска.

Регион наибольшей сейсмичности в Турции (красный цвет на рис. 14) можно рассматривать как «горячую зону» сейсмического риска, а крупные города как — «горячие пятна» сейсмического риска [4]. Стамбул — «горячее пятно» сейсмического риска (белый круг) (рис. 14). В любом случае необходимо проверить и укрепить здания и сооружения в городах из «горячей зоны» [23—25].

Поскольку Восточно-Анатолийский разлом произвел сильные землетрясения 1789 (М 7.2), 1795 (М 7.0), 1872 (М 7.2), 1874 (М 7.1), 1875 (М 6.7), 1893 (М 7.1), 2020 (М 6.8), 2023 г. (М 7.8, М 7.7), то есть повторяемость групп (1790—1880—2020) около 100 лет. Но внутри групп бывает 2—4 близких по времени сильных землетрясения. Можно прогнозировать, что сильное землетрясение на Восточно-Анатолийском разломе если не произойдет через 1—2 года, то произойдет только через 100 лет.

Анализ геолого-геофизических данных и обстановок дает возможность сформулировать и разработать Геодинамическую концепцию геоэкологии.

Геодинамическая концепция геоэкологии и снижение геоэкологического риска

1. Построение геодинамических моделей регионов опасных природных процессов с целью прогноза и предупреждения стихийных бедствий и катастроф.

2. Анализ предвестников землетрясений, извержений вулканов, цунами, оползней и других опасных природных процессов.

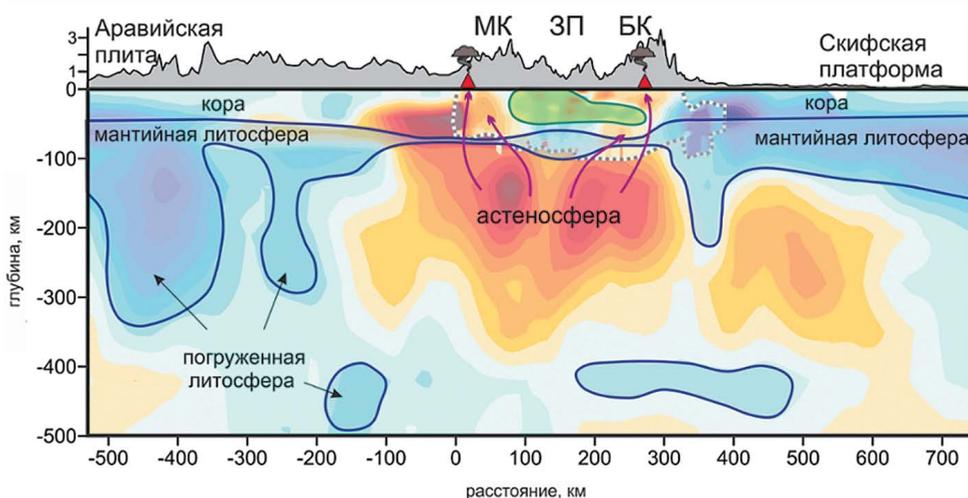


Рис. 12. Вертикальное сейстотомографическое сечение Кавказского региона. МК, БК — Малый и Большой Кавказ соответственно. ЗП — область Закавказского межгорного прогиба. Наверху рельеф над профилем [17]

Fig. 12. Vertical seismic tomographic section of the Caucasus region. МК, БК — Lesser and Greater Caucasus, respectively. ЗП — region of the Transcaucasian intermountain trough. Top relief above the profile [17]

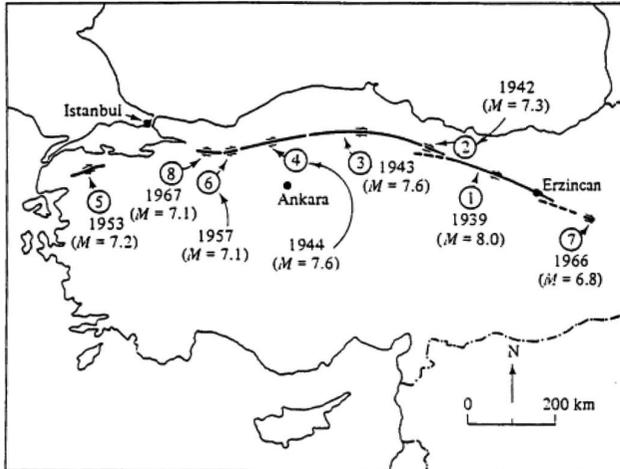


Рис. 13. Северо-Анатолийский разлом и связанные с ним сильные землетрясения [9]
Fig. 13. The North Anatolian fault and its associated strong earthquakes [9]

3. Анализ напряженно-деформированного состояния литосферы на базе изучения систем глубинных и поверхностных разломов как маркеров областей максимальных напряжений и нарушения пределов прочности вещества в литосфере.
4. Разработка подходов и последовательности геолого-геофизических исследований с целью снижения геоэкологического риска и создания систем мониторинга.
5. Механико-математическое моделирование эволюции геологических структур в регионах опасных природных процессов в связи с глубокой геодинамикой литосферы и астеносферы.
6. Оценка и управление геоэкологическим риском.
7. Разработка и создание систем мониторинга.
8. Разработка и применение сейсмостойкого строительства.

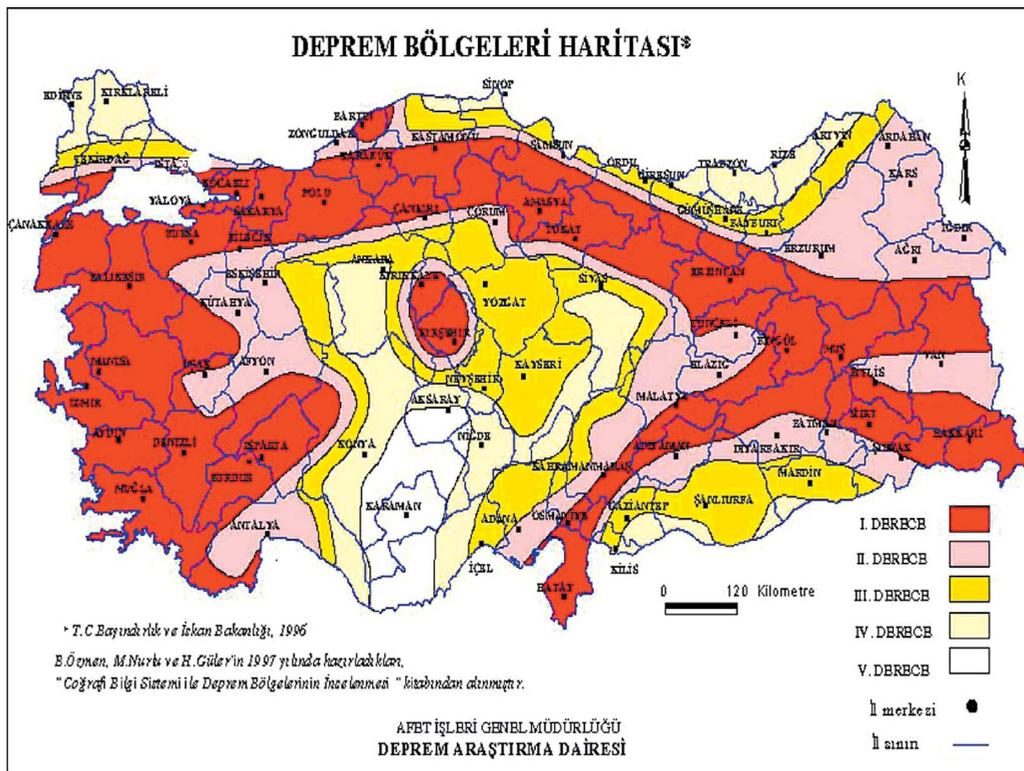


Рис. 14. Стамбул как «горячее пятно» риска землетрясений (белый круг). «Горячая зона» опасности землетрясений (красный цвет) в Турции. Основа: Карта зон землетрясений. Отдел исследования землетрясений. Главное управление по делам стихийных бедствий, Турция
Справа на легенде — уровень сейсмического риска. Красный — очень высокий, розовый — высокий, желтый — средний, светло-желтый — низкий, белый — очень низкий.
Fig. 14. Istanbul as an earthquake risk hotspot (white circle). Earthquake hazard hot zone (red) in Turkey. Base: Map of earthquake zones. Department of Earthquake Research. General Directorate of Disaster Affairs, Türkiye
To the right of the legend is the degree of seismic risk. Red is very high, pink is high, yellow is medium, light yellow is low, white is very low.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гончаров М.А., Короновский Н.В., Разницын 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. Рогожин Е.А., Горбатилов 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.
4. Свалова В.Б. «Горячие пятна» геозекологического риска и проблемы территориального планирования // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. 2022. № 64(3). С. 19—34. DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-3-19-34
5. Свалова В.Б. Механико-математическое моделирование формирования и эволюции геологических структур в связи с глубинным мантийным диапиризмом // Мониторинг. Наука и технологии. 2014. № 3(20). С. 38—42.
6. Уломов В.И., Данилова Т.И., Медведева Н.С., Полякова Т.П., 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. Шарков Е.В., Свалова В.Б. Внутриконтинентальные моря как результат задугового спрединга при коллизии континентальных плит // Доклады Академии наук СССР. 1989. Т. 308, № 3. С. 685—688.
9. Allen C.R. Active faulting in northern Turkey. California Institute of Technology. California, 1969. P. 32—34.
10. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // Geochem. Geophys. Geosyst. 2002. No. 3. Paper No. 2001GC000168 DOI: 10.1029/2001GC000168
11. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region // Geotectonics. 2004. No. 2. P. 55—72.
12. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // J. Geophys. Res. 1998. Vol. 103. P. 30055—30078.
13. Duman T.Y., et al. Seismotectonic database of Turkey // Bulletin of earthquake engineering. 2018. Vol. 16, no. 8. P. 3277—3316.
14. Gee D.G., Zeyen H.J. (eds). EUROPROBE 1996 — Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Uppsala University. 1996. 138 p.
15. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth // GSA Today. 1997. No. 7(4). P. 1—7.
16. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.O., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault // Geophysical Journal International. 2022. No. 230(1). P. 50—69.
17. 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. P. 327—337.
18. 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. P. 1—12.
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. P. 381—390.
20. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoic geodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. New Frontiers in Tectonic Research — General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs. INTECH, Croatia. 2011. P. 18—38.
21. Stein R.J., Barka A.A., Dieterich J.H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering // Geophysical Journal International. 1997. Vol. 128. Iss. 3. P. 594—604, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x
22. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis // Earth-Science Reviews. 2010. No. 101. P. 29—67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002
23. Svalova V. (ed.). Earthquakes — Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71298
24. Svalova V. Earthquakes: Life at Risk / In: Svalova V. (ed.). Earthquakes — Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction. InTech. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79917
25. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas // Geology of the South of Russia. 2019. No. 9(2). P. 109—127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981
26. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes // Earth Planet. Sci. Lett. 2001. Vol. 192. P. 423—436.
27. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle // J. Geophys. Res. 1996. Vol. 101. P. 27791—27810.

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. P. 80—93.
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. P. 56—65.
3. 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. P. 36—49.
4. Svalova V.B. “Hot spots” of geoecological risk and problems of territorial planning // *Proceedings of higher educational establishments. Geology and exploration*. 2022. No. 64(3). P. 19—34. DOI: 10.32454/0016-7762-2022-64-3-19-34
5. Svalova V.B. Mechanical and mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures in connection with deep mantle diapirism // *Monitoring. Science and technology*. 2014. No. 3(20). P. 38—42.
6. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., L.S. Shumilina L.S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus // *Physics of the Earth*. 2007. No. 7. P. 31—45.
7. Khain V.E., Lomize M.G. *Geotectonics with the basics of geodynamics*. Moscow: KDU, 2005. 560 p.
8. Sharkov E.V., Svalova V.B. Inland seas as a result of back-arc spreading during continental plate collision // *Reports of the Academy of Sciences of the USSR*. 1989. Vol. 308, no. 3. P. 685—688.
9. Allen C.R. *Active faulting in northern Turkey*. California Institute of Technology. California, 1969. P. 32—34.
10. Becker T.W., Boschi L. A comparison of tomographic and geodynamic mantle models // *Geochem. Geophys. Geosyst.* 2002. No. 3. Paper No. 2001GC000168. DOI: 10.1029/2001GC000168
11. Ershov A.V., Nikishin A.M. Recent geodynamics of the Caucasus-Arabia-East Africa region // *Geotectonics*. 2004. No. 2. P. 55—72.
12. Bijwaard H., Spakman W., Engdahl E.R. Closing the gap between regional and global travel time tomography // *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 30055—30078.
13. Duman T.Y., et al. Seismotectonic database of Turkey // *Bulletin of earthquake engineering*. 2018. Vol. 16, no. 8. P. 3277—3316.
14. Gee D.G., Zeyen H.J. (eds). *EUROPROBE 1996 — Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Uppsala University. 1996. 138 p.
15. Grand S.P., van der Hilst R.D., Widiyantoro S. Global seismic tomography: A snapshot of convection in the Earth // *GSA Today*. 1997. No. 7(4). P. 1—7.
16. Güvercin S.E., Karabulut H., Konca A.O., Doğan U., Ergintav S. Active seismotectonics of the East Anatolian Fault // *Geophysical Journal International*. 2022. No. 230(1). P. 50—69.
17. 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. P. 327—337.
18. 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. P. 1—12.
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. P. 381—390.
20. Sharkov E., Svalova V. Geological-geomechanical simulation of the Late Cenozoic geodynamics in the Alpine-Mediterranean mobile belt. *New Frontiers in Tectonic Research — General Problems, Sedimentary Basins and Island Arcs*. INTECH, Croatia. 2011. P. 18—38.
21. Stein R.J., Barka A.A., Dieterich J.H. Progressive failure on the North Anatolian fault since 1939 by earthquake stress triggering // *Geophysical Journal International*. 1997. Vol. 128. Iss. 3. P. 594—604, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1997.tb05321.x
22. Stern R.J., Johnson P. Continental lithosphere of the Arabian Plate: A geologic, petrologic, and geophysical synthesis // *Earth-Science Reviews*. 2010. No. 101. P. 29—67. DOI: 10.1016/j.earscirev.2010.01.002
23. Svalova V. (ed.). *Earthquakes — Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction*. InTech, 2018. DOI: 10.5772/intechopen.71298
24. Svalova V. *Earthquakes: Life at Risk / In: Svalova V. (ed.). Earthquakes — Forecast, Prognosis and Earthquake Resistant Construction*. InTech. 2018. DOI: 10.5772/intechopen.79917
25. Svalova V.B., Zaalishvili V.B., Ganapathy G.P., Nikolaev A.V., Melkov D.A. Landslide risk in mountain areas // *Geology of the South of Russia*. 2019. No. 9(2). P. 109—127. DOI: 10.23671/VNC.2019.2.31981
26. Zhao D. Seismic structure and origin of hotspots and mantle plumes // *Earth Planet. Sci. Lett.* 2001. Vol. 192. P. 423—436.
27. Zhou H. A high-resolution P wave model for the top 1200 km of the mantle // *J. Geophys. Res.* 1996. Vol. 101. P. 27791—27810.

ВКЛАД АВТОРА / AUTHOR CONTRIBUTIONS

Свалова В.Б. — разработала концепцию статьи, подготовила текст статьи, окончательно утвердила публикуемую версию статьи и согласна принять на себя ответственность за все аспекты работы.

Valentina B. Svalova — contributed to the development of the article concept, prepared the text, approved the final version of the manuscript and accepts responsibility for all aspects of the work.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ / INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Свалова Валентина Борисовна — кандидат физико-математических наук, в.н.с. ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук».

13, Уланский пер., г. Москва 101000, Россия
Геофизический институт Владикавказского научного центра Российской академии наук
93а, ул. Маркова, г. Владикавказ 362002, Россия
e-mail: v-svalova@mail.ru
тел.: +7 (916) 206-41-47
SPIN-код: 6883-5190
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-2438>

Valentina B. Svalova — Cand. of Sci. (Phys. and Math.), Leading scientist, Sergeev Institute of Environmental Geoscience of RAS.

13, Ulansky lane, Moscow 101000, Russia
Geophysical Institute of the Vladikavkaz Scientific Center of the Russian Academy of Sciences
93a, st. Markova, Vladikavkaz 362002, Russia
e-mail: v-svalova@mail.ru
tel.: +7 (916) 206-41-47
SPIN-code: 6883-5190
ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5597-2438>