

УДК: 550.34.013.4, 551.24

DOI: [10.46698/VNC.2021.52.15.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.52.15.007)

Оригинальная статья

Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование

В. Б. Свалова 

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

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

Статья поступила: 29.07.2021, доработана: 24.08.2021, одобрена в печать: 07.09.2021

Резюме: Формирование и эволюция геологических структур отражают взаимодействие коры и мантии. **Актуальность работы** определяется предметом исследования – решением задачи механико-математического моделирования формирования и эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром. Для моделирования геологических процессов и эволюции геологических структур в связи с движениями глубинных слоев мантии были собраны и проанализированы все возможные геолого-геофизические данные и использованы механико-математические модели различной реологии. Геолого-геофизические данные для Альборанского, Балеарского, Тирренского, Эгейского, Ионического, Черного, Каспийского морей, Левантйской, Прикаспийской, Паннонской, Алеутской впадин, Охотского, Японского, Филиппинского морей собраны и проанализированы. Взаимодействие литосферы и астеносферы находит свое отражение в формировании и эволюции геологических структур. Зоны столкновения литосферных плит характеризуются высокими Р-Т условиями, высокой сейсмичностью, землетрясениями, вулканизмом, магматизмом и активными проявлениями геотермальной энергии: вулканами, минеральными водами, дегазацией, горячими источниками. **Целью исследования** является разработка адекватной модели формирования и эволюции геологических структур на поверхности Земли в связи с глубинными геодинамическими процессами. **Методы работы.** Для изучения динамики литосферы в процессе эволюции на больших временах использовались механико-математические модели геологической среды на основе модели многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости. Для приближенного решения уравнений Навье-Стокса и уравнения неразрывности использовались метод разложения по малому параметру, метод последовательных приближений и метод сращиваемых асимптотических разложений. Моделирование дает возможность рассчитывать распределение Р-Т параметров в слоях осадочного чехла, коры и верхней мантии в процессе эволюции структур. Существование зон растяжения в задуговых бассейнах можно объяснить подъемом мантийных диапиров в результате геотермального эффекта и подъемом астеносферы в процессе столкновения глубинных мантийных потоков. **Результаты работы.** Результаты механико-математического моделирования показывают, что в процессе развития осадочных бассейнов над поднимающимся мантийным диапиром структура поверхностного свода сменяется структурой глубокой депрессии. В аналитическом решении найдены критические параметры задачи, связывающие форму диапира, его глубину и скорость подъема со структурой земной поверхности. Результаты моделирования исследованы на примерах геологического строения Альпийского и Тихоокеанского поясов и хорошо согласуются с геолого-геофизическими данными.

Ключевые слова: геотермия, сейсмичность, геодинамика, моделирование, Альпийский пояс, Тихоокеанский пояс, сейсмоотография.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for mountain territories in Russia and India") и темы НИР (№0142-2014-0027 «Развитие теории и методов изучения новейшей тектоники и современной геодинамики платформенных и орогенных территорий применительно к оценке их безопасности»).

Для цитирования: Свалова В. Б. Сравнительная геодинамика и геотермия Альпийского и Тихоокеанского поясов. Механико-математическое моделирование. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11 (3): 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

[DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.52.15.007)

Original paper

Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling

V. B. Svalova 

Sergeev Institute of Environmental Geoscience of the RAS, 13, building 2 Ulansky per.,
Moscow 110100, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail.ru;

Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 29.07.2021, revised: 24.08.2021, accepted: 07.09.2021

Abstract. The origin and evolution of geological structures reflect crust-mantle interaction. **The relevance of the work** is determined by the subject of the study – the solution of the problem of mechanical and mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures above the rising mantle diapir. For simulation of geological processes and geological structures evolution in connection with deep mantle movements all possible geological-geophysical data were combined and analyzed and the mechanical-mathematical models of different rheology were used. Geological-geophysical data for Alboran sea, Balearic sea, Tyrrhenian sea, Aegean sea, Ionian sea, Levant sea, Black sea, Caspian sea, Pre-Caspian depression, Pannonian depression, Aleutian depression, Okhotsk sea, Sea of Japan, Philippines sea are combined and analyzed. Lithosphere-asthenosphere interaction is reflected in geological structures formation and evolution. The zones of the lithosphere plates collision are characterized by high P-T conditions, high seismicity, earthquakes, volcanism, magmatism and active geothermal energy manifestations: volcanoes, mineral waters, degazation, hot springs. **The aim** of the study is to develop an adequate model of the formation and evolution of geological structures on the Earth's surface in connection with deep geodynamic processes. **Methods.** To study the dynamics of the lithosphere in the process of evolution at long times, we used mechanical and mathematical models of the geological medium based on the model of a multilayer high-viscosity fluid. For the approximate solution of the Navier-Stokes equations and the continuity equation, the method of decomposition in a small parameter, the method of successive approximations and the method of splicing asymptotic decomposition were used. Modeling gives possibility to calculate P-T parameters distribution in the layers of sedimentary cover, crust and upper mantle in the process of the structures evolution. The existing of stretching zones in back-arc basins can be explained by upwelling of mantle diapirs as a result of geothermal effect and raising of asthenosphere in the process of collision of deep mantle flows. **Results.** The

results of mechanical and mathematical modeling show that during the development of sedimentary basins above the rising mantle diapir, the structure of the surface vault is replaced by the structure of a deep depression. In the analytical solution, the critical parameters of the problem are found that relate the shape of the diapir, its depth, and the ascent rate with the structure of the Earth's surface. The results of modeling are investigated on the examples of the Alpine and Pacific belts geological structures and give good agreement with geological-geophysical data.

Keywords: geothermy, seismicity, geodynamics, modeling, Alpine belt, Pacific belt, seismic tomography.

Acknowledgments: *This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation, (project No. 19-47-02010, "Natural hazards and monitoring for research in Russia and India") and research topics (No. 0142-2014-0027 "Development of the theory and methods of studying the latest tectonics and modern geodynamics of platform and orogenic territories in relation to the assessment of their safety").*

For citation: Svalova V.B. Comparative geodynamics and geothermy of the Alpine and Pacific belts. Mechanical-mathematical modeling. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11 (3): 76 – 92. DOI: 10.46698/VNC.2021.52.15.007.

Введение

Формирование и эволюция геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов во многом определяются подъемом мантийных диапиров, выражающих явление гравитационной неустойчивости в периоды тектоно-магматической активизации на фоне коллизии литосферных плит Африканской и Евразийской в Средиземноморье и Тихоокеанской и Евразийской в Тихоокеанском поясе.

Важным методом, применяемым при изучении геологических структур на разных этапах эволюции и анализе полей скоростей, напряжений и температур в осадочном чехле, коре и верхней мантии в различных тектонических условиях, является построение адекватной механико-математической модели геологической эволюции региона [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014, 2019, 2020; Condie, 2001; Davies, 1999; Trubitsyn et al., 2021].

Существуют два разных подхода к математическому моделированию геологических структур и процессов. Первый – применить полную систему механических уравнений, адекватно описывающих формирование и эволюцию той или иной тектонической структуры, и последующий расчет полученных уравнений при требуемых граничных и начальных условиях на мощных компьютерах.

Второй – максимально возможное упрощение полученной системы уравнений, позволяющее аналитически решить проблему с последующими полуколичественными выводами, сопоставимыми с имеющейся геолого-геофизической информацией. Каждый из подходов имеет свои преимущества и недостатки. Оптимальное решение геотектонических задач на основе механико-математического моделирования сочетает в себе преимущества каждого из вышеуказанных методов.

На основе моделирования удастся описать некоторые характерные особенности эволюции геологических структур над поднимающимся мантийным диапиром. Для такого анализа можно использовать механико-математические модели многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости. Модели исследуются на основе геологического строения Альпийского и Тихоокеанского поясов.

Геолого-геофизическое строение Альпийского и Тихоокеанского поясов

Альпийский пояс связан со столкновением континентальных плит (Аравийско-Африканской и Евразийской), а Тихоокеанский пояс связан со столкновением океа-

Таблица 1 / Table 1

**Геолого-геофизические данные для Альпийского и Тихоокеанского поясов /
Geological-geophysical data for Alpine and Pacific belts**

Структуры / Structures	Толщина осадочного чехла (км) /	Толщина кристаллической коры (км) в депрессии (числитель) в окружении (знаменатель) /	Тепловой поток (мВт/м ²) /
1. Тирренское море / Tyrrhenian sea	6	16/45	30-160
2. Эгейское море / Aegean Sea	3	15/23	100
3. Черное море / Black Sea	16	15/45	30-35
4. Прикаспийская впадина / Caspian depression	24	12/40	40
5. Южно-Каспийская впадина / South Caspian depression	20	12/45	40-50
6. Ионическое море (юг) / Ionian Sea (South)	12	10/35	30-40
7. Ионическое море (север) / Ionian Sea (north)	8	10/30	50-70
8. Балеарское море / Balearic sea	8	10/40	50
9. Левантийская впадина / Levantine depression	6	8/30	30
10. Паннонская впадина / Pannonian depression	9	18/27	90
11. Алеутская впадина / Aleutian depression	5	10/26	60-80
12. Охотское море / Sea of Okhotsk	4	8/20	100
13. Японское море / Japanese Sea	2	12/29	100-120
14. Филиппинское море / Philippine sea	2	6/13	60

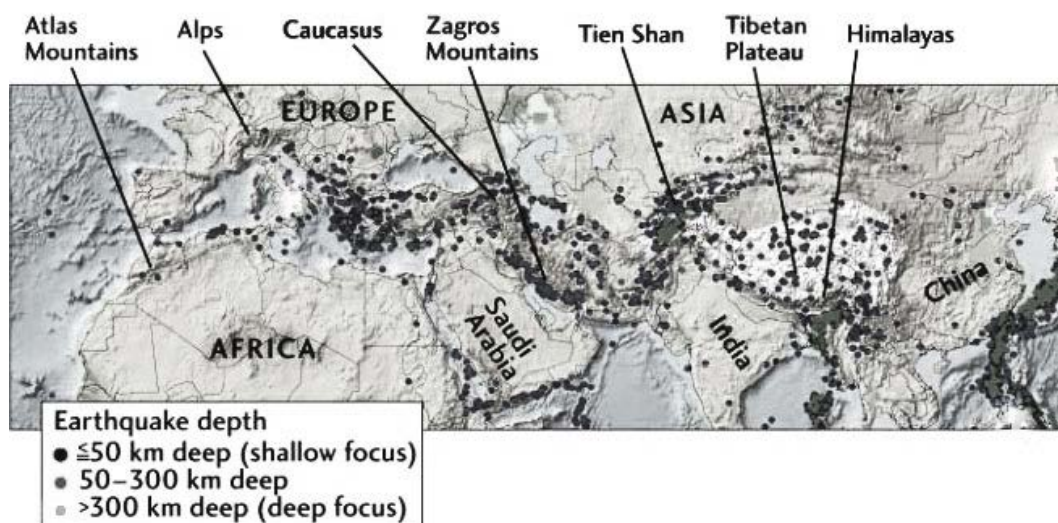


Рис. 1. Альпийско-Гималайский пояс (NASA) /
Fig. 1. Alpine-Himalayan belt (NASA)

нической и континентальной плит (Тихоокеанской и Евразийской), но у них много общих черт [Богданов, 1988; Богданов, Филатова, 2001; Маловицкий и др., 1988; Родников и др., 2003; Хаин, 1985; Хаин, Ломизе, 2005]. Альпийский и Тихоокеанский пояса включают различные структуры – морские котловины, осадочные бассейны, задуговые бассейны, орогены (рис. 1-5) [Геофизические поля..., 1985; Милуков и др., 2015; Уломов и др., 2007; Моисеенко и др., 1993; Рогожин и др., 2015; Gee, Zeyen, 1996; Koulikov et al., 2012]. Моря и впадины характеризуются тонкой корой и в основном высокими тепловыми потоками (табл. 1) (The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Commission. <http://www.heatflow.und.edu/>) [Тектоника..., 1980; Земная кора..., 1982; Свалова, 2014; Фролова, 1997; Gornov, 2021]. Структуры характеризуются активным магматизмом и базальтовым вулканизмом с ксенолитами астеносферного вещества. Спрединговые зоны окраинных морей Тихоокеанского пояса проявляются отодвиганием от континентов островных дуг, приобретающих изгиб в сторону океана, что также объясняется подъемом мантийных диапиров. Скорость отодвигания составляет около 2 см/год [Картер, Робертсон, 1987] на фоне коллизии плит со скоростью около 7 см/год (рис. 4). Таким образом, геолого-геофизические данные позволяют связать эти структуры с апвеллингом мантийных диапиров [Андерсон, Дзевонский, 1984; Свалова, 2014; Karig, 1974; Ringwood et al., 1988; Rodnikov et al., 2001; Tamaki, 1988]. Над поднимающимися астеносферными диапирами на поверхности Земли возникают структуры сводовых поднятий или глубинных депрессий в зависимости от энергии и стадии подъема диапиров. Между диапирами возникают структуры орогенов и утолщение коры.

Развитие Альпийско-Гималайского пояса на всем своем протяжении сопровождалось проявлениями позднекайнозойского базальтового магматизма, выражающего явление тектоно-магматической активизации, а западный сектор структуры в

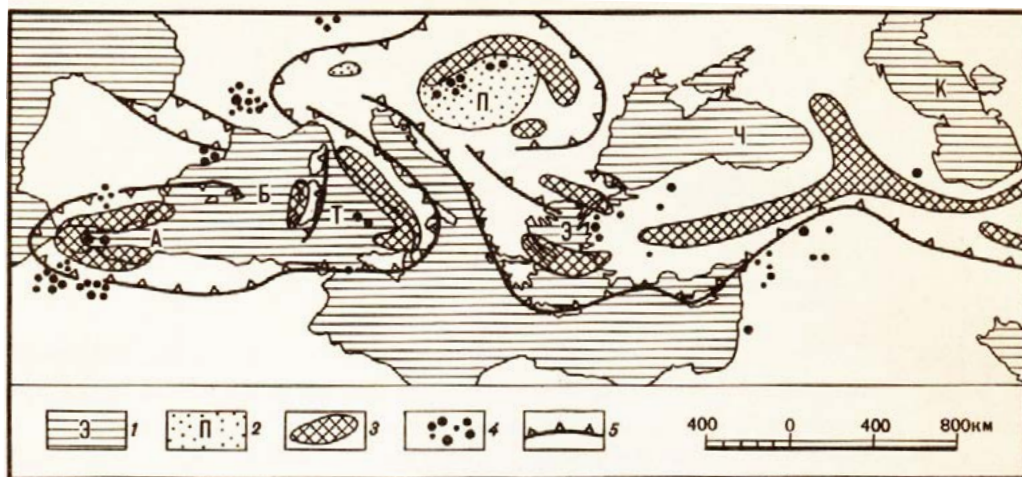


Рис. 2. Структура западной части Альпийско-Гималайского пояса. 1 – моря (А – Альборанское, Б – Балеарское, К – Каспийское, Т – Тирренское, Ч – Черное, Э – Эгейское); 2 – Паннонская впадина; 3 – вулканические дуги; 4 – ареалы базальтового вулканизма; 5 – фронтальные зоны крупнейших надвиговых структур [Шарков, Свалова, 1989] /

Fig. 2. Structure of Western sector of Alpine-Himalayan belt. 1 – seas (A – Alboran sea, B – Balearic sea, K – Caspian sea, T – Tyrrhenian sea, Ч – Black sea, Э – Aegean sea).

2 – Pannonian Depression. 3 – volcanic arcs. 4 – areals of basalt volcanism. 5 – frontal zones of napping structures [Sharkov, Svalova, 1989]

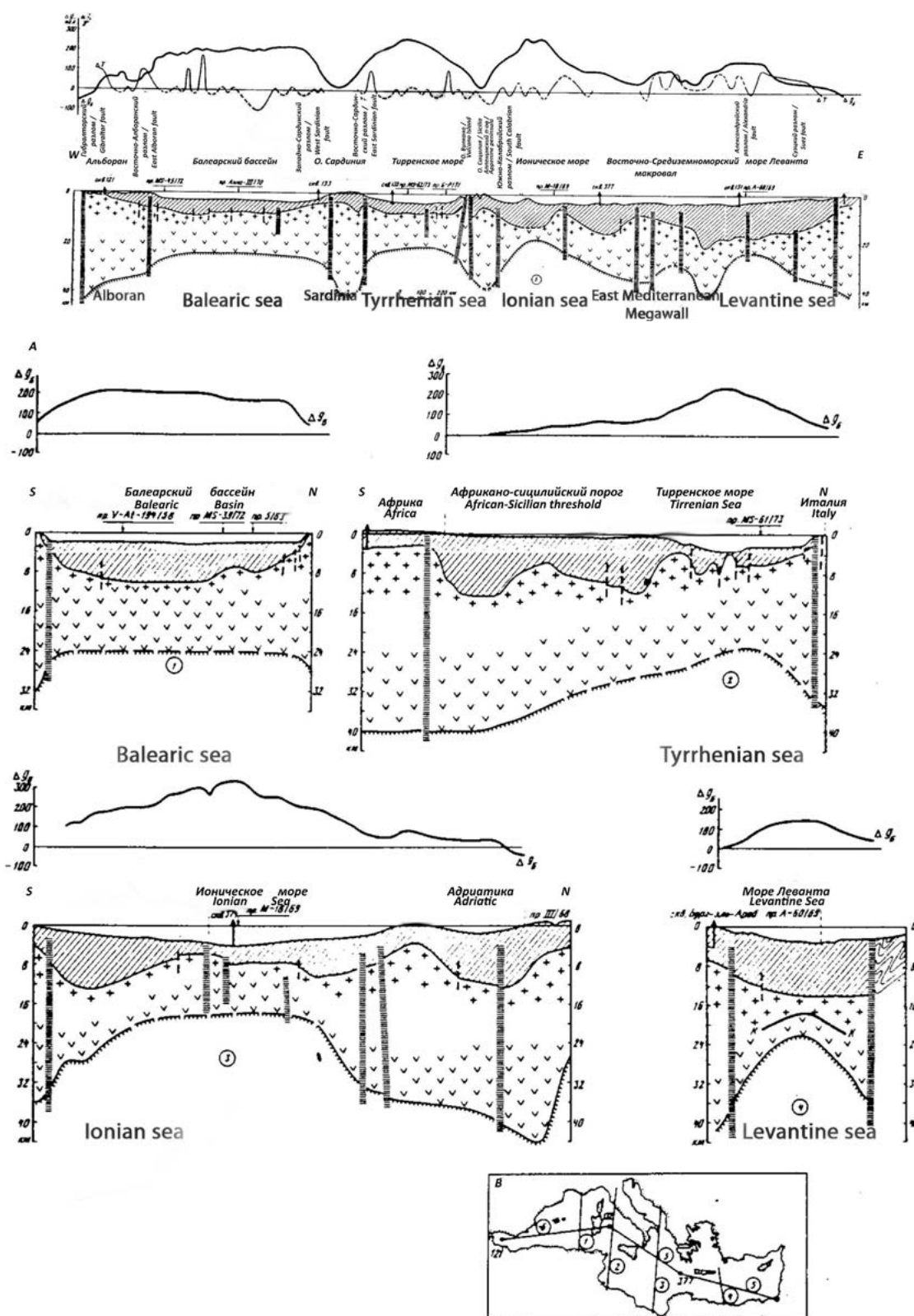


Рис. 3. Результаты геолого-геофизических исследований тектонических структур Средиземноморья [Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980] /

Fig. 3. Results of geological and geophysical studies of tectonic structures of the Mediterranean [Sulidi-Kondratyev, Kozlov, 1980]

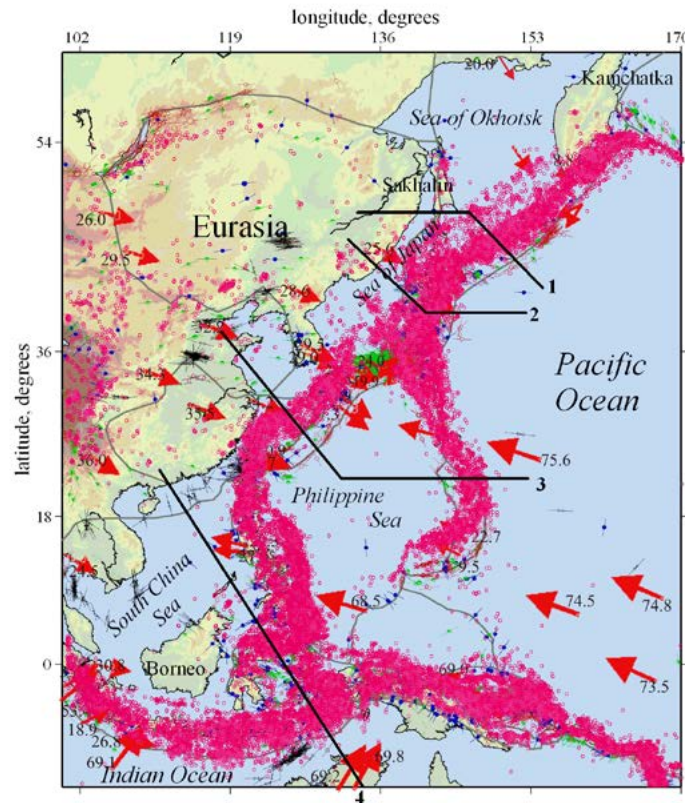


Рис. 4. Область переходной зоны от Евразийского континента к Тихому океану с пространственным распределением землетрясений с $M \geq 3,5$ за период 1973-2011 гг. (розовые кружки) и профилями геотраверсов (1 – геотраверс Охотского моря; 2 – геотраверс Японского моря; 3 – геотраверс Северо-Китайской равнины – Филиппинское море; 4 – геотраверс Южно-Китайского моря). Красные стрелки и соседние числа указывают направление и скорость (мм/год) движения плит. Черные линии – границы плит [Zabarinskaya et al., 2021] /

Fig. 4. The region of the transition zone from the Eurasian continent to the Pacific Ocean with spatial distribution of earthquakes with $M \geq 3.5$ for the period 1973-2011 (pink circles), and profiles of geotraverses (1 – Okhotsk Sea geotraverse; 2 – Japan Sea geotraverse; 3 – North China Plain-Philippine Sea geotraverse; 4 – South-China Sea geotraverse). Red arrows and adjacent numbers indicate the direction and velocity (mm/year) of plates movement. Black lines are plate boundaries [Zabarinskaya et al., 2021]

пределах Альпийского пояса характеризуется формированием и эволюцией задуговых бассейнов, которые развивались в определенной стадийности.

Представления о наличии мантийного диапира под субокеаническими впадинами подтверждаются геофизическими, геотермическими и петрологическими данными [Родников и др., 2003; Сулиди-Кондратьев, Козлов, 1980], которые, в частности, фиксируют наклон кровли мантии в сторону от котловины под углом 12° [Berry et al., 1969]. В субокеанических впадинах проявлены области преобразования коры посредством механизма рассеянного спрединга в отличие от линейного спрединга, свойственного срединно-океаническим хребтам и рифтам.

Геолого-геофизические данные свидетельствуют о формировании Альпийского пояса на фоне крупного астеносферного поднятия (суперплюма).

Явление гравитационной неустойчивости на поверхности суперплюма реализуется мантийными диапирами, являющимися структурами более мелкого масштаба. Смена режимов осадконакопления, а также изменение направления течения

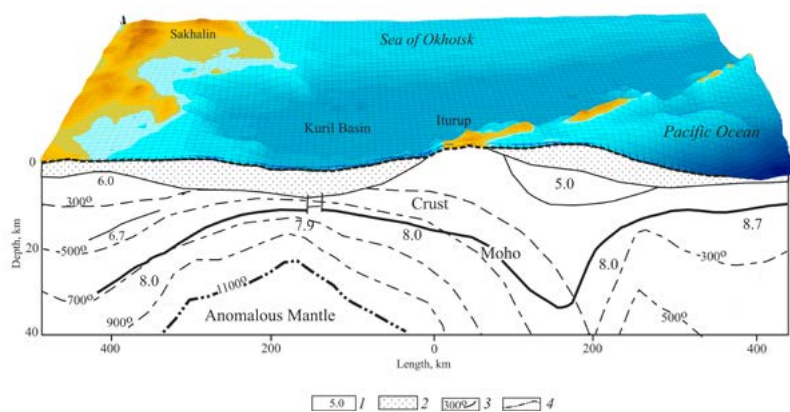


Рис. 5. Внутренняя температура Земли в коре и верхней мантии для Сахалина, Курильской котловины, Курильской островной дуги, Курильского жёлоба и западной части Тихого океана. 1 – сейсмические скорости, км/с; 2 – осадочный слой; 3 – изотермы, °С; 4 – изотерма 1100°С [Zabarinskaya et al., 2021] /

Fig. 5. Earth's internal temperature in the crust and upper mantle for Sakhalin, Kuril Basin, Kuril island arc, Kuril trench and west Pacific. 1 – seismic velocities, km/sec; 2 – sedimentary layer; 3 – isotherms, °C; 4 – isotherm of 1100°C [Zabarinskaya et al., 2021]

палеорек, подтверждает, что над мантийным диапиром сводовые поднятия могут сменяться глубокими депрессиями.

На базе анализа имеющихся геолого-геофизических данных разработана механико-математическая модель динамики литосферных движений над поднимающимся мантийным диапиром, хорошо описывающая механизм формирования отдельных геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов.

Форма границ Мохо и Конрада глубоководных впадин типа Тирренского, Черного и Каспийского морей определяется динамикой астеносферных поднятий и физическими параметрами геологической среды.

Формирование осадочных бассейнов и задуговых морей Альпийского и Тихоокеанского поясов объясняются апвеллингом мантийных диапиров, а структура орогена Кавказа связана как с зоной коллизии литосферных плит, так и со столкновением потоков астеносферы под Черным и Каспийским морями.

Методы работы. Механико-математическое моделирование эволюции геологических структур над поднимающимися астеносферными диапирами

Интересно и важно проанализировать и объяснить происхождение и эволюцию геологических структур на основе построения адекватных механико-математических моделей. Некоторые характерные черты развития геологических структур Альпийского и Тихоокеанского поясов, в частности, областей задугового спрединга над региональными подъемами астеносферы, которые здесь являются центрами глубинной активности, в значительной мере определяющими все другие процессы, могут быть описаны моделью многослойной высоковязкой несжимаемой жидкости, плотности и вязкости которой меняются от слоя к слою. Для приближенного решения уравнений механики сплошных сред используются метод разложения по малому параметру, метод последовательных приближений и метод сращиваемых асимптотических разложений [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Чтобы получить аппроксимацию системы механических уравнений путем анализа порядка соответствующих значений величин в этих уравнениях, необходимо выделить малые параметры задачи, которые можно использовать для разложения.

Многочисленные геологические структуры характеризуются довольно пологим залеганием слоев и значительным превышением горизонтального регионального масштаба L над вертикальным масштабом h типичной мощности геологических слоев. Это позволяет ввести в анализ задачи малый параметр h/L . Второй малый параметр задачи F/R , F – число Фруда, R – число Рейнольдса, возникает при анализе реологического поведения вещества в слоях [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Толщина литосферы Альпийского пояса изменяется от 30 км в центре депрессии Тирренского моря до 70-100 км во впадинах Восточного Средиземноморья. Характерный размер впадин по латерали достигает 500-1000 км и более, расстояние между впадинами порядка 1000-1500 км.

Тогда предлагается для описания динамики слоев коры и мантийной литосферы использовать двухслойную модель высоковязкой несжимаемой жидкости с характерными параметрами $h_3 \sim 10$ км – толщина коры, $h_2 \sim 100$ км – толщина мантийной литосферы, $L \sim 1000$ км – горизонтальный масштаб геологических структур, $\varepsilon = h_3/L = 10^{-2}$ – малый параметр задачи.

Медленные деформации литосферы моделируются с помощью модели вязкого течения в многослойной несжимаемой высоковязкой ньютоновской жидкости на основе уравнения Навье-Стокса (1) и уравнения неразрывности (2):

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

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

где v – вектор скорости, F – сила тяжести, p – давление, r – плотность, μ – вязкость, t – время.

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

$$x=LX, y=LY, z=hZ, u=u_0U, v=u_0V, w=u_0(h/L)W, p=r_0ghP, \quad (3)$$

где r_0, u_0 – характерные значения плотности и скорости. Можно получить уравнение Навье-Стокса и уравнение неразрывности в безразмерной форме для медленных движений в тонком слое для двумерного случая:

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

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

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

где F – число Фруда, R – число Рейнольдса, ρ_0, μ_0, u_0 – характерные масштабы плотности, вязкости и скорости.

Силы на верхней границе равны 0 (свободная поверхность). Скорости и давления непрерывны на границах слоев. Тогда из уравнений (4-5) можно найти давления и скорости в слоях в зависимости от скорости вещества на нижней границе [Занемонец и др., 1974; Свалова, 2014].

Также на верхней границе ζ^* выполняется кинематическое условие свободной поверхности, состоящее в том, что частицы не покидают поверхность в процессе движения (7):

$$S \frac{\partial \zeta^*}{\partial t} + U^* \frac{\partial \zeta^*}{\partial X} - W^* = 0 \quad (7)$$

$$S = \frac{L}{u_0 t_0}, \quad (8)$$

где S – число Струхала. t_0 – масштаб времени.

Границу Мохо также можно рассматривать как вещественную и непроницаемую. Подставляя скорости в уравнение свободной поверхности (7), можно получить уравнение движения для любой непроницаемой границы.

Разлагая скорости и давления в ряд по $\sqrt{\varepsilon}$, можно получить в нулевом приближении уравнения дневной поверхности ζ_3 и поверхности фундамента ζ_2 в зависимости от скорости подъема мантийного диапира $z_1 U_0, W_0|_{\zeta_1}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \zeta_3}{\partial X^2} = \beta \left[h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] \\ \left[S \frac{\partial \zeta_2}{\partial t} + U_0 \frac{\partial \zeta_2}{\partial X} + \alpha \left[h_2 \frac{\partial U_0}{\partial X} - W_0 \right] \right] = 0 \end{cases} \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{(h_3)^3}{(h_3)^3 + \frac{\mu_3}{\mu_2} (h_2)^3}, \quad \beta = \frac{1}{\frac{\rho_3}{3} \left[\frac{(h_3)^3}{\mu_3} + \frac{(h_2)^3}{\mu_2} \right]},$$

где $S = \frac{L}{u_0 t_0}$ – число Струхала, u_0 – характерный масштаб скорости вещества литосферы, t_0 – характерное время процессов, μ_1 – вязкости слоев, ρ_1 – плотности слоев.

Зададим поле скоростей и морфологию границы ζ_1 в виде:

$$U_0 = a \operatorname{th} kX, \quad \zeta_1(X, t) = -\gamma \operatorname{sh}^2 kX - (h_2 + h_3) + \frac{D}{S} t, \quad (10)$$

что хорошо отражает основные особенности глубинных движений: подъем астеносферного диапира, раздвиг вещества над ним и опускание вещества на достаточном удалении от центра.

Здесь k, a – параметры интенсивности раздвига: k – в центре структуры, a – вдали от центра; γ – параметр формы поднимающегося диапира; D – скорость подъема диапира $D = S \frac{\partial \zeta_1}{\partial t}$ (рис. 6).

Решение системы (9-10) дает для больших t :

$$\begin{cases} \zeta_2 = -h_3 - \alpha \gamma \operatorname{sh}^2 kX + \alpha h_2 \ln(\operatorname{ch} kX) + \alpha (D - h_2 a k) \frac{t}{S} \\ \left\{ \zeta_3 = \beta \left[\frac{h_2 a}{k} \ln(\operatorname{ch} kX) + \frac{\gamma a}{(2k)^2} \operatorname{ch} 2kX - \left(\frac{\gamma a + D}{2} \right) X^2 \right] + C_1(t), \right. \end{cases} \quad (11)$$

где $C_1(t)$ – константа интегрирования. Можно считать $C_1(t) = 0$.

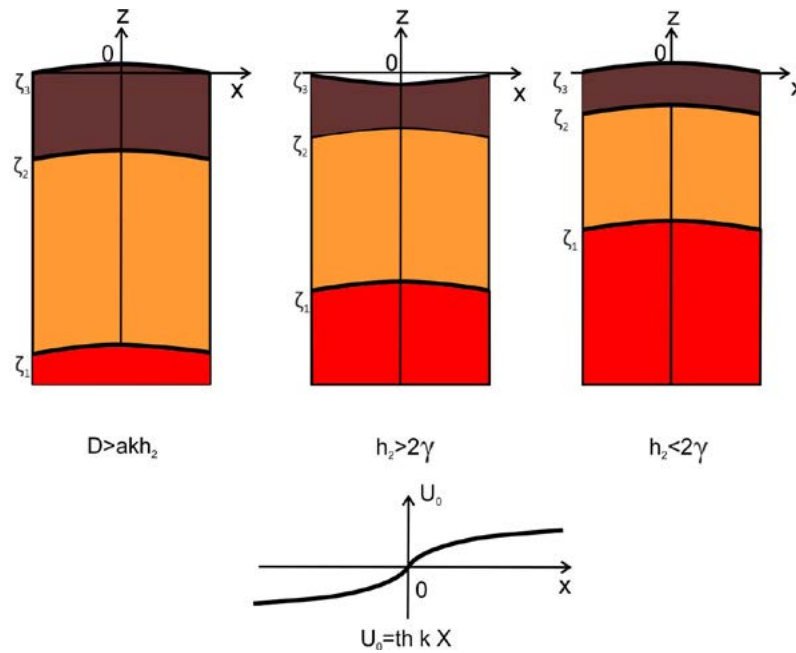


Рис. 6. Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром без латерального ограничения движения. $U_0 = a th kX /$

Fig. 6. Characteristic section of layers of crust and mantle lithosphere above asthenosphere diaper upwelling without lateral restriction of movement. $U_0 = a th kX$

Из анализа данных выражений можно получить критическую глубину подъема астеносферного диапира $h_2 = 2g$, когда изменяется характерная форма слоев литосферы. Если $h_2 > 2g$, то существует прогиб поверхности фундамента в центре раздвига. Если же $h_2 < 2g$ (небольшая глубина плюма) или же скорость его подъема достаточно велика ($D > h_2 ak$), то выпуклости поверхности астеносферного диапира соответствует сводовое поднятие поверхности фундамента (рис. 6).

Если на периферии бассейна существуют препятствия свободному раздвигу литосферы, то поле скоростей на нижней границе слоев можно задать в виде:

$$U_0 = \frac{th X}{ch^2 X}, \quad \zeta_1 = -sh^2 X - (h_2 + h_3) \quad (12)$$

Здесь параметры интенсивности раздвига, изменения формы поднимающегося диапира и скорость подъема диапира опущены для упрощения анализа и наглядности решения задачи.

Тогда:

$$\left\{ \begin{array}{l} \zeta_3 = -\frac{\beta h_2}{2} \frac{1}{ch^2 X} + \frac{\beta}{2} X^2 - \beta \ln(ch X) + C(t) \\ \zeta_2 \cong -h_3 - \frac{\alpha h_2}{S} t - \alpha(1 - 2h_2) sh^2 X + \alpha(1 - 2h_2) (sh X)^{\frac{2(h_2-1)}{1-2h_2}} \exp\left[\frac{2-3h_2}{1-2h_2} \left(\frac{t}{S} - sh^2 X\right)\right] \end{array} \right. \quad (13)$$

где $C(t)$ – постоянная интегрирования.

В этом случае существуют две критические глубины кровли астеносферного поднятия, когда разрез слоев качественно меняется. При $h_2 > 2/3$ в центре структуры формируется прогиб. При $1/2 < h_2 < 2/3$ поверхность фундамента выполаживается, а при $h_2 < 1/2$ отражает морфологию диапира в центре раздвига и образует вогнутость фундамента на периферии депрессии (рис. 7).

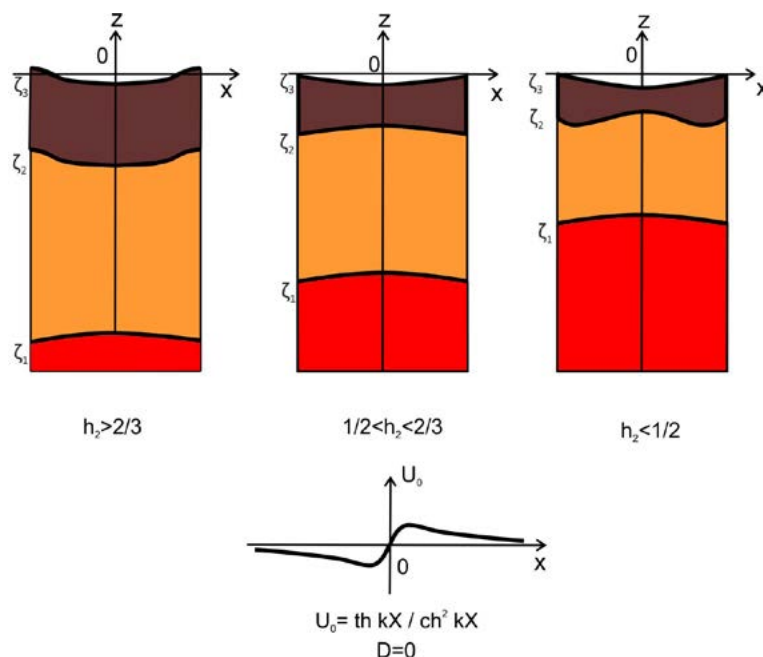


Рис. 7. Характерный разрез слоев земной коры и мантийной литосферы над поднимающимся астеносферным диапиром с латеральными ограничениями для раздвига /

Fig. 7. Characteristic section of layers of crust and mantle lithosphere above asthenosphere diapir upwelling with lateral restriction of movement

Важно отметить, что аналогичные системы уравнений и подходы применимы к структурам разного масштаба – не только к формированию и эволюции осадочных бассейнов и задуговых морей, но и к океаническим впадинам и структурам континентов на разных этапах эволюции и развития. В каждом конкретном случае необходимо анализировать соотношение геометрических параметров задачи, слоистость геологической среды и реологию вещества слоев.

Обсуждение результатов

Анализ построенных моделей и полученных решений значительно расширяет представление о механизмах формирования и эволюции геологических структур и позволяет делать новые выводы, которые не всегда легко объясняются геологами. Совместное использование моделирования и геолого-геофизических данных расширяет возможности метода механико-математического моделирования литосферных процессов и дает дополнительные надежные средства подтверждения гипотез и выводов геологов и геофизиков. Объяснение формирования геологических структур на поверхности Земли зависит от масштаба рассматриваемых процессов, а механико-математическое моделирование имеет свои ограничения вследствие детальности и масштаба объекта моделирования. Если рассматривать Земной шар в целом и моделировать процессы в ядре, мантии, консолидированной коре и осадочном чехле, то очень трудно одновременно уловить детали формирования структур и их движущие процессы. Поэтому часто моделирование литосферных процессов выделяется в отдельную задачу, а процессы в астеносфере и нижней мантии служат граничными условиями для решения поверхностных задач. Также важно, что литосферные процессы развиваются на сферической поверхности Земли, и тектоника литосферных плит во многом определяется не только глубинными процессами в

мантии, раздвигающими плиты, но и латеральными ограничениями, когда плиты сталкиваются и формируют сложную систему геологических структур, определяющих зону коллизии литосферных плит. Так Средиземное море открывалось и закрывалось неоднократно вследствие тектоно-магматической активизации, подъема крупномасштабного мантийного плюма и раздвига плит над ним, а затем, после исчерпания энергии плюма, закрытия океана Тетис и сближения и коллизии литосферных плит в Альпийско-Гималайском поясе. Явление гравитационной неустойчивости на поверхности глобального мантийного плюма проявляется в виде подъема отдельных мантийных диапиров более мелкого масштаба, ответственных за формирование морских впадин западного сектора Альпийско-Гималайского пояса. Эти впадины характеризуются последовательностью и стадийностью развития, и можно последить, как энергия поднимающегося плюма концентрируется в отдельных впадинах и мигрирует от периферии к центру, где максимум активизации реализуется в Эгейском море. А Корсика и Сардиния отодвигаются от Апеннин вследствие подъема диапира под Тирренским морем.

В Эгейском море в районе вулкана Санторин расположена самая крупная в Средиземном море положительная гравитационная аномалия, что говорит о близости к поверхности расплавленной более легкой астеносферы. Также важным показателем активности процессов на дне Эгейского моря являются постоянно происходящие там землетрясения. Анализ эпицентров землетрясений свидетельствует об особенно высокой сейсмической активности зоны, проходящей через Пелопоннесский полуостров и острова Крит и Родос, где неоднократно отмечались землетрясения силой 9 баллов. Это хорошо объясняется наличием здесь зоны субдукции [Шарков, Свалова, 1989].

Также важно отметить, что в Тихоокеанском поясе на фоне коллизии литосферных плит происходит отодвигание островных дуг от центра депрессий окраинных морей, а общая тенденция развития региона такова, что границы Тихого океана сближаются на фоне раздвига срединно-океанического хребта в Тихом океане [Хаин, 1985]. Этот факт отмечает и чл.-корр. РАН В. П. Трубицын («Атлантика раздвигает плечи, а Тихий океан потихоньку закрывается». «Московский комсомолец», 3.2.2021). Здесь важно, какой из океанов – Атлантический или Тихий – интенсивнее раскрывается и как воздействует на окружающие континентальные плиты на данном этапе эволюции Земли.

Все эти процессы тесно связаны и достаточно сложны, тем больший интерес и важность приобретают отдельные достижения и возможности по объяснению различных черт и эффектов при формировании и эволюции геологических структур.

Выводы

Выводы механико-математического моделирования о смене режима подъема литосферы режимом формирования депрессии над поднимающимся мантийным диапиром при однонаправленности такого подъема хорошо объясняют некоторые геологические факты, которые фиксируются геологами и вызывают построение различных гипотез. Когда и по какой причине формируется осадочный бассейн, а когда сводовое поднятие или ороген, во многом объясняется механическим поведением вещества литосферы и астеносферы в сложных условиях напряженно-деформированного состояния среды зон коллизии литосферных плит. Механико-математическое моделирование является мощным фактором анализа, изучения и решения

многих геологических проблем. Именно механические движения являются базисом для тепловых и петрологических процессов. Механические процессы служат основой для конвективного переноса тепла в слоях Земли, на которые накладываются геохимические и петрологические процессы преобразования вещества. Основные черты формирования и эволюции геологических структур в нулевом приближении часто объясняются именно механическим поведением вещества литосферы и астеносферы.

Найдены критические параметры задачи, позволяющие определить эти процессы на количественном уровне. Полученные решения достаточно естественны и хорошо объясняют поведение литосферы при тектономагматической активизации. Действительно, сводовое поднятие на поверхности Земли образуется, если астеносферный диапир поднялся близко к поверхности. Или же если глубокий диапир обладает высокой энергией и скоростью подъема, что дает сильный импульс подъему литосферы и она не успевает растечься в стороны от центра активизации. Если же на поверхности образуется депрессия, то это может объясняться тем, что подъем диапира происходил медленно и долго с больших глубин, и литосфера успевает растечься над ним посредством механизма рассеянного спрединга. Процесс зависит от реологии слоев и соотношения между физическими параметрами. Выбор модели определяется детальностью исследований и тектонической расслоенностью литосферы – какие именно слои рассматривать и моделировать.

Таким образом, полученные из решения задач механико-математического моделирования выводы хорошо согласуются с имеющимися геолого-геофизическими данными о формировании и эволюции геологических структур и дают возможность достоверного объяснения многих наблюдаемых процессов и явлений.

Литература

1. Андерсон Д.Л., Дзевонский А.М. Сейсмическая томография. // В мире науки. – 1984. – №12. – С. 16-26.
2. Богданов Н.А. Тектоника глубоководных впадин окраинных морей. – М.: Недра, 1988. – 219 с.
3. Богданов Н., Филатова Н. Строение и геодинамика формирования активных окраин континентов. // Литосфера. – 2001. – №1. – С. 32-49.
4. Геофизические поля и строение земной коры Закавказья. / Отв. ред. Белоусов В.В., Балавадзе Б.К. – М.: Наука, 1985. – 174 с.
5. Занемонец В.Б., Котелкин В.Д., Мясников В.П. О динамике литосферных движений. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – №4 – С. 43-54.
6. Земная кора и история развития Средиземного моря. / Отв. ред. Муратов М.В. – М.: Наука, 1982. – 208 с.
7. Картер У.Е., Робертсон Д.С. Исследование Земли с помощью интерферометрии со свехдлинной базой. // В мире науки. – 1987. – №1. – С. 16-25.
8. Маловицкий Я.П., Сенин Б.В. Пелагогенные впадины на современных и древних континентальных окраинах. // Геотектоника. – 1988. – №1. – С. 11-23.
9. Милюков 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.
10. Моисеенко У.И., Негров О.Б. Геотермические условия Северо-Кавказской сейсмоопасной зоны. // В кн.: Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 32-40.

11. 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.
12. Родников А. Г., Сергеева Н. А., Забаринская Л. П., Родкин М. В. Особенности строения литосферы осадочных бассейнов окраинных и внутренних морей. // *Геофизика XXI столетия: 2002 год*. – М.: Научный Мир, 2003. – С. 125-135.
13. 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.
14. 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
15. Свалова В. Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. № 4. – С. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.
16. Сулиди-Кондратьев Е. Д., Козлов В. В. Деструкция земной коры в зоне сочленения Африкано-Аравийского континента и Средиземноморско-складчатого пояса. // В кн.: *Тектоника Средиземноморского пояса*. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – С. 40-49.
17. *Тектоника Средиземноморского пояса*. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – 244 с.
18. 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.
19. Фролова Т. И. Магматизм и происхождение тафrogenных впадин. // *Проблемы эволюции тектоносферы. Сб. научных статей (к 90-летию со дня рождения В. В. Белоусова)*. / Отв. ред. Шолпо В. Н. – М.: ОИФЗ РАН 1997. – С. 298-317.
20. Хаин В. Е. Региональная геотектоника: Океаны. Синтез. – М.: Недра, 1985. – 512 с.
21. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.
22. 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.
23. Berry M. J., Knopoff L., Mueller St. The low-velocity channel of the Upper Basin. // *Rapp. et proc.-verb. reun. Comm. intern. explor. Sci. Mer. Mediterr.* – 1969. – Vol. 19. No. 4.
24. Condie K. C. Mantle plumes and their record in Earth history. // *Cambridge University Press*. – 2001. – 306 pp.
25. Davies G. F. Dynamic Earth. Plates, Plums and Mantle Convection. // *Cambridge University Press*. – 1999. – 458 pp.
26. Gee D. G., Zeyen H. J. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // *Uppsala University*. – 1996. – 138 pp.
27. Gornov P. Geothermy of the continental margins of Eastern Russia. // In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. / Ed. Svalova V. B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 123-137.
28. Karig D. S. Evolution of arc systems in the Western Pacific. // *An. Rev. Earth and Planet. Sci.* – 1974. – Vol. 2. – pp. 51-75.
29. 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.
30. Ringwood A. E., Irifune T. Nature of 650 km seismic discontinuity: implication for mantle dynamics and differentiation. // *Nature*. – 1988. – Vol. 331. No. 6152. – pp. 131-134.

31. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. // Russian Journal of Earth Sciences. – 2001. – Vol. 3. No. 4. – pp. 293-310.
32. Tamaki K. Geological structure of the Sea of Japan and its tectonic implications. // Bull. Geol. Surv. Japan. – 1988. – Vol. 39. No. 3. – pp. 269-365.
33. Trubitsyn V. P., Trubitsyn A. P., Evseev M. N., Evseev A. N. The processes of heat and mass transfer in the Earth's mantle. // In the collection: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: «Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering». / Ed. Svalova V. B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 3-23.
34. Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Rashidov V., Nisilevich M., Krylova T. Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. // In the collection: Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: “Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering”. / Ed. Svalova V. B. Springer, Switzerland. – 2021. – pp. 411-428.

References

1. Anderson D. L., Dzevonsky A. M. Seismic tomography. In the world of science, 1984. No. 12. pp. 16-26. (In Russ.)
2. Bogdanov N. A. Tectonics of deep-sea troughs of the marginal seas. Moscow. Nedra, 1988. 219 p. (In Russ.)
3. Bogdanov N., Filatova N. Structure and geodynamics of active continental margins formation. Lithosphere, 2001. No. 1. pp. 32-49. (In Russ.)
4. Belousov V. V., Balavadze B. K. (ed.) Geophysical fields and the structure of the Earth's crust in Transcaucasia. Moscow. Nauka, 1985. 174 p. (In Russ.)
5. Zanemonets V. B., Kotelkin V. D., Myasnikov V. P. On the dynamics of the lithospheric motions. Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth, 1974. No. 4. pp. 43-54. (In Russ.)
6. Muratov M. V. (ed.) Earth's crust and the history of the Mediterranean Sea evolution. Moscow. Nauka, 1982. 208 p. (In Russ.)
7. Carter U. E., Robertson D. S. Earth exploration using very long baseline interferometry. In the world of science. 1987. No. 1. pp. 16-25. (In Russ.)
8. Malovitsky Ya. P., Senin B. V. Pelagogenic depressions on modern and ancient continental margins. Geotectonics. 1988. No. 1. pp. 11-23. (In Russ.)
9. Milyukov V. K., Mironov A. P., Rogozhin E. A., Steblou G. M. Velocities of contemporary movements of the Northern Caucasus estimated from GPS observations. Geotectonics. 2015. No. 3. pp. 56-65. (In Russ.)
10. Moiseenko U. I., Negrov O. B. Geothermal conditions of the North Caucasus seismic hazard zone. In the book: Geothermy of seismic and aseismic zones. Moscow. Nauka, 1993. pp. 32-40. (In Russ.)
11. Rogozhin E. A., Gorbaticov A. V., Stepanova M. Yu., Ovsiuchenko A. N., Andreeva N. V., Kharazova Yu. V. The 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.)
12. Rodnikov A. G., Sergeeva N. A., Zabarinskaya L. P., Rodkin M. V. Features of the lithosphere structure of sedimentary basins of marginal and closed seas. Geophysics of the XXI century, 2002. Moscow. Scientific World, 2003. pp. 125-135. (In Russ.)
13. Svalova V. B. Mechano-mathematical modeling of the formation and evolution of geological structures in connection with deep mantle diapirism. Monitoring. Science and technology. 2014. No. 3. Vol. 20. pp. 38-42. (In Russ.)
14. Svalova V. B. Geothermics and seismicity of the Caucasus region and inverse problem of geodynamics. Geology of the South of Russia, 2019. Vol. 9. No. 3. pp. 77-93. DOI: 10.23671/VNC.2019.3.36485 (in Russ.)

15. Svalova V.B. Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No. 4. pp. 52-69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004. (in Russ.)
16. Sulidi-Kondratyev E.D., Kozlov V.V. Earth's crustdestruction in the conjunction zone of the African-Arabian continent and the Mediterranean-fold belt. In the book: *Tectonics of the Mediterranean Belt*. Moscow. Nauka, 1980. pp. 40-49. (In Russ.)
17. Muratov M. V., Yanshin A. L. (ed.) *Tectonics of the Mediterranean Belt*. Moscow. Nauka, 1980. 244 p. (In Russ.)
18. Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S. To the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. *Physics of the Earth*, 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)
19. Frolova T.I. Magmatism and the origin of taphrogenic depressions. In: *Proceedings Problems of the evolution of the tectonosphere (to the 90th anniversary of the birth of V. V. Belousov)*. Moscow. OIFZ RAS, 1997. pp. 298-317. (In Russ.)
20. Khain V.E. *Regional geotectonics: Oceans. Synthesis*. Moscow. Nedra, 1985. 512 p. (In Russ.)
21. Khain V.E., Lomize M.G. *Geotectonics with the basics of geodynamics*. M. KDU, 2005. 560 p. (In Russ.)
22. Sharkov E.V., Svalova V.B. Intracontinental seas as a result of back-arc spreading during the collision of continental plates. *Reports of the USSR Academy of Sciences*. 1989. Vol. 308. No. 3. pp. 685-688. (In Russ.)
23. Berry M.J., Knopoff L., Mueller St. The low-velocity channel of the Upper Basin. *Rapp. et proc.-verb. reun. Comm. intern. explor. Sci. Mer. Mediterr.*, 1969. Vol. 19. No. 4.
24. Condie K.C. *Mantle plumes and their record in Earth history*. Cambridge University Press, 2001. 306 pp.
25. Davies G.F. *Dynamic Earth. Plates, Plums and Mantle Convection*. Cambridge University Press, 1999. 458 pp.
26. Gee D.G., Zeyen H.J. *EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents*. Uppsala University, 1996. 138 pp.
27. Gornov P. Geothermy of the continental margins of Eastern Russia. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 123-137.
28. Karig D.S. Evolution of arc systems in the Western Pacific. *An. Rev. Earth and Planet. Sci.*, 1974. Vol. 2. pp. 51-75.
29. 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.
30. Ringwood A. E., Irifune T. Nature of 650 km seismic discontinuity: implication for mantle dynamics and differentiation. *Nature*, 1988. Vol. 331. No. 6152. pp. 131-134.
31. Rodnikov A. G., Sergeyeva N. A., and Zabarinskaya L. P. Deep structure of the Eurasia-Pacific transition zone. *Russian Journal of Earth Sciences*, 2001. Vol. 3. No. 4. pp. 293-310.
32. Tamaki K. Geological structure of the Sea of Japan and its tectonic implications. *Bull. Geol. Surv. Japan.*, 1988. Vol. 39. No. 3. pp. 269-365.
33. Trubitsyn V.P., Trubitsyn A.P., Evseev M.N., Evseev A.N. The processes of heat and mass transfer in the Earth's mantle. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 3-23.
34. Zabarinskaya L., Sergeyeva N., Rashidov V., Nisilevich M., Krylova T. Structure and Dynamics of the Lithosphere for the Eurasia-Pacific Transition Zone. In the collection: *Heat-Mass Transfer and Geodynamics of the Lithosphere. Series: "Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering"*. Ed. Svalova V.B. Springer, Switzerland. 2021. pp. 411-428.