ГЕОТЕКТОНИКА И ГЕОДИНАМИКА

УДК: 550.34.013.4, 551.24
DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004

Оригинальная статья

Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона

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: 20.09.2020, доработана: 14.10.2020, одобрена в печать: 20.11.2020

Резюме: Актуальность работы определяется важностью оценки и прогноза нефтегазового потенциала глубоких осадочных бассейнов, в частности, глубоких горизонтов структур, не всегда доступных глубокому бурению в поисковых и разведочных целях. **Цель и методы исследования.** Наряду с прикладными вопросами целью исследования являются фундаментальные вопросы теоретической геодинамики формирования и эволюции осадочных бассейнов в связи с подъемом мантийных диапиров на основе методов механико-математического моделирования. Прикаспийская впадина и восточный сегмент Кавказского региона, включая Каспийское море, могут рассматриваться как регионы окрестности восточной части Альпийского пояса, который в свою очередь является западной частью Альпийско-Гималайского пояса, простирающегося от западной оконечности Средиземного моря до Тихоокеанского побережья. Каспийское море пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней докембрийской Восточно-Европейской платформы, молодой эпигерцинской Скифско-Туранской платформы и современного Альпийско-Гималайского орогенного пояса. Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины являются глубокими осадочными бассейнами с толщиной осадочного чехла более 20 км, обладающими высоким нефтегазовым потенциалом и большим народно-хозяйственным значением. Формирование и эволюция осадочного бассейна служат ключом для определения зон нефтегенерации осадочного чехла, что делает задачу изучения геодинамики осадочных бассейнов крайне важной и необходимой. Геодинамика рельефа поверхности определяется глубинными мантийными движениями. Механико-математическая модель динамики литосферы дает возможность количественно связать параметры формирующегося осадочного бассейна с подъемом мантийного диапира. Анализ геофизических полей геологических структур позволяет оценить подъем астеносферы, а разработанная самосопряженная термогравиметрическая модель литосферы делает эти оценки надежными и достоверными. Геодинамика и история развития геологических структур определяют магматизм, вулканизм, сейсмичность, геотермические характеристики, геотермальную активность, нефтегазоносность, опасные природные процессы региона, что в свою очередь является обоснованием создания системы комплексного экологического мониторинга на фундаментальной научной базе, прогноза и предупреждения природных бедствий и катастроф, а также поиска полезных ископаемых, включая углеводороды. **Результатом работы** является количественная оценка подъема астеносферы под осадочным бассейном на примере Прикаспийской впадины.

Ключевые слова: осадочные бассейны, моделирование, геотермия, геодинамика, гравиметрия, Прикаспийская впадина, Каспийское море, Южно-Каспийская впадина, Кавказский регион, сейсмотомография.

Для цитирования: Свалова В. Б. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины и восточного сегмента Кавказского региона. *Геология и геофизика Юга России.* 2020. 10 (4): 52 – 69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.

Благодарности: Работа выполнена при поддержке гранта Российского научного фонда (проект №1947-02010, «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»).

GEOTECTONICS AND GEODYNAMICS

DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004

Original paper

Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region

V. B. Svalova

Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
13, building 2 Ulansky per., Moscow т101000, Russian Federation, e-mail: v-svalova@mail. ru;
Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Centre, Russian Academy of Sciences, 93a
Markova Str., Vladikavkaz 362002, Russian Federation

Received: 20.09.2020, revised: 14.10.2020, accepted: 20.11.2020

Abstract: The relevance of the work is determined by the importance of assessing and predicting the oil and gas potential of deep sedimentary basins, in particular, deep horizons of structures that are not always accessible to deep drilling for prospecting and exploration purposes. **The aim and research methods**. Along with applied questions, the aim of the study is the fundamental questions of the theoretical geodynamics of the formation and evolution of sedimentary basins in connection with the rise of mantle diapirs based on the methods of mechanical and mathematical modeling. Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region, including Caspian Sea, can be considered as regions of area of eastern part of Alpine belt, which is western part of Alpine-Himalayan belt disposed from Mediterranean sea to Pacific Ocean. Caspian sea crosses from North to South the series of structural zones of East European platform, Scythian-Turan platform and Alpine-Himalayan belt. Pre-Caspian Depression and South Caspian Depression are deep sedimentary basins with thickness of sedimentary cover more than 20 km which have high oil-gas potential and big industrial importance. Formation and evolution of sedimentary basin is the clue for oil-gas generation zones of sedimentary cover, that makes the problem of sedimentary basins geodynamics of great importance one. Geodynamics of relief is defined by deep mantle movements. Mechanical-mathematical model of the lithosphere dynamics gives possibility to link the basin parameters with mantle diaper upwelling. Analysis of geophysical fields gives opportunity to evaluate the asthenosphere upwelling, and elaborated self-conjugated thermo-gravimetric model makes this evaluation reliable and trustworthy one. Geodynamics and evolution history of geological structures determine magmatism, volcanism, seismicity, geothermics, geothermal manifestations, oil-gas potential, natural hazards of region, that is basement for monitoring system creation and construction on fundamental scientific base, forecast and prognosis of natural catastrophes and oil-gas potential researches. **The result** of this work is a quantitative assessment of the rise of the asthenosphere under the sedimentary basin using the example of the Pre-Caspian Depression.

Keywords: sedimentary basins, modeling, geothermy, geodynamics, gravimetry, Caspian depression, Caspian Sea, South Caspian depression, Caucasus region, seismotomography.

For citation: Svalova V. B. Geodynamics and geothermics of Pre-Caspian Depression and eastern segment of Caucasus region. *Geologiya I Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2020. 10 (4): 52 – 69. DOI: 10.46698/VNC.2020.92.72.004.

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”).

Введение
Актуальность и цели исследований

Актуальность исследования формирования и сравнительной характеристики осадочных бассейнов определяется важностью оценки и прогноза нефтегазового потенциала глубоких осадочных структур, в частности, их глубоких горизонтов, не всегда доступных глубокому бурению в поисковых и разведочных целях. Наряду с прикладными вопросами целью исследования являются фундаментальные вопросы теоретической геодинамики формирования и эволюции осадочных бассейнов в связи с подъемом мантийных диапиров на основе методов механико-математического моделирования, а также сравнительная характеристика геолого-геофизических и геодинамических параметров важнейших нефтегазоносных бассейнов, какими являются Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины.

Прикаспийская впадина и восточный сегмент Кавказского региона, включая Каспийское море, могут рассматриваться как регионы окрестности восточной части Альпийского пояса, который в свою очередь является западной частью Альпийско-Гималайского пояса, простирающегося от западной оконечности Средиземного моря до Тихоокеанского побережья.

Каспийское море пересекает с севера на юг серию широтных структурных зон юго-восточной окраины древней докембрийской Восточно-Европейской платфор-

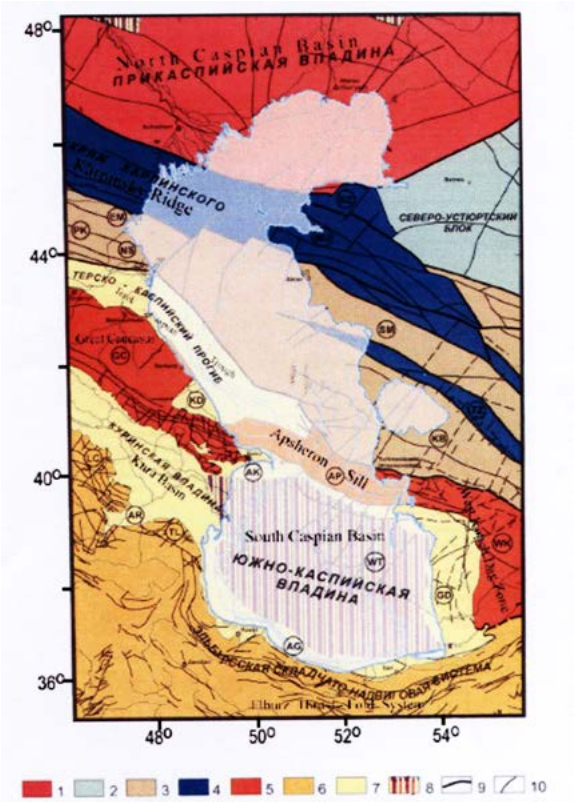

Рис. 1. Тектоническая карта Каспийского моря.
Фундамент платформенных областей (1-4): 1 – раннедокембрийский, 2 – байкальский, 3 – герцинский, 4 – раннекиммерийский. Альпийские складчато-покровные системы (5, 6): 5 – Большой Кавказ и Копетдаг, 6 – Малый Кавказ, Талыш, Эльбурс, 7 – передовые прогибы и впадины, 8 – впадины с корой океанического типа, 9 – разрывные нарушения на границах крупных структур, 10 – важные разрывы. /
Fig. 1. Tectonic map of the Caspian Sea. Foundation platform areas (1-4): 1 – Early Precambrian, 2 – Baikal, 3 – Hercynian, 4 – Early Cimmerian. Alpine fold-cover systems (5, 6): 5 – Greater Caucasus and Kopetdag, 6 – Lesser Caucasus, Talysh, Elburs, 7 – foredeeps and depressions, 8 – depressions with oceanic crust, 9 – faults at the boundaries of large structures, 10 – important breaks.

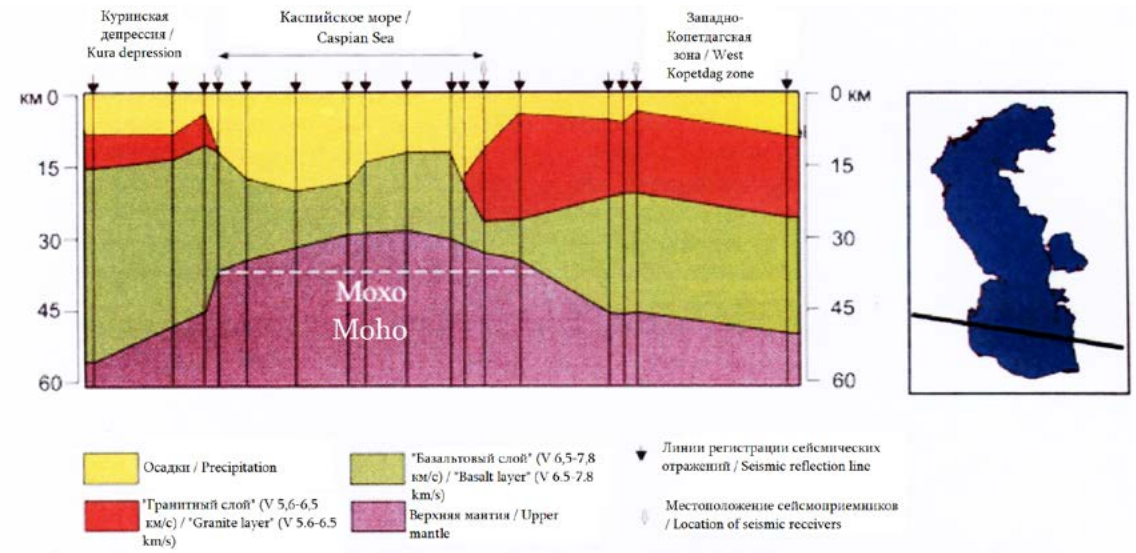

Рис. 2. Геофизический разрез литосферы Южно-Каспийской впадины [Jackson et al., 2002]. /
Fig. 2. Geophysical section of the lithosphere of the South Caspian Basin [Jackson et al., 2002].

мы, молодой эпигерцинской Скифско-Туранской платформы и современного Альпийско-Гималайского орогенного пояса (рис. 1) [Международная тектоническая карта…, 2003].

Прикаспийская и Южно-Каспийская впадины являются глубокими осадочными бассейнами с толщиной осадочного чехла более 20 км, обладающими высоким нефте-газовым потенциалом и большим народно-хозяйственным значением (рис. 2, 4).

В строении впадин наблюдаются общие черты, которые объясняются формированием осадочных бассейнов над поднимающимися мантийными диапирами [Свалова, 2014]. Различия в строении впадин обусловлены различиями в исторических и геолого-геофизических условиях формирования структур, различным временем образования и различным структурным обрамлением [Международная тектоническая карта…, 2003; Хаин, Ломизе, 2005; Хаин, 2005; Тектоника…, 1980; Земная кора…, 1982; Рогожин и др., 2015; Родников и др., 2003; Rodnikov et al., 2001; Грачев, 2000; Царегородцева, Курина, 2020]. И если для Южно-Каспийской впадины ключевым является ее нахождение на восточной оконечности Альпийского пояса, то для Прикаспийской впадины важным определяющим фактором строения и нефтегазоносности является принадлежность к древней платформе (рис. 3).

Так, пониженный тепловой поток Южно-Каспийской впадины находится в ряду понижающегося теплового поля отдельных морских впадин Средиземного моря с запада на восток, что отражает снижение геодинамической активности от центра активизации в районе Тирренского моря к периферии (Левантийская впадина, Черное и Каспийское моря). В то же время повышенный тепловой поток Прикаспийской впадины находится в ряду глубоких впадин на окраинах Русской платформы, включая Тимано-Печорскую и Североморскую впадины [The Global Heat Flow Database…, Моисеенко, Негров, 1993].

Глубинная гравитационная неустойчивость астеносферы проявляется в виде подъема крупномасштабного мантийного плюма, формирующего структуру Альпийского пояса в целом. На фоне общего подъема плюма поднимаются отдельные

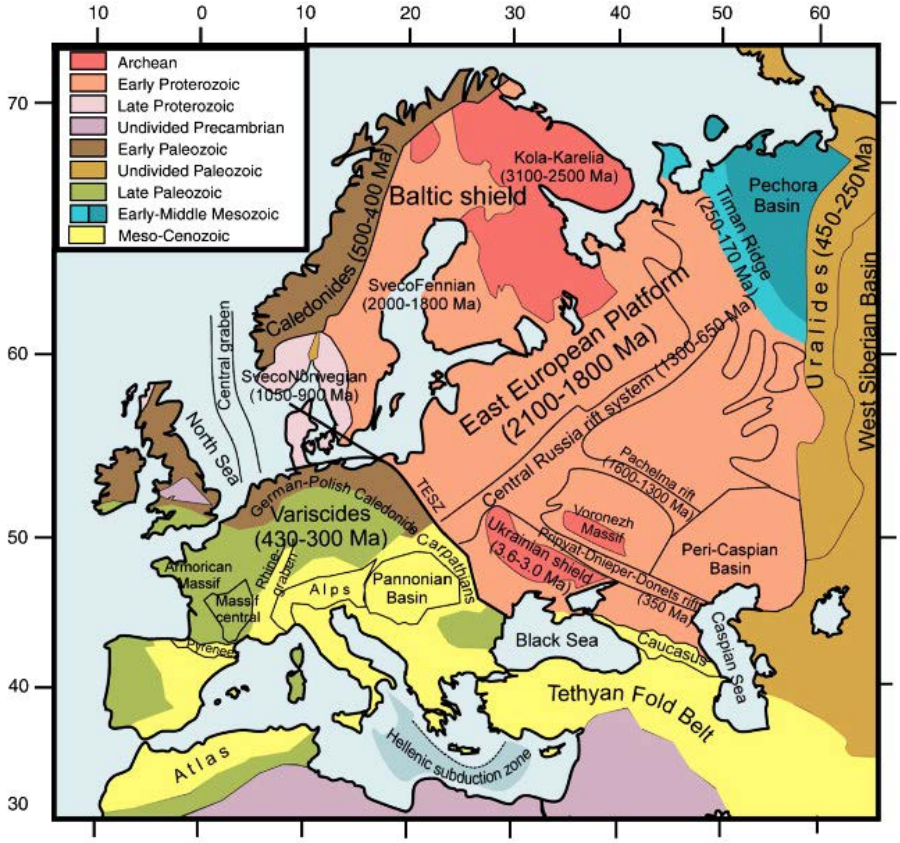

Рис. 3. Тектоническая карта Европы. [Artemieva et al., 2006]. /
Fig. 3. Tectonic map of Europe. [Artemieva et al., 2006].

диапиры, формирующие глубоководные впадины осадочных бассейнов. Проявление гравитационной неустойчивости имеет характерный масштаб расстояний между впадинами, определяемый толщинами слоев осадочного чехла, консолидированной коры, мантийной литосферы и астеносферы, а также механическими свойствами формирующих пород, в частности, плотностью и эффективной вязкостью. Стадии подъема диапиров определяют тепловой поток структуры, а также магматизм, вулканизм и сейсмичность, т. е. геодинамическую активность или тектоно-магматическую активизацию.

Последовательная активизация и подъем диапиров в условиях коллизии литосферных плит и закрытия Альпийского палеоокеана могла формировать сначала Прикаспийскую впадину, затем Средне-Каспийскую, а затем Южно-Каспийскую впадину. Тепло от поднимающегося мантийного диапира могло достичь земной поверхности в Прикаспийской впадине, но еще не достичь в Южно-Каспийской. И это определяет различный тепловой фон в бассейнах, делая его более высоким в Прикаспии, чем в Южном Каспии.

Данные сейсмотомографии подтверждают наличие субдукции плиты Южно-Каспийской впадины под Эльбурс, что также подчеркивает схожесть формирования задуговых морей Альпийского пояса и Южного Каспия [Allen et al., 2002; Jackson et al., 2002; Priestley et al., 1993; Шарков, Свалова, 1989].

Геодинамика и история развития геологических структур определяют магматизм, вулканизм, сейсмичность, геотермические характеристики, геотермальную активность, нефтегазоносность, опасные природные процессы региона, что в свою

очередь является обоснованием создания системы комплексного экологического мониторинга на фундаментальной научной базе, прогноза и предупреждения природных бедствий и катастроф [Добрев и др., 2019], а также поиска полезных ископаемых, включая углеводороды [Гончаров и др., 2015; Милюков и др., 2015; Svalova et al., 2019, 2020; Рогожин и др., 2015; Уломов и др., 2007].

1. Тепловое поле Прикаспийской впадины

Общий региональный температурный фон Прикаспийской впадины увеличивается с севера на юг и с востока на запад. Геотермические исследования Прикаспийской впадины отражены в целом ряде работ [Аксенов и др., 1985; Бочкарева и др., 1973; Геофизические поля…, 1985; Гордиенко, Завгородняя, 1984; Свалова и др., 1993; Соловьев и др., 1991; Мухтаров, 2008; Максимов и др., 1990; Родкин, 2003].

Литолого-физические особенности разреза надсолевых отложений и тектонические неоднородности осадочного чехла, обусловленные мощной толщей соляных пород, определили обширный диапазон изменений величин геотермического градиента в верхних частях разреза (рис. 4, 5, 6. Таб. 1, 2). [Аксенов и др., 1985; Бочкарева и др., 1973; Гордиенко, Завгородняя, 1984; Мухтаров, 2008; Максимов и др., 1990].

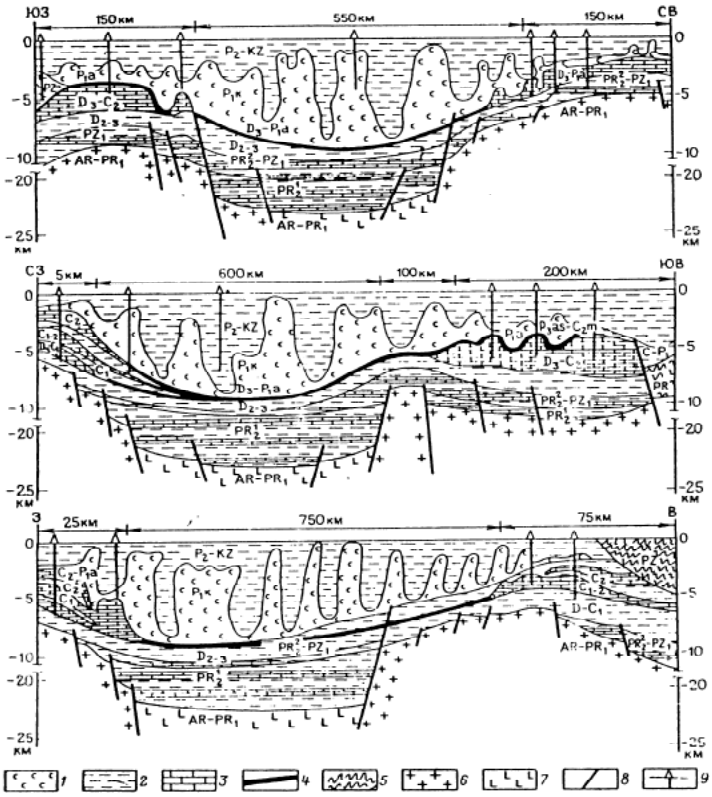

Рис. 4. Геологический разрез Прикаспийской впадины. [Максимов и др., 1990]. Породы: 1 – соль, 2 – терригенные, 3 – карбонаты, 4 – глины, 5 – конденсаты. Комплексы: 6 – граниты, 7 – базальты. 8 – складки, 9 – глубокие скважины. / Fig. 4. Geological section of the Caspian Basin. [Maksimov et al., 1990]. Rocks: 1 – salt, 2 – terrigenous, 3 – carbonates, 4 – clays, 5 – condensates. Complexes: 6 – granites, 7 – basalts. 8 – folds, 9 – deep wells.

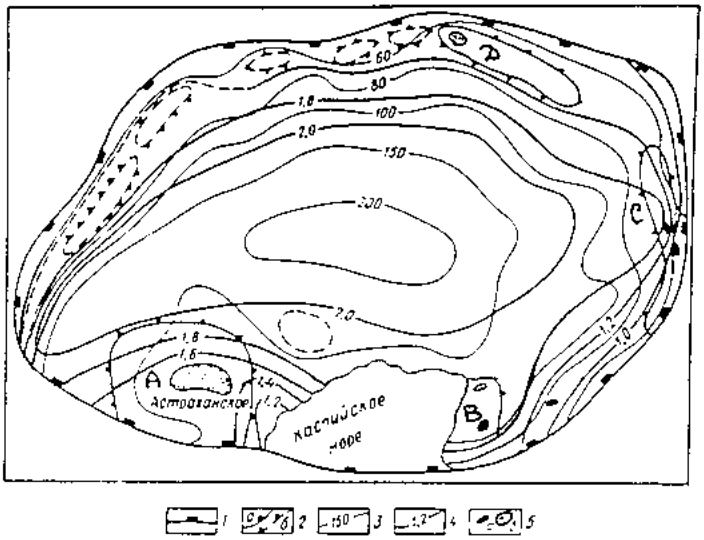

Рис. 5. Схема термобарических условий подсолевых месторождений Прикаспийской впадины [Аксенов и др., 1985].
Границы: 1 – потенциальных нефтегазовых провинций, 2 – потенциальных нефтегазовых зон (а – известных, б – предполагаемых), 3 – геоизотермы на поверхности подсолевых месторождений, 4 – изолинии аномальных коэффициентов давления, 5 – нефтяные (а) и газовые (б) месторождения. Основные нефтегазовые месторождения: А – Астраханское, В – Тенгиз, С – Кенкияк, Д – Карачаганак. /
Fig. 5. Scheme of thermobaric conditions of subsalt deposits of the Caspian basin. [Aksenov et al., 1985]. Boundaries: 1 – potential oil and gas provinces, 2 – potential oil and gas zones (a – known, b – assumed), 3 – geoisotherms on the surface of subsalt deposits, 4 – isolines of anomalous pressure coefficients, 5 – oil (a) and gas (b) deposits. Main oil and gas fields: A – Astrakhanskoye, B – Tengiz, C – Kenkiyak, D – Karachaganak.

В надсолевых отложениях геотермические градиенты изменяются от 1,5 до 3,5°С/100 м, причем повышенные значения ассоциированы с глинистыми отложениями палеогенового и верхнепермского возраста. В эвапоритах кунгурского яруса геотермические градиенты варьируются от 0,32 до 3°С/100 м. Десятикратный разброс в величинах градиентов обусловлен, по-видимому, положением пункта измерения по отношению к рельефу соляных масс. Все повышенные значения теплового потока получены в сводовых частях соляных куполов, где тепловой поток искажен явлениями, связанными с контрастной теплопроводностью. Помимо этого, сама точность оценок невелика. Так, для Аралсорской сверхглубокой скважины известны оценки теплового потока в 38, 49 и 59 мВт/м^2. Реальные значения для центральной части впадины лежат в интервале от 40 до 51 мВт/м^2. В восточной части, в районе Актюбинского Приуралья, неискаженное значение теплового потока составляет 40 мВт/м^2. В тектонически активных зонах Прикаспийской впадины, в пределах ее северо-западного обрамления, тепловой поток повышен и близок к 50 мВт/м^2. Вдоль южного борта протягивается широкая полоса высоких значений теплового потока – в среднем 55 мВт/м^2. Средние значения теплового потока в Прикаспийской впадине равны примерно 52 мВт/м^2.

Эти значения близки к средним значениям теплового потока для Печорской и Североморской впадин, т. е. крупнейшие синеклизы углов платформы на рифейском основании характеризуются специфическими величинами глубинного теплового потока, отличающими их от более древних структур Восточно-Европейской платформы (The Global Heat Flow Database of the International Heat Flow Comission. http://www. heatflow. und. edu/).

Таблица 1 / Table 1

Основные геотермические зоны Прикаспийской впадины /

Main geothermal zones of the cis-Caspian depression

Зона (рис. 5) / Zone (Fig. 5)	T °C на глубине 5 км / T °C at a depth of 5m	∇ T °C /100 м
Кенкияк / Kenkiyak	76-90	1,7-2,0
Каспийская / Caspian	162-186	2,8-3,1
Тенгиз / Tengiz	160-167	2,8-3,2
Астраханская / Astrakhan	124-156	3,0-3,6

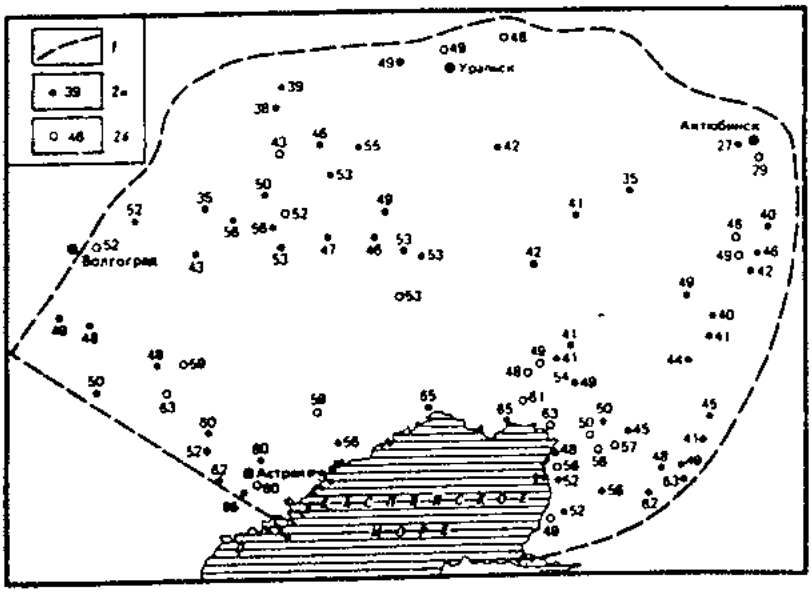

Рис. 6. Тепловой поток Прикаспийской впадины, мВт/м² [Аксенов и др., 1985].
1 – границы Прикаспийской впадины, 2 – точки определения теплового потока:
а – отдельные, б – групповые.
Fig. 6. Heat flow of the Pre-Caspian depression, mW /m² [Aksenov et al., 1985].
1 – boundaries of the Pre-Caspian depression, 2 – points of determination of the heat flow:
a – individual, b – group.

Таблица 2 / Table 2

Распределение температур на глубине 500-1000 м в структурах солевых куполов в восточной и западной частях Прикаспийской впадины. / Distribution of temperatures at a depth of 500-1000 m in the structures of salt domes in the eastern and western parts of the cis-Caspian depression.

Глубина, м / Depth, m	Восток, T °C / East, T °C	Запад, T °C / West, T °C
500	21,2-31,9	23,4-28,4
750	27,0-42,1	37,3-43,0
1000	31,5-52,4	51,4-56,0

2. Гравитационное поле Прикаспийской впадины и ее обрамления

Гравитационное поле Прикаспийской впадины и ее обрамления существенно различно. В сопредельных районах Восточно-Европейской платформы оно характеризуется в целом относительно повышенными, а в Предуральском прогибе – пониженными значениями Dg.

На Восточно-Европейской платформе гравитационные аномалии обусловлены главным образом вещественным составом дорифейского фундамента.

Относительно пониженное гравитационное поле Предуральского краевого прогиба обусловлено большой мощностью (до 12 км и более) отложений осадочного чехла.

Поле силы тяжести Прикаспийской впадины в целом пониженное. В пределах Центральноприкаспийского прогиба в поле Dg фиксируются Аралсорский и Хобдинский региональные максимумы, обусловленные в основном мантийными выступами. Эти максимумы поля силы тяжести разделены аномалией поля Dg, которая характеризуется чередованием относительно повышенных и относительно пониженных значений гравитационного поля и прослеживается в южном направлении в пределы Актюбинско-Астраханской зоны поднятий вплоть до Каспийского моря. Вычисленная кривая гравитационного влияния рельефа поверхности подсолевых отложений по региональным сейсмическим профилям, пересекающим впадину в широтном и меридиональном направлениях, имеет минимальные значения в центральной, наиболее погруженной, части впадины и максимальные – в бортовых ее зонах. Однако в наблюденном гравитационном поле наиболее погруженной центральной части впадины отвечают региональные гравитационные максимумы, а ее бортовым зонам – региональные минимумы или пониженные значения гравитационного поля. Это значит, что региональные аномалии силы тяжести обусловлены более глубокими слоями земной коры и мантии [Аксенов и др., 1985; Грачев, 2000].

3. Методика исследования. Механико-математическая модель формирования и эволюции осадочного бассейна

Анализ всего комплекса геологических и геофизических данных дает основания связать формирование и эволюцию Прикаспийской впадины с подъемом мантийного диапира. [Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002]. Разуплотненная мантия поднимается, формируя на дневной поверхности глубокую депрессию, постепенно заполняющуюся осадками. Термомеханическое моделирование показывает, что в зависимости от динамики подъема диапира на дневной поверхности возможно формирование сводового поднятия, сменяемого формированием глубокой депрессии. [Занемонец (Свалова) и др., 1974; Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002; Свалова, Шарков, 1991, 1992, 2005; Шарков, Свалова, 1989, 1991; Sharkov, Svalova, 2011; Свалова, 2012, 2013, 2014; Гончаров, Свалова, 2013; Гончаров и др., 2015]. При достаточной мантийной активности возможна дальнейшая смена режима прогибания на режим формирования сводового поднятия и даже излияния базальтов. Общая картина движений может осложняться наличием фоновых горизонтальных движений. При аналитическом решении задачи удается найти критические параметры, связывающие динамику мантийных движений с эволюцией рельефа поверхности [Svalova, 1992, 1993, 1997, 2002].

При исчерпании энергии мантийный диапир кристаллизуется, начиная с верхней части, наиболее высоко поднявшейся в сравнительно холодные слои литосферы. Уплотненная верхняя часть диапира может дать региональный гравитационный максимум, наблюдаемый в центре депрессии.

4. Термогравиметрическая модель осадочного бассейна

Для определения толщины литосферы Прикаспийской впадины и окружающих регионов предлагается использовать комплексную самосогласованную термогравиметрическую модель многослойной сплошной среды, описывающей в упрощенном виде строение осадочного чехла, консолидированной коры и верхней мантии геологической структуры.

Пусть геотермическое поле для установившегося процесса описывается стационарным уравнением теплопроводности с учетом только кондуктивного теплопереноса. На границах слоев выполняются условия непрерывности температур и тепловых потоков. Дневная поверхность характеризуется температурой 0 °С. Граница литосфера-астеносфера отождествляется с температурой плавления базальтов 1200 °С.

Итак:

$\partial^2 T_i/\partial z^2 = - Q_i /k_i$,

$T^* = 0$ °С, $T_* = 1200$ °С,

$[T_i] = 0$, $[k_i \partial T_i/\partial z] = 0$,

где k_i – средняя теплопроводность i-того слоя, Q_i – теплогенерация, T (x, z) – температура, x – горизонтальная координата, z – вертикальная координата.

Тогда для поверхностного теплового потока можно получить следующее выражение:

$$q^*(x) = -\frac{T_* + \sum_2^n h_i^2 Q_i / 2k_i + \sum_{i=2}^{n-1} h_i / k_i \sum_{j=i+1}^{n} h_j Q_j}{\sum_2^n h_i / k_i},$$

где h_i (x) = $z_i - z_{i-1}$ – толщина i-того слоя, n – число слоев, z_1 (x) – граница литосфера-астеносфера, z_2 (x) – граница Мохо, z_3 (x) – поверхность фундамента, z_4 (x) – дневная поверхность (для нерасчлененного осадочного чехла в упрощенной модели) (рис. 1).

Т. к. радиоактивные элементы сосредоточены в основном в коре, то теплогенерацию в мантийной литосфере можно считать равной нулю Q_2=0. Тогда для толщины мантийной литосферы получим выражение:

$$h_2(x) = -\frac{T_* + q^* \sum_3^n \frac{h_i}{k_i} + \sum_3^n \frac{h_i^2 Q_i}{2k_i} + \sum_{i=3}^{n-1} \frac{h_i}{k_i} \sum_{j=i+1}^{n} h_j Q_j}{1/k_2 (q^* + \sum_3^n h_i Q_i)}$$

Таким образом, зная распределение поверхностного теплового потока q* (x), значения теплофизических характеристик слоев (теплопроводность и теплогенерация), а также глубину залегания поверхности фундамента и границы Мохо, можно определить глубину залегания астеносферного слоя как в центре депрессии, так и в сопряженных областях Восточно-Европейской платформы.

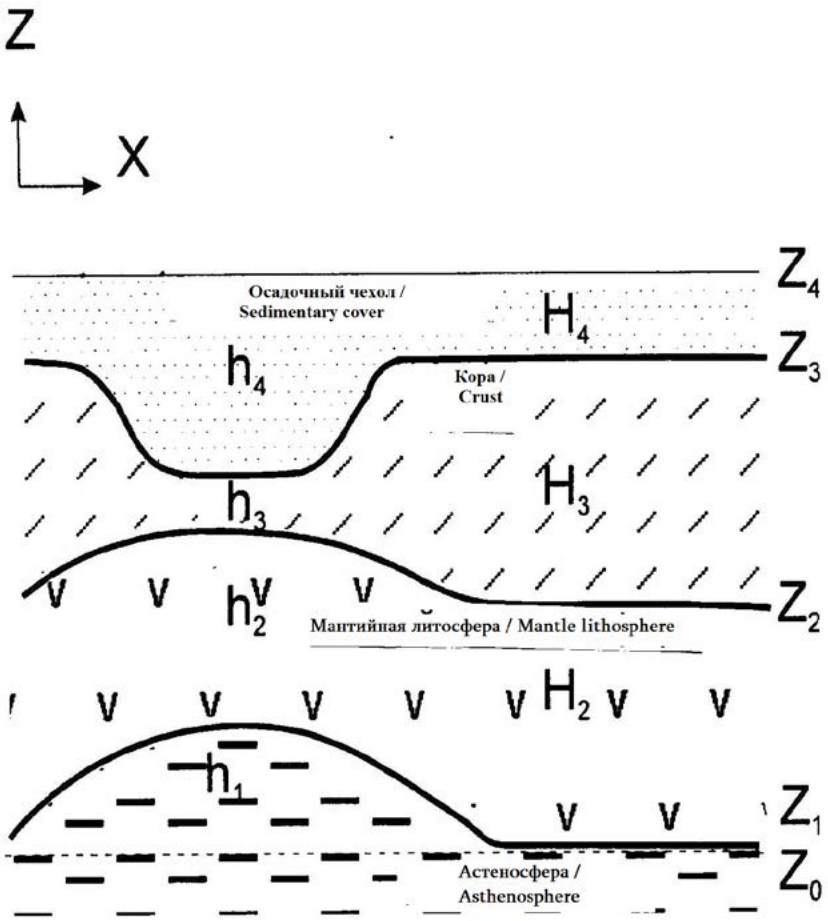

Рис. 7. Схематический разрез литосферы Прикаспийской впадины и прилегающей части Восточно-Европейской платформы.
Z_0 – уровень изостатической компенсации в астеносфере, Z_1 – граница литосфера-астеносфера, Z_2- граница Мохо, Z_3 – поверхность фундамента, Z_4 – дневная поверхность.
Fig. 7. Schematic section of the lithosphere of the Caspian depression and the adjacent part East European Platform.
$Z_0 0$ – level of isostatic compensation in the asthenosphere, Z_1 – lithosphere-asthenosphere boundary, Z_2 – Moho boundary, Z_3 – basement surface, Z_4 – day surface.

Производя расчеты для характерных значений теплофизических характеристик и известных из геофизики границ, можно получить толщину литосферы в центре впадины порядка 110 км и для платформы около 180 км, т. е. подъем астеносферы под впадиной составляет около 70 км по сравнению с окружающими регионами. При расчетах использовались следующие характерные значения параметров: толщина осадочного чехла в центре впадины 24 км, на платформе 3 км. Толщина консолидированной коры 12 и 40 км, соответственно. Теплогенерация базальтов 0,5 мкВт/м^3, гранитов 2 мкВт/м^3, осадков 1 мкВт/м^3. Коэффициент теплопроводности гранитов и базальтов 2,5 Вт/ (м К), терригенных осадочных пород 1,7-2,1 Вт/ (м К), соли – 5,4-6,6 Вт/ (м К), т. е. среднее для осадочного чехла 3 Вт/ (м К). T = 1200 ^{o}C = 1473°K, q* = 50 мВт/м^2 для впадины и q* = 40 мВт/м^2 для платформы.

Рассмотрим теперь гравиметрическую модель литосферы. Будем считать Прикаспийскую впадину и Восточно-Европейскую платформу изостатически скомпенсированными структурами с уровнем компенсации в астеносфере. Тогда будем иметь следующую систему уравнений для впадины и платформы:

$$\begin{cases} \sum h_i \rho_i = \sum H_i \rho_i, \\ \sum h_i = \sum H_i. \end{cases}$$

Здесь r_i – плотности слоев. Первое уравнение характеризует равенство давлений на уровне изостатической компенсации для многослойной литосферы впадины (h_i) и платформы (H_i). Второе уравнение содержит предположение, что уровень изостатической компенсации для впадины и платформы совпадает. В частности, для упрощенной модели, состоящей из слоя астеносферы (h_1), мантийной литосферы (h_2, H_2), консолидированной коры (h_3, H_3) и осадочного чехла (h_4, H_4) можно получить величину выступа астеносферы под впадиной по отношению к уровню астеносферы под платформой h_1 и разницу толщин мантийной литосферы для впадины и платформы $H_2 - h_2$:

$$h_1 = \frac{(\rho_4 - \rho_2)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_1)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1},$$

$$H_2 - h_2 = \frac{(\rho_4 - \rho_1)(h_4 - H_4) + (\rho_3 - \rho_1)(h_3 - H_3)}{\rho_2 - \rho_1}.$$

Для характерных значений плотности r_4 = 2,3 г/см^3 (осадочный чехол), r_3 = 2,7 (гранит) – 2,9 г/см^3 (базальт), r_2 = 3,3 г/см^3 (литосфера), r_1 = 3,4 г/см^3 (астеносфера) и толщин слоев из предыдущей геотермической модели получаем h_1 @ 70 км, $H_2 - h_2$ @ 60 км. Т. е. величина астеносферного выступа под впадиной из гравиметрической модели близка к значению, полученному из геотермической модели, что говорит о корректности моделей. То же самое можно сказать об утолщении мантийной литосферы под платформой. Одни и те же величины определяются двумя независимыми методами, что повышает надежность результата. В то же время, только геотермическая модель дает абсолютные значения толщины литосферы, а гравиметрическая только относительные изменения. Обе модели допускают дальнейшее уточнение и деталировку, увеличение числа слоев, усложнение теплофизических и геофизических характеристик слоев, учет региональных гравитационных и геотермических аномалий.

Результаты исследования

Анализ геолого-геофизических данных показывает, что пониженный тепловой поток Южно-Каспийской впадины находится в ряду понижающегося теплового поля отдельных морских впадин Средиземного моря с запада на восток, что отражает снижение геодинамической активности от центра активизации в районе Тирренского моря к периферии (Левантийская впадина, Черное и Каспийское моря). В то же время повышенный тепловой поток Прикаспийской впадины находится в ряду глубоких впадин на окраинах Русской платформы, включая Тимано-Печорскую и Североморскую впадины. Последовательная активизация и подъем диапиров в условиях коллизии литосферных плит и закрытия Альпийского палеоокеана могла формировать сначала Прикаспийскую впадину, затем Средне-Каспийскую, а затем Южно-Каспийскую впадину. Тепло от поднимающегося мантийного диапира могло достичь земной поверхности в Прикаспийской впадине, но еще не достичь в Южно-Каспийской. И это определяет различный тепловой фон в бассейнах, делая его более высоким в Прикаспии, чем в Южном Каспии.

Данные сейсмотомографии подтверждают наличие субдукции плиты Южно-Каспийской впадины под Эльбурс, что также подчеркивает схожесть формирования задуговых морей Альпийского пояса и Южного Каспия.

В строении Прикаспийской и Южно-Каспийской впадин наблюдаются общие черты, которые объясняются формированием осадочных бассейнов над поднимающимися мантийными диапирами. Различия в строении впадин обусловлены различиями в исторических и геолого-геофизических условиях формирования структур, различным временем образования и различным структурным обрамлением. И если для Южно-Каспийской впадины ключевым является ее нахождение на восточной оконечности Альпийского пояса, то для Прикаспийской впадины важным определяющим фактором строения и нефтегазоносности является принадлежность к древней платформе.

Заключение

Разработана самосогласованная термогравиметрическая модель литосферы и астеносферы осадочного бассейна, позволяющая количественно оценить подъем астеносферного диапира под геологической структурой. Модель исследуется на примере геофизических полей и геологических характеристик Прикаспийской впадины. Разработанная модель допускает и предполагает дальнейшее уточнение и совершенствование. Результаты моделирования были подтверждены сейсмическими исследованиями [Gee, Zeyen, 1996] и результатами работ по сейсмотомографии [Artemieva et al., 2006; Koulakov et al., 2012].

Литература

1. Аксенов А. А., Гончаренко Б. Д., Калинко М. К. Нефтегазовый потенциал подсолевых отложений. – М.: Наука, 1985. – 205 с.

2. Бочкарева В. А., Сыдыков Ж. С., Джангирьянц Д. А. Подземные воды Прикаспийской впадины и ее восточных обрамлений. – Алма-Ата: Наука, 1973. – 228 с.

3. Геофизические поля и строение земной коры Закавказья. / Отв. ред. Белоусов В. В., Балавадзе Б. К. – М.: Наука, 1985. – 174 с.

4. Гончаров М. А., Свалова В. Б. Мантийный диапиризм как причина формирования новообразованных впадин Средиземноморья и окружающих центробежно-вергентных складчато-покровных орогенов. // Материалы 45 Тектонического совещания «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». – М.: ГЕОС, 2013. – С. 54-58.

5. Гончаров М. А., Короновский Н. В., Свалова В. Б., Разницин Ю. Н. 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.

6. Гордиенко В. В., Завгородняя О. В. Тепловой поток Прикаспийской впадины. // Геотермические исследования в Средней Азии и Казахстане. – М.: Наука, 1984. – С. 251-255.

7. Грачев А. Ф. Южно-Каспийская впадина. // Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии. – М.: Изд-во «Пробел», 2000. – С. 217-224.

8. Добрев Н. Б., Иванов П. Г., Свалова В. Б., Заалишвили В. Б., Дзеранов Б. В. Опасные экзогенные процессы в горных районах Северного Кавказа и Болгарии. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2019. – № 4 (18). Т. 4. – С. 5-14.

9. Занемонец (Свалова) В. Б., Котелкин В. Д., Мясников В. П. О динамике литосферных движений. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1974. – № 4 – С. 43-54.

10. Земная кора и история развития Средиземного моря. / Отв. ред. Муратов МВ. – М.: Наука, 1982. – 208 с.

11. Максимов С. П., Дикенштейн Г. Н., Золотов А. Н., Капустин И. Н., Кирюхин Л. Г., Размышляев А. А. Геология нефти и газа Восточно-Европейской платформы. – М.: Недра, 1990. – 274 с.

12. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Объяснительная записка. / Отв. ред. Е. В. Хаин и В. И. Богданов Н. А. – М.: Научный Мир, 2003. – 120 с.

13. Международная тектоническая карта Каспийского моря и его обрамления. Ред.: В. Е. Хаин, Н. А. Богданов. Институт литосферы окраинных и внутренних морей РАН, 2003.

14. 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.

15. 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.

16. Мухтаров А. Ш. Тепловой поток восточной части Кавказской зоны коллизии. // Сб. научных трудов «Тепловое поле Земли и методы его изучения». – М.: РГГРУ, 2008. – С. 155-160.

17. Рогожин Е. А., Горбатиков А. В., Степанова М. Ю., Овсюченко 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.

18. Родкин М. В. Флюидогеодинамическая модель литосферы Южного Каспия. // Геотектоника. – 2003. – № 1. – С. 43-53.

19. 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.

20. Свалова В. Б. Термомеханика литосферы, нефтегазоносность и решение обратной задачи геодинамики. // Мониторинг. Наука и технологии. – 2012. – № 3 (12). – С. 21-24.

21. Свалова В. Б. Термогравиметрическая модель осадочного бассейна. Пример Прикаспийской впадины. /Материалы 45 Тектонического совещания «Геологическая история, возможные механизмы и проблемы формирования впадин с субокеанической и аномально тонкой корой в провинциях с континентальной литосферой». – М.: ГЕОС, 2013. – С. 193-198.

22. 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.

23. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Формирование и эволюция задуговых бассейнов Альпийского и Тихоокеанского поясов (сравнительный анализ). // Тихоокеанская геология. – 1991. – № 5. – С. 49-63.

24. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Геодинамика Байкальской рифтовой зоны (петрологические и геомеханические аспекты). // Геология и геофизика. – 1992. – № 5. – С. 21-30.

25. Свалова В. Б., Шарков Е. В. Позднекайнозойская геодинамика Альпийского складчатого пояса в связи с формированием внутриконтинентальных морей (петролого-геомеханические аспекты). // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2005. – № 1. – С. 3-11.

26. Свалова В. Б., Соловьев Б. А., Иванова Т. Д. Геодинамика и геотермия Прикаспийской впадины.// Геотермия сейсмичных и асейсмичных зон. – М.: Наука, 1993. – С. 119-132.

27. Соловьев Б. А., Свалова В. Б., Иванова Т. Д. Термомеханическая модель формирования и эволюции осадочного бассейна на примере Прикаспийской впадины. // Теоретиче-

ские и экспериментальные исследования геотермического режима акваторий. – М.: Наука, 1991. – С. 93-104.

28. Тектоника Средиземноморского пояса. / Отв. ред. Муратов М. В., Яншин А. Л. – М.: Наука, 1980. – 244 с.

29. 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.

30. Хаин В. Е. Проблема происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины и ее возможные решения. // Геотектоник. –2005. – № 1. – С. 40-44.

31. Хаин В. Е., Ломизе М. Г. Геотектоника с основами геодинамики. – М.: КДУ, 2005. – 560 с.

32. 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.

33. Шарков Е. В., Свалова В. Б. О возможности вовлечения континентальной литосферы в процесс субдукции при задуговом спрединге. // Изв. АН СССР, сер. геол. – 1991. – № 12. – С. 118-131.

34. Царегородцева Т. К., Курина Е. Е. Проблемы границ, происхождения и возраста Южно-Каспийской впадины. // Материалы совещания «Фундаментальные проблемы тектоники и геодинамики». Т. 2. – М.: ГЕОС, 2020. – С. 386-391.

35. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M., Anderson L. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quarternary subsidence in the South Caspian basin. // Geology. – 2002. – Vol. 30. No. 9. – pp. 775-778.

36. Artemieva I. M., Thybo H., Kaban M. K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga. From: Gee DG, Stephenson RA (eds). // European Lithosphere Dynamics. Geological Society. – London, Memoirs. – 2006. Vol. 32. – pp. 11-41.

37. Gee D. G., Zeyen H. J. (editors). EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. // Uppsala University. – 1996. – 138 pp.

38. Jackson J., Priesley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. // Geoph. J. Int. – 2002. – Vol. 148. – pp. 214-245.

39. 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.

40. Priestley K, Cipar J. J. Central Siberian, upper mantle structure and the structure of the Caspien basin. // Phillips Laboratory Enviromental Research Paper. – 1993. – No. 1125. – pp. 86-92.

41. 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.

42. 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. – pp. 18-38.

43. Svalova V. B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. // Sciences de la Terre, Ser. Inf. – 1992. – No. 31. – pp. 201-208.

44. Svalova V. B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. // Geoinformatics. – 1993. – Vol. 4 (3). – pp. 153-160.

45. Svalova V. B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. // Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG'97, Barcelona, Spain. – 1997. – Part 2. – pp. 1049-1055.

46. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth's deep and surface structures interaction. // Proceedings of International Conference IAMG, Berlin. – 2002. – 5 p.

47. 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). – pp. 109-127.

48. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Ivanov P. Engineering and Technical Methods for Landslide Risk Management and Reduction. // Sustainable Development of Mountaim territories. – 2020. – T. 12. No. 1 (43). – pp. 162-170.

References

1. Aksenov A. A., Goncharenko B. D., Kalinko M. K. Oil and gas potential of subsalt deposits. Moscow, Nauka, 1985. 205 p. (In Russ.)

2. Bochkareva V. A., SydykovZh. S., Dzhangir'yants D. A. Groundwaters of the Caspian Basin and its eastern framing. Alma-Ata, Nauka, 1973. 228 p. (In Russ.)

3. Belousov V. V., Balavadze B. K. Geophysical fields and the structure of the earth's crust in Transcaucasia. Moscow, Nauka, 1985. 174 p. (In Russ.)

4. Goncharov M. A., Svalova V. B. Mantle diapirism as the cause of the formation of newly formed depressions in the Mediterranean and the surrounding centrifugal-vergent folded-coverorogens. In: Proceedings of the 45th Tectonic Meeting "Geological history, possible mechanisms and problems of formation of depressions with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere". Moscow. GEOS, 2013. pp. 54-58. (In Russ.)

5. Goncharov M. A., Koronovskii N. V., Svalova V. B., Raznitsin Yu. N. Contribution of mantle diapirism to the formation of newly formed depressions in the Mediterranean and the Caribbean and the surrounding centrifugal-vergentfolded-coverorogens. Geotectonics, 2015. No. 6. pp. 80-93. (In Russ.)

6. Gordienko V. V., Zavgorodnyaya O. V. Heat flow of the Caspian Basin. Geothermal research in Central Asia and Kazakhstan. Moscow, Nauka, 1984. pp. 251-255. (In Russ.)

7. Grachev A. F. South Caspian depression. The latest tectonics, geodynamics and seismicity of Northern Eurasia. Moscow, Publishing house "Probel", 2000. pp. 217-224. (In Russ.)

8. Dobrev N. B., Ivanov P. G., Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Dzeranov B. V. Dangerous exogenous processes in the mountainous regions of the North Caucasus and Bulgaria. Grozny Natural Science Bulletin, 2019. No. 4 (18). Vol. 4. pp. 5-14. (In Russ.)

9. Zanemonets (Svalova) V. B., Kotelkin V. D., Myasnikov V. P. On the dynamics of lithospheric movements. Izv. Academy of Sciences of the USSR. Physics of the Earth, 1974. No. 4. pp. 43-54. (In Russ.)

10. Muratov M. V. Earth's crust and evolution of the Mediterranean Sea. Moscow. Nauka, 1982. 208 p. (In Russ.)

11. Maksimov S. P., Dikenshtein G. N., Zolotov A. N., Kapustin I. N., Kiryukhin L. G., Razmyshlyaev A. A. Oil and gas geology of the East European platform. Moscow. Nedra, 1990. 274 p. (In Russ.)

12. Khain E. V., Bogdanov V. I. International tectonic map of the Caspian Sea and its framing. Explanatory note. Moscow. Nauchnyi Mir, 2003. 120 p. (In Russ.)

13. Khain E. V., Bogdanov V. I. International tectonic map of the Caspian Sea and its framing. Institute of Lithosphere of Marginal and Inland Seas, Russian Academy of Sciences, 2003. (In Russ.)

14. Milyukov V. K., Mironov A. P., Rogozhin E. A., Steblov G. M. Estimates of the velocities of modern movements in the North Caucasus from GPS observations. Geotectonics, 2015. No. 3. pp. 56-65. (In Russ.)

15. Moiseenko U. I., Negrov O. B. Geothermal conditions of the North Caucasian seismic zone. In the book: Geothermy of seismic and aseismic zones. Moscow. Nauka, 1993. pp. 32-40. (In Russ.)

16. Mukhtarov A. Sh. Heat flow in the eastern part of the Caucasian collision zone. In: Proceedings “Thermal field of the Earth and methods of its study”. Moscow. RGGRU, 2008. pp. 155-160. (In Russ.)

17. Rogozhin E. A., Gorbatikov A. V., Stepanova M. Yu., Ovsyuchenko A. N., Andreeva N. V., Kharazova Yu. V. Structure and modern geodynamics of the Greater Caucasus meganticlinorium in the light of new data on the deep structure. Geotectonics, 2015. No. 2. pp. 36-49. (In Russ.)

18. Rodkin M. V. Fluidogeodynamic model of the lithosphere of the South Caspian. Geotectonics. 2003. No. 1. pp. 43-53. (In Russ.)

19. Rodnikov A. G., Sergeeva N. A., Zabarinskaya L. P., Rodkin M. V. Features of the structure of the lithosphere of sedimentary basins of marginal and inland seas. Geophysics of the XXI century: 2002. Moscow. Nauchnyi Mir, 2003. pp. 125-135. (In Russ.)

20. Svalova V. B. Thermomechanics of the lithosphere, oil and gas content and the solution of the inverse problem of geodynamics. Monitoring. Science and technology, 2012. No. 3 (12). pp. 21-24. (In Russ.)

21. Svalova V. B. Thermogravimetric model of a sedimentary basin. An example of the Caspian Basin. In: Proceedings of the 45th Tectonic Meeting “Geological history, possible mechanisms and problems of the formation of depressions with suboceanic and anomalously thin crust in provinces with continental lithosphere”. Moscow. GEOS, 2013. pp. 193-198. (In Russ.)

22. 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). pp. 38-42. (In Russ.)

23. Svalova V. B., Sharkov E. V. Formation and evolution of back-arc basins of the Alpine and Pacific belts (comparative analysis). Pacific Geology, 1991. No. 5. pp. 49-63. (In Russ.)

24. Svalova V. B., Sharkov E. V. Geodynamics of the Baikal rift zone (petrological and geomechanical aspects). Geology and Geophysics, 1992. No. 5. pp. 21-30. (In Russ.)

25. Svalova V. B., Sharkov E. V. Late Cenozoic geodynamics of the Alpine fold belt in connection with the formation of inland seas (petrological and geomechanical aspects). IzvestiyaVUZov. Geology and exploration, 2005. No. 1. pp. 3-11. (In Russ.)

26. Svalova V. B., Solov’ev B. A., Ivanova T. D. Geodynamics and geothermics of the Caspian basin. Geothermics of seismic and aseismic zones. Moscow. Nauka, 1993. pp. 119-132. (In Russ.)

27. Solov’ev B. A., Svalova V. B., Ivanova T. D. Thermomechanical model of the formation and evolution of the sedimentary basin on the example of the Caspian Basin. Theoretical and experimental studies of the geothermal regime of water areas. Moscow. Nauka, 1991. pp. 93-104. (In Russ.)

28. Muratov M. V., Yanshin A. L. Tectonics of the Mediterranean belt. Moscow. Nauka, 1980. 244 p. (In Russ.)

29. Ulomov V. I., Danilova T. I., Medvedeva N. S., Polyakova T. P., Shumilina L. S. On the assessment of seismic hazard in the North Caucasus. Izvestiya, Physics of the Solid Earth, 2007. No. 7. pp. 31-45. (In Russ.)

30. Khain V. E. Problem of the origin and age of the South Caspian basin and its possible solutions. Geotectonics, 2005. No. 1. pp. 40-44. (In Russ.)

31. Khain V. E., Lomize M. G. Geotectonics with the basics of geodynamics. Moscow. KDU, 2005. 560 p. (In Russ.)

32. Sharkov E. V., Svalova V. B. Inland seas as a result of back-arc spreading during continental plate collisions. Reports of the USSR Academy of Sciences, 1989. Vol. 308. No. 3. pp. 685-688. (In Russ.)

33. Sharkov E. V., Svalova V. B. On the possibility of involving the continental lithosphere in the subduction process during back-arc spreading. Izv. USSR Academy of Sciences, ser. Geol., 1991. No. 12. pp. 118-131. (In Russ.)

34. Tsaregorodtseva T. K., Kurina E. E. Problems of boundaries, origin and age of the South Caspian basin. In: Proceedings of the meeting “Fundamental problems of tectonics and geodynamics”. Vol. 2. Moscow. GEOS, 2020. pp. 386-391. (In Russ.)

35. Allen M. B., Jones S., Ismail-Zadeh A., Simmons M., Anderson L. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quarternary subsidence in the South Caspian basin. Geology, 2002. Vol. 30. No. 9. pp. 775-778.

36. Artemieva I. M., Thybo H., Kaban M. K. Deep Europe today: geophysical synthesis of the upper mantle structure and lithospheric processes over 3.5 Ga. From: Gee DG, Stephenson RA. European Lithosphere Dynamics. Geological Society. London. Memoirs, 2006. Vol. 32. pp. 11-41.

37. Gee D. G., Zeyen H. J. EUROPROBE 1996 – Lithosphere Dynamics: Origin and Evolution of Continents. Uppsala University, 1996. 138 pp.

38. Jackson J., Priesley K., Allen M., Berberian M. Active tectonics of the South Caspian Basin. Geoph. J. Int., 2002. Vol. 148. pp. 214-245.

39. 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.

40. Priestley K, Cipar J. J. Central Siberian, upper mantle structure and the structure of the Caspien basin. Phillips Laboratory Enviromental Research Paper, 1993. No. 1125. pp. 86-92.

41. 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.

42. 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. pp. 18-38.

43. Svalova V. B. Mechanical-mathematical models of the formation and evolution of sedimentary basins. Sciences de la Terre, Ser. Inf., 1992. No. 31. pp. 201-208.

44. Svalova V. B. Mechanical-mathematical simulation of geological structures evolution. Geoinformatics, 1993. Vol. 4 (3). pp. 153-160.

45. Svalova V. B. Thermomechanical modeling of geological structures formation and evolution on the base of geological-geophysical data. In: Proceedings of the Third Annual Conference of the International Association for Mathematical Geology IAMG’97, Barcelona, Spain, 1997. Part 2. pp. 1049-1055.

46. Svalova V. Mechanical-mathematical modeling for the Earth’s deep and surface structures interaction. In: Proceedings of International Conference IAMG, Berlin, 2002. 5 p.

47. 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). pp. 109-127.

48. Svalova V. B., Zaalishvili V. B., Ganapathy G. P., Ivanov P. Engineering and Technical Methods for Landslide Risk Management and Reduction. Sustainable Development of Mountaim territories, 2020. Vol. 12. No. 1 (43). pp. 162-170.