GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS
Published by the Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences

RECENT GEODYNAMICS

2025 VOLUME 16 ISSUE 6 ARTICLE 0866

ISSN 2078-502X

DOI: 10.5800/GT-2025-16-6-0866

DEEP STRUCTURE OF THE SCYTHIAN-URAL SEISMOGENERATING ZONE

V.A. Ogadzhanov

Saratov State University, 83 Astrahanskaya St, Saratov 410012, Russia

ABSTRACT. The Scythian-Ural seismogenerating zone is associated with neoseismic dislocations trending northeast similarly to the Cyprus-Caucasus neoseismic left-lateral shear belt. This zone exhibits the occurrences of seismicity. To assess the conditions for the occurrence of seismic events within the Scythian-Ural zone it is necessary to know its deep structural features. Accordingly, the purpose of the present study was to investigate the deep structure of earthquake source zones based on the analysis and generalization of all geophysical data available. Based on the integrated geophysical data, there have been determined the deep structural features of the Scythian-Ural neoseismic dislocation zone. It is shown that the stress-strain state of the Earth's crust and mantle within this zone is regionally caused by the horizontal compression forces of the Caucasus and the Urals folded systems, which led to the formation of a system of dislocations trending northeast from the Scythian Plate to the Urals folded system. Within the Scythian-Ural neoseismic dislocation zone, there have been identified heterogeneities caused by the decompaction of the Earth's crust and mantle. The dynamics of decompacted rock complexes in local areas was formed under a combined effect of horizontal compression forces and tectonic dislocations, with the latter inherited from the lower crust and upper mantle. These dislocations are associated with source zones of strong earthquakes with a magnitude of 5 or higher. In the future, the results of the research can be used to identify potential strong earthquake sources within the studied areas.

KEYWORDS: geophysical methods; deep structure; earthquake; neoseismic dislocations; decompaction; seismic survey

FINDING: The study was carried out on the research topic "Seismic study of transcontinental faults in the areas of oil and gas fields and underground gas storage".

EDN: SGJYAV

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Victor A. Ogadzhanov, ozhva@mail.ru

Received: March 28, 2025
Revised: August 26, 2025
Accepted: September 12, 2025

FOR CITATION: Ogadzhanov V.A., 2025. Deep Structure of the Scythian-Ural Seismogenerating Zone. Geodynamics & Tectonophysics 16 (6), 0866. doi:10.5800/GT-2025-16-6-0866

© Ogadzhanov V. A., 2025

ГЛУБИННОЕ СТРОЕНИЕ СКИФСКО-УРАЛЬСКОЙ ЗОНЫ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ СТРУКТУР

В.А. Огаджанов

Саратовский национальный исследовательский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского, 410012, Саратов, ул. Астраханская, 83, Россия

АННОТАЦИЯ. Скифско-Уральская зона сейсмогенерирующих структур связана с новейшими дислокациями, которые простираются в северо-восточном направлении аналогично Кипро-Кавказскому поясу новейших левых сдвигов. В пределах этой зоны отмечены проявления сейсмичности. Для оценки условий возникновения сейсмичности в пределах Скифско-Уральской зоны необходимо знать особенности ее глубинного строения. Исходя из этого целью настоящих исследований являлось изучение глубинного строения очаговых зон землетрясений на основе анализа и обобщения всех имеющихся геофизических данных. По данным комплексных геофизических исследований определены особенности глубинного строения Скифско-Уральской зоны новейших дислокаций. Показано, что в региональном плане напряженно-деформированное состояние земной коры и мантии в пределах этой зоны обусловлено силами горизонтального сжатия складчатых областей Кавказа и Урала, под воздействием которых возникла система дислокаций северо-восточного направления от Скифской плиты до складчатого сооружения Урала. В пределах Скифско-Уральской зоны новейших дислокаций выделены неоднородности, обусловленные разуплотнением земной коры и мантии. Динамику разуплотненных комплексов горных пород на локальных участках в совокупности с силами горизонтального сжатия сформировали тектонические дислокации, унаследованные от низов земной коры и верхней мантии. С этими дислокациями связаны очаговые зоны сильных землетрясений с магнитудой 5 и выше. В дальнейшем результаты проведенных исследований могут быть использованы для выделения потенциальных очагов возникновения сильных землетрясений в пределах исследуемых территорий.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: геофизические методы; глубинное строение; землетрясение; новейшие дислокации; разуплотнение; сейсморазведка

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование проведено в рамках темы НИР «Исследование сейсмичности сквозных трансконтинентальных разломов в районах расположения нефтегазовых месторождений и подземных хранилищ газа».

1. ВВЕДЕНИЕ

Движение Аравийской плиты в северо-северо-восточном направлении формирует в пределах Кавказско-Восточноанатолийского мегаблока альпийской складчатости деформации сжатия. Эти деформации, видимо, достигли своих максимальных значений в северо-западной части фронта сжатия, а именно на границе между эпигерцинской Скифской плитой и Восточно-Европейской зоной докембрийской складчатости. По направлению движения Аравийской плиты и Кавказско-Восточноанатолийского мегаблока в области альпийской складчатости сформировались деформации левостороннего сдвига, имеющие субмеридиональное и северо-восточное направление (рис. 1). В пределах областей герцинской и докембрийской складчатости также возникли дислокации северо-восточного направления [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004], подобные Шалкар-Аксайскому левостороннему сдвигу позднекайкозойской активизации (рис. 1).

Под воздействием давления Аравийской плиты на Кавказско-Восточноанатолийский мегаблок в его пределах возникли сильные землетрясения: Красноводское 08.07.1895 г., Спитакское 07.12.1988 г., Каспийские 25.11. 2000 г., Балханское 06.12.2000 г., в Восточной Турции 06.02. 2023 г. [Ogadzhanov, 2002, 2023] и в Каспийском море 07.12. 2023 г. Деформации вследствие давления на Кавказско-Копет-Дагскую зону альпийской складчатости привели к указанным выше сильным землетрясениям. Затем деформации передавались далее на северо-северо-восток, формируя деформации сжатия вдоль северной границы эпигерцинской Скифской плиты, а затем по направлению с юго-запада на северо-восток, деформации сдвига в пределах областей докембрийской и герцинской складчатости, где возникли тектонические землетрясения магнитудного уровня, близкого к 5 и более: Сальское (2001 г.), Шалкарское (2008 г.), Катав-Ивановское (2018 г.). Очаговые зоны указанных землетрясений приурочены к новейшим структурам северо-восточного простирания. Сальское землетрясение приурочено к участку Сальского поперечного поднятия и ограничивающим его новейшим разломам Скифской эпигерцинской плиты [Panina, 2009; Rudkevich, 1974, рис. 42]. Шалкарское землетрясение приурочено к Шалкар-Аксайскому сдвигу Восточно-Европейской области докембрийской складчатости [Adushkin, Malovichko, 2013; Ogadzhanov, 2023]. Катав-Ивановское землетрясение приурочено к Бакало-Саткинскому сдвигу области герцинской складчатости Урала [Tevelev et al., 2019]. Схема расположения основных сейсмогенерирующих структур показана на рис. 1.

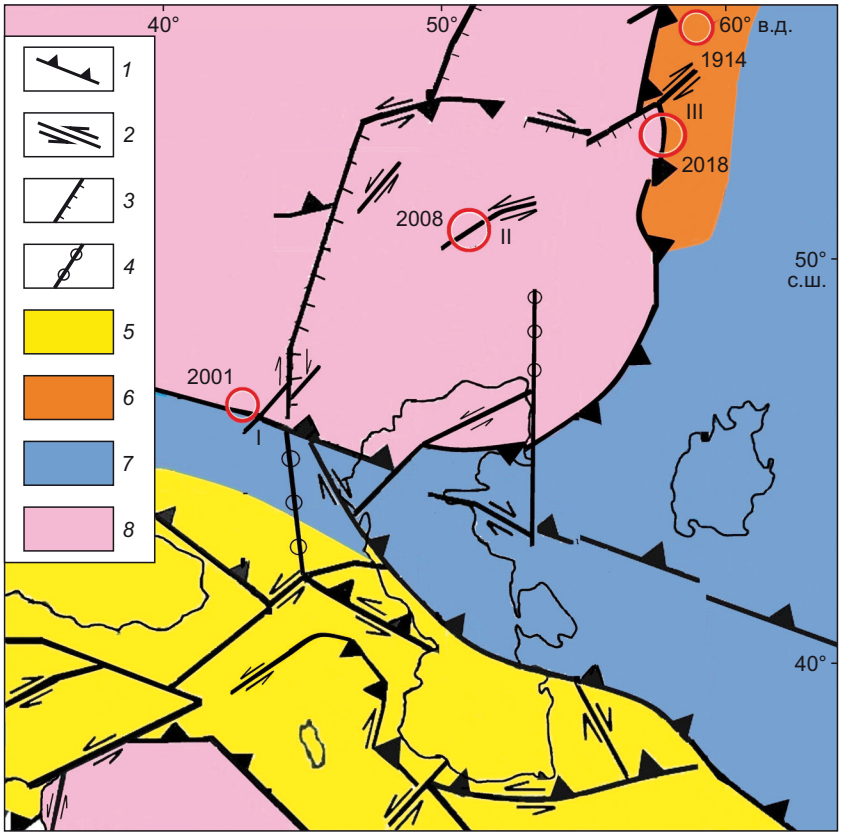

Рис. 1. Основные линии деформаций на востоке европейской части Евразийской плиты и ее обрамления (составлено с учетом [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004]). Зоны деформаций: *1* – сжатия, *2* – сдвига, *3* – растяжения, *4* – линии деформаций по сейсмологическим данным; основные геоструктуры: *5* – альпийская, *6* – герцинская, *7* – эпигерцинская, *8* – докембрийская. Сейсмогенерирующие структуры: I – Сальская, II – Шалкар-Аксайская, III – Бакало-Сатканская. Красными кружками показаны землетрясения с магнитудой около 5 и выше с указанием года.

Fig. 1. Main deformation lines in the eastern European part of the Eurasian Plate and its framing (after [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004]). Deformation zones: *1* – compression, *2* – shear, *3* – extension, *4* – deformation lines according to seismological data; main geostructures: *5* – Alpine, *6* – Hercynian, *7* – Epihercynian, *8* – Precambrian. Seismogenerating structures: I – Salsk, II – Shalkar-Aksay, III – Bakal-Satka. Red circles show earthquakes with a magnitude of 5 or higher, with year.

Эти, а также другие землетрясения более низкого магнитудного уровня в совокупности с дислокациями северо-восточного простирания сформировали сквозную Скифско-Уральскую зону новейших дислокаций. Приуроченным к этой же зоне можно считать и Билимбаевское землетрясение 1914 г. Данные об этих землетрясениях с указанием источников информации приведены в табл. 1.

Отсюда следует, что Скифско-Уральская зона сейсмогенерирующих структур может быть обусловлена тектонической активностью дислокаций северо-восточного направления [Ogadzhanov, 2023]. Для определения глубинных характеристик указанных сейсмогенерирующих структур, и в частности глубины возможных очагов землетрясений, связанных с напряженно-деформированным состоянием Скифско-Уральской зоны, необходимо изучение ее глубинного строения.

2. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Проведена комплексная интерпретация геофизических материалов по региональным профилям глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). В частности, были использованы результаты изучения глубинного строения по профилям Волгоград – Челкар, Элиста – Бузулук, Нахичевань – Волгоград, Саратов – Гурьев, Краснодар – Эмба, геотраверс «Гранит» [Zverev, Kosminskaya, 1980; Kashubin, 2002; Reference..., 2013]. Наибольшая глубина получения полезной записи (до 80–90 км) достигнута при обработке профиля ГСЗ Элиста – Бузулук, где в качестве источников возбуждения использовались ядерные взрывы. Профиль ГСЗ Элиста – Бузулук находится практически в пределах региональной Скифско-Уральской зоны сейсмогенерирующих структур и имеет аналогичное направление. Именно максимальная глубина получения полезной записи и расположение профиля Элиста – Бузулук создает наиболее благоприятные условия для изучения глубинного строения исследуемой сейсмогенерирующей структуры. По профилям ГСЗ Нахичевань – Волгоград, Элиста – Бузулук, Краснодар – Эмба, геотраверсу «Гранит», а также ряду региональных профилей ОГТ была построена модель литосферы по направлению

Таблица 1. Каталог землетрясений по инструментальным данным с магнитудой 3.5 и более Скифско-Уральской зоны новейших дислокаций

Table 1. Instrumental catalog of a magnitude 3.5 or higher earthquakes in the Scythian-Ural neoseismic dislocation zone

Номер события	День	Месяц	Год	Часы	Минуты	Секунды	Координаты эпицентра		Глубина гипоцентра, км	Магнитуда	Интенсивность, баллы MSK-64	Источник
							°с.ш.	°в.д.				
1	17	08	1914	04	51	01	57.00	59.80	26	5.0	6	[Sharov et al., 2007]
2	26	06	1976	11	02	04	50.30	51.00	–	3.8		[Ogadzhanov et al., 2001]
3	14	05	1989	11	46	56	50.87	51.38	–	4.5	–	ISC, NEIC
4	25	05	2001	19	13	19	46.43	42.30	15	4.7–5.0	5	ГС РАН
5	26	04	2008	13	14	53,4	50.58	51.73	10–18	4.7–5.3	7	ГС РАН, WAR
6	18	07	2008	19	36	40,3	50.72	51.92	-	4.0		ГС РАН
7	30	12	2011	23	58	17	50.71	51.63	26	4.3		ГС РАН
8	16	03	2012	19	20	40	45.57	42.82	10	3.6		ГС РАН
9	04	09	2018	22	58	15	54.58	57.78	10	5.4	6.0–6.5	ГС РАН, [Dyagilev et al., 2020]
10	05	09	2018	07	27	16	54.7	58.07	10	4.2		EMSC
11	29	09	2018	09	06	48	54.83	56.10	10	4.5		EMSC
12	15	11	2018	07	48	24	54.75	58.20	10	4.4		EMSC
13	22	12	2020	18	08	19	45.04	42.16	10	3.5		ГС РАН
14	01	12	2023	17	29	04	45.23	41.99	5	3.7		ГС РАН
15	24	01	2024	13	38	47	45.87	43.74	14	3.8	2	ГС РАН

Кавказ – Средний Урал, дополненная материалами интерпретации аномалий гравитационного поля в редукции Буге. При интерпретации гравитационных аномалий в качестве граничных условий задавались значения плотности горных пород, определенные по материалам, доступным в справочной литературе (например [Ozerskaya, Podoba, 1967; Karus, Kuznetsov, 1983; Dortman, 1984] и др.), а также глубины границ раздела земной коры, выделенные по данным сейсморазведки.

Информация о сейсмичности регионов по состоянию на 01.01.2025 г. взята по данным Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН), Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC), Геологической службы США (NEIC), VolcanoDiscovery (Китай), Варшавского агентства (WAR), а также опубликованных источников [Ogadzhanov et al., 2001; Sharov et al., 2007; Dyagilev et al., 2020]. По указанным источникам составлен каталог землетрясений с магнитудой 3.5 и более, эпицентры которых расположены по простиранию Скифско-Уральской зоны дислокаций (табл. 1).

Данные о сейсмогенерирующих структурах и сейсмогеодинамических зонах получены на основании анализа работ различных авторов, освещающих тектоническое строение и геодинамику региона [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004; Sharov et al., 2007; Ulomov et al., 2007; Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014; Eppelbaum, Katz, 2020; Batugin et al., 2022; Ogadzhanov, 2023].

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

На основании указанных выше материалов была составлена схема зон основных новейших деформаций района Скифско-Уральской зоны дислокаций и прилегающих территорий (рис. 1).

Из каталога землетрясений (табл. 1) выбраны землетрясения с магнитудой около 5 и выше и нанесены на схему, представленную на рис. 1. Из рисунка видно, что эпицентры землетрясений с магнитудой от 5 и выше группируются в северо-восточном направлении и приурочены к линиям деформаций аналогичного простирания. На схемах (рис. 1, 2) показана Скифско-Уральская зона сейсмогенерирующих структур простирания с юго-запада от эпицентра землетрясения 2001 г. на северо-восток до группы эпицентров землетрясений 1914, 2018 гг. Указанная зона берет свое начало от северной части эпигерцинской Скифской плиты и протягивается до герцинского складчатого сооружения Урала.

На рис. 2 показано расположение эпицентров землетрясений из каталога (табл. 1). Из данного рисунка

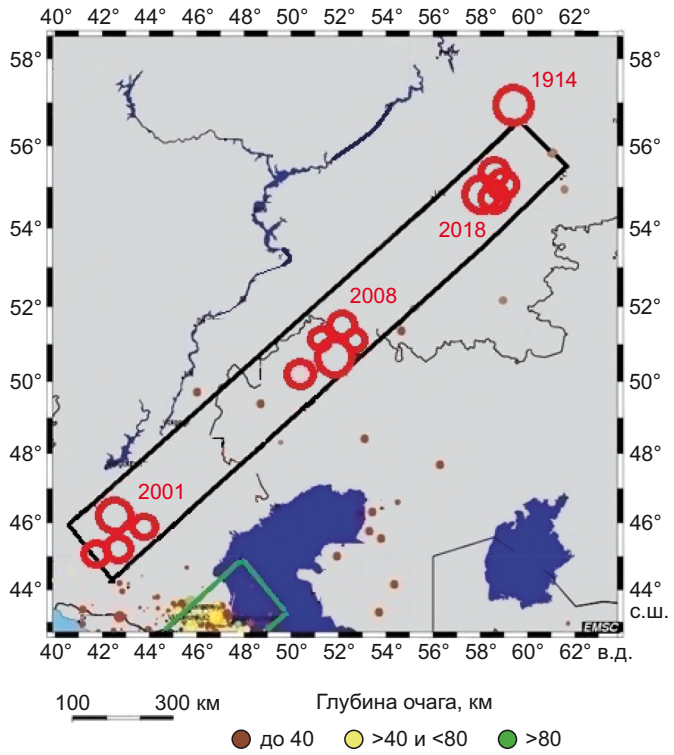

Рис. 2. Схема расположения эпицентров сильных землетрясений Скифско-Уральской зоны (топографическая основа согласно EMSC).
Контур Скифско-Уральской зоны – черный цвет, контур северо-восточного окончания Кипро-Кавказской сейсмогенерирующей зоны – зеленый цвет. Красные кружки – землетрясения с магнитудой 3.5 и более. Коричневые, желтые и зеленые точки – сейсмичность по данным EMSC.

Fig. 2. Map of strong earthquake epicenters in the Scythian-Ural zone (topographic base provided by the EMSC).
The contour of the Scythian-Ural zone is shown in black, the contour of the northeastern end of the Cyprus-Caucasus seismogenerating zone is shown in green. The red circles show earthquakes with a magnitude of 3.6 or higher. The brown, yellow and green dots represent seismicity according to the EMSC data.

видно, что наиболее сильные землетрясения региона группируются в северо-восточном направлении Скифско-Уральской зоны дислокаций.

Глубинное строение Скифско-Уральской зоны изучено по профилям ГСЗ и дополнено материалами интерпретации гравитационных аномалий. В результате комплексной интерпретации указанных геофизических материалов была составлена модель литосферы, пересекающая складчатое альпийское сооружение Кавказа, эпигерцинскую Скифскую плиту, юго-восточную часть Восточно-Европейской зоны архейской складчатости, герцинское складчатое сооружение Урала и западную часть эпигерцинской Западно-Сибирской плиты [Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2015].

Из этой модели выделен сегмент, который в плане и по направлению соответствует положению Скифско-Уральской зоны сейсмогенерирующих структур (рис. 3). На указанную глубинную модель нанесены гипоцентры землетрясений с магнитудой от 5 и выше (рис. 3); видно, что гипоцентры всех указанных землетрясений расположены в земной коре.

Гипоцентры землетрясений 2001 г. и 2018 г. приурочены к зонам сжатия на стыке складчатостей различного возраста; в случае с землетрясением 2018 г. на стыке герцинской с докембрийской, а в случае с землетрясением 2001 г. – эпигерцинской с докембрийской. Гипоцентры землетрясений 1914 г. и 2008 г. находятся во внутренней части герцинской складчатости Урала и Восточно-Европейской области докембрийской складчатости соответственно. Из рис. 3 видно, что гипоцентры всех указанных землетрясений расположены над областями внедрения в вышележащие толщи нормально уплотненной мантии ее разуплотненных комплексов.

При более детальном анализе участков расположения гипоцентров геофизическими методами становится понятным, что как в случае приуроченности последних к зонам сочленения складчатостей различного возраста, так и в случае приуроченности к внутренним частям областей одновозрастной складчатости положения гипоцентров отвечают участкам разуплотнения земной коры, унаследованных, по всей вероятности, от таковых в мантии.

Рассмотрим участки расположения гипоцентров сильных землетрясений: Сальского землетрясения 2001 г. с магнитудой 5.0 в зоне сочленения эпигерцинской и докембрийской складчатости (рис. 4); Шалкарского землетрясения 2008 г. с магнитудой 5.3 – во

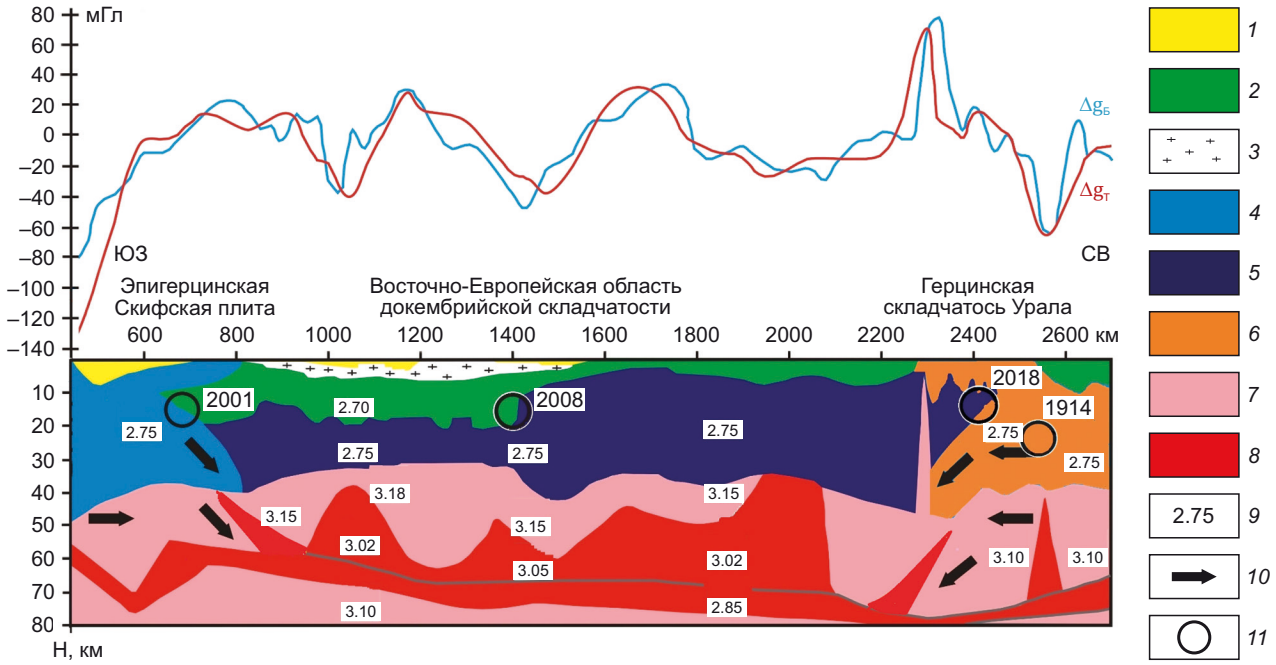

Рис. 3. Модель глубинного строения по линии Скифско-Уральской зоны новейших дислокаций.
Породы осадочной толщи: *1* – мезокайнозойского возраста, *2* – палеозойского возраста, *3* – соленосные толщи. Породы кристаллического фундамента: *4* – эпигерцинского возраста, *5* – архей-протерозойского возраста, *6* – герцинского возраста. Породы мантии: *7* – нормально уплотненные, *8* – разуплотненные, *9* – значения плотности; *10* – направления движения литосферных мегаблоков; *11* – гипоцентры сильных землетрясений магнитудой 5 и более с указанием года: Сальского – ПК 700, Шалкарского – ПК 1400, Билимбаевского и Уральского – ПК 2400 – 2500. $\Delta g_Б$ – кривая гравитационного поля в редукции Буге, $\Delta g_Т$ – рассчитанная кривая гравитационного поля.

Fig. 3. A model of the deep structure along the line of the Scythian-Ural neoseismic dislocation zone.
Sedimentary rocks: *1* – Meso-Cenozoic, *2* – Paleozoic, *3* – salt-bearing strata. Crystalline basement rocks: *4* – Epihercynian, *5* – Archean-Proterozoic, *6* – Hercynian. Mantle rocks: *7* – normally compacted, *8* – decompacted, *9* – density values; *10* – directions of movement of lithospheric megablocks; *11* – hypocenters of strong earthquakes with a magnitude of 5 or higher, with year: Salsk – PK 700, Shalkar – PK 1400, Bilimbai and Ural – PK 2400 – 2500. $\Delta g_Б$ is a gravity curve for Bouguer reduction, $\Delta g_Т$ is a calculated gravity curve.

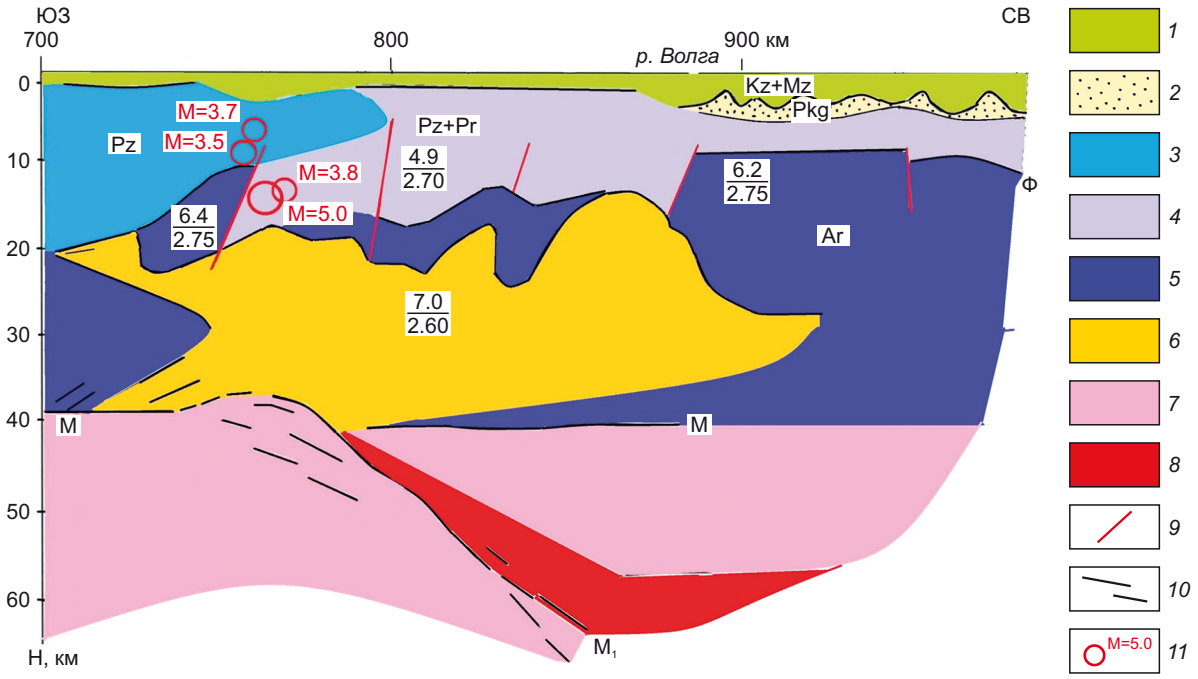

Рис. 4. Модель глубинного строения очаговой зоны Сальского землетрясения в области сочленения эпигерцинской и докембрийской складчатости (составлено с учетом данных [Brodsky et al., 1994; Volozh et al., 1999]). *1* – мезокайнозойские толщи; *2* – соленосные толщи; *3* – палеозойский комплекс; *4* – протерозойско-палеозойский комплекс; *5* – нормально уплотненные

толщи кристаллического фундамента; *6* – разуплотненные толщи кристаллического фундамента; *7* – нормально уплотненные породы мантии; *8* – разуплотненные породы мантии; *9* – разломы; *10* – сейсмические границы; *11* – гипоцентры землетрясений с указанием магнитуды согласно табл. 1; M и M1 – сейсмические границы в мантии; Ф – поверхность докембрийского фундамента. Цифрами в числителе дроби указана скорость продольных волн (км/с), в знаменателе – плотность ($\times 10^3$ кг/м^3).

Fig. 4. Model of the deep structure of the Salsk earthquake source zone in the junction area of the Epihercynian and pre-Cambrian folding (after [Brodsky et al., 1994; Volozh et al., 1999]). *1* – Meso-Cenozoic strata; *2* – salt-bearing strata; *3* – Paleozoic complex; *4* – Proterozoic-Paleozoic complex; *5* – normally compacted strata of the crystalline basement; *6* – decompacted strata of the crystalline basement; *7* – normally compacted rocks of the mantle; *8* – decompacted rocks of the mantle; *9* – faults; *10* – seismic boundaries; *11* – hypocenters of earthquakes with a magnitude according to Table 1; M and M1 – seismic boundaries in the mantle; Ф – Precambrian basement surface. The numerator shows longitudinal wave velocities (km/s), and the denominator contains density ($\times 10^3$ kg/m^3).

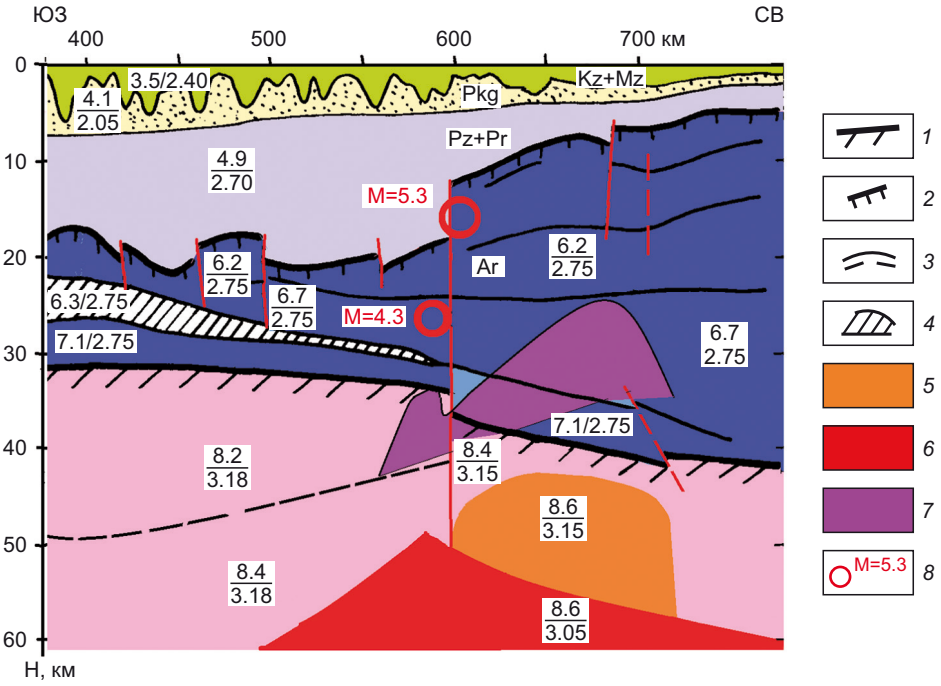

Рис. 5. Модель глубинного строения очаговой зоны Шалкарского землетрясения (отрезок профиля ГСЗ Элиста – Бузулук).
1 – поверхность мантии; *2* – поверхность кристаллического фундамента; *3* – сейсмические границы; *4* – слои пониженных скоростей сейсмических волн; *5* – блок повышенных скоростей сейсмических волн; *6* – блок пониженной плотности; *7* – блок повышенной электропроводности; *8* – гипоцентры землетрясений с указанием магнитуды. Остальные условные обозначения см. на рис. 4.

Fig. 5. Model of the deep structure of the Shalkar earthquake source zone (a segment of the Elista – Buzuluk DSS profile).
1 – mantle surface; *2* – crystalline basement surface; *3* – seismic boundaries; *4* – low-velocity layers; *5* – a high-velocity block; *6* – a low-density block; *7* – a high-electroconductivity block; *8* – hypocenters of earthquakes, with magnitude. Other symbols see in Fig. 4.

внутренней части зоны докембрийской складчатости (рис. 5) и Уральских землетрясений с магнитудой 5.0 и 5.4 – в области герцинской складчатости (рис. 6).

Согласно имеющимся данным (табл. 1) в области сочленения эпигерцинской и докембрийской складчатости (см. рис. 4) кроме землетрясения с магнитудой 5.0 известно еще три землетрясения с магнитудой 3.5, 3.7 и 3.8. Гипоцентры всех этих землетрясений расположены в земной коре над зоной ее разуплотнения, приурочены к разрывному нарушению, унаследованному от разуплотненных комплексов земной коры и проникающему в надвиговую структуру палеозойского возраста. На рис. 4 представлен фрагмент профиля Элиста – Бузулук, дополненный материалами сейсморазведки ОГТ. На профиле отчетливо видно погружение поверхности мантии M1 в направлении с юго-запада на северо-восток [Brodsky et al., 1994].

Согласно материалам интерпретации результатов сейсморазведки ОГТ [Brodsky et al., 1994] поверхность разуплотненного комплекса, выделенного по данным сейсморазведки, идентифицируется с поверхностью серпентинизированных толщ, характеризующихся пониженной плотностью, которая может быть ниже плотности перекрывающих образований докембрийского фундамента. В силу указанных факторов, вызванных специфичным понижением плотности с глубиной, создаются условия для конвективной, а следовательно, и геодинамической неустойчивости комплексов земной коры, приводящей к ее деформации с возникновением очагов землетрясений.

Дополнительной причиной геодинамической активизации литосферы на данном участке являются силы горизонтального давления. Эти силы обусловлены движением Кавказско-Анатолийского мегаблока в северо-восточном направлении. Напряжения вследствие этого движения концентрируются в области сочленения эпигерцинской и докембрийской складчатости, усиливая тем самым деформации в пределах зоны сочленения указанных геоструктур, что может являться причиной возникновения здесь сильных землетрясений.

Как следует из рис. 1, ортогонально области сжатия в зоне сочленения эпигерцинской и докембрийской складчатости формируются деформации левостороннего сдвига, которые, по сути, и приурочены к Скифско-Уральской зоне новейших дислокаций. В центральной части Скифско-Уральской зоны находится очаговая зона Шалкарских землетрясений (см. рис. 1, 2).

В Шалкарской очаговой зоне известно пять землетрясений с магнитудой от 3.8 до 5.3 (табл. 1). Глубина гипоцентров определена для двух землетрясений – 26.04.2008 г. и 30.12.2011 г., они нанесены на профиль, изображенный на рис. 5. Сопоставление глубины гипоцентров с профилем ГСЗ Элиста – Бузулук (см. рис. 5) показывает, что эти гипоцентры приурочены к участкам наиболее резких изменений глубины поверхностей кристаллического фундамента и мантии.

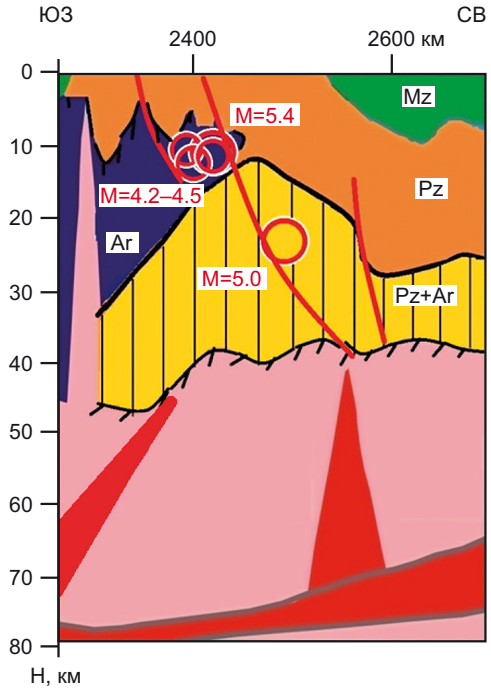

Рис. 6. Модель глубинного строения очаговой зоны уральских землетрясений.
Вертикальной штриховкой показана магнитная модель нижнего слоя земной коры [Martyshko et al., 2024]. Остальные условные обозначения см. на рис. 3, 4, 5.

Fig. 6. Model of the deep structure of the Ural earthquake source zone.
Vertical hatching shows the magnetic model of the lower layer of the Earth's crust [Martyshko et al., 2024]. Other symbols are shown in Fig. 3, 4, 5.

На этих же участках отмечается относительно высокий градиент в изменениях по латерали скоростей сейсмических волн внутри мантии, что может быть признаком проникновения разломов ниже подошвы кристаллической коры. Глубже гипоцентров землетрясений, в нижней части земной коры и верхней мантии, по данным магнитотеллурического зондирования выделяется зона аномально высокой электропроводности, которая совпадает с прогнозируемой по результатам интерпретации гравитационных аномалий зоной разуплотнения в верхней мантии (см. рис. 3, 5).

Уральская очаговая зона землетрясений обнаруживает связь с глубинными разломами земной коры (рис. 6). Деформация земной коры, приведшая к возникновению этих разломов, вероятно, обусловлена воздействием на нее разуплотненных зон верхней мантии, а также формированием здесь разуплотненных комплексов земной коры.

Зоны разуплотнения земной коры на данном участке, согласно исследованиям [Martyshko et al., 2024], отличаются повышенной намагниченностью (рис. 6), что дает основание для выводов о наличии здесь серпентинизированных комплексов, обусловливающих понижение плотности земной коры с глубиной. Конвективная неустойчивость комплексов земной коры, возникшая вследствие понижения плотности с глубиной, привела к ее деформации и, как следствие, возникновению очагов землетрясений.

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По мнению ряда авторов [Shatsky, 1948; Sarkisyan, 1982; Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014; Eppelbaum, Katz, 2020], дислокации альпийской, герцинской и докембрийской складчатости северо-восточного и субмеридионального направления объединяются в сквозной тектонический пояс, протягивающийся по направлению дислокаций на востоке европейской части Евразийской плиты в область восточной части Аравийской плиты (см. рис. 1). Однако согласно материалам других исследователей [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004] для выделения единого тектонического пояса на данной территории достаточных оснований нет. Подобное мнение основано на том, что левые сдвиги Восточно-Анатолийской и Скифско-Уральской зон не образуют единой зоны разломов и обозначают, скорее, генеральное направление новейших тектонических движений, сочетаясь с разломами широтного и северо-западного простирания разной кинематики.

По определению авторов работы [Ulomov et al., 2007] сейсмогенерирующие зоны с простиранием, подобным Скифско-Уральской зоне сейсмогенерирующих структур, рассматриваются как линеаментные сейсмогеодинамические. Скифско-Уральская область сейсмогенерирующих дислокаций, с которой могут быть связаны землетрясения с магнитудой от 5, выделена нами по аналогии с зонами, описанными в работе [Ulomov

et al., 2007]. Эта зона соответствует простиранию известных сейсмогенерирующих новейших структур, в частности Кипро-Кавказской (см. рис. 2); указанные зоны укладываются в общее северо-восточное направление. На более позднем этапе тектогенеза Скифско-Уральская и Кипро-Кавказская зоны, соответствующие тектоническим дислокациям северо-восточного направления, возможно, были взаимно смещены вдоль систем сдвиговых дислокаций Кавказа, имеющих северо-западное – юго-восточное направление [Patina et al., 2017].

Другая региональная сейсмогенерирующая структура, с которой связываются очаги сильных землетрясений, тоже имеет северо-восточное простирание [Ogadzhanov, 2023] по направлению р. Волги; прогнозируемая магнитуда возможных землетрясений этой зоны, согласно данным [Grachev et al., 1996], составляет 5.5. Прогнозная магнитуда указанной зоны возникновения очагов землетрясений (ВОЗ), определенная по неотектоническим деформациям [Grachev et al., 1996], в принципе совпадает с наблюденной магнитудой известных землетрясений [Ogadzhanov et al., 2001; Sharov et al., 2007]. Комплексные геофизические данные указывают на связь зоны ВОЗ, простирающейся по направлению р. Волги, с разуплотненными комплексами земной коры [Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014]. На рис. 7 приведен поперечный, относительно зоны ВОЗ, глубинный разрез земной коры вдоль западной части профиля ГСЗ Волгоград – Челкар согласно данным из работы [Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014]. Профиль проходит через очаговую зону сейсмического события, интерпретируемого как Камышинское землетрясение 1991 г. [Ogadzhanov et al., 2001; Sharov et al., 2007] (рис. 7).

Гипоцентр Камышинского землетрясения 1991 г. (рис. 7) расположен над поверхностью комплекса земной коры, который отличается от перекрывающих толщ кристаллического фундамента пониженной плотностью и высокой намагниченностью, типичной для серпентинизированных образований [Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014]. Вопрос о связи очагов землетрясений с серпентинизированными образованиями ранее рассматривался в статье [Sato et al., 1986] и был аргументирован на примере очаговых зон землетрясений разлома Сан-Андреас; позже аналогичные выводы были сделаны и для очаговых зон землетрясений восточно-европейской области докембрийской складчатости [Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014, 2015].

Таким образом, процессы серпентинизации, приводящие к разуплотнению земной коры и мантии, способны обусловить деформации, которые, в свою очередь, могут проявиться возникновением землетрясений.

Зоны разуплотнения, выявленные в пределах Скифско-Уральской сейсмогенерирующей зоны, могут способствовать формированию потенциальных очагов землетрясений на глубинах, определяемых комплексами нижней части земной коры и мантии. Этот вывод вполне согласуется с концепцией, ранее высказанной Н.С. Шатским [Shatsky, 1948], о сверхглубоком заложении сквозного тектонического пояса в восточной части Евразийской плиты, получившего дальнейшее развитие в позднекайнозойский этап тектогенеза [Leonov et al., 2001; Kopp, 2004; Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014; Eppelbaum, Katz, 2020].

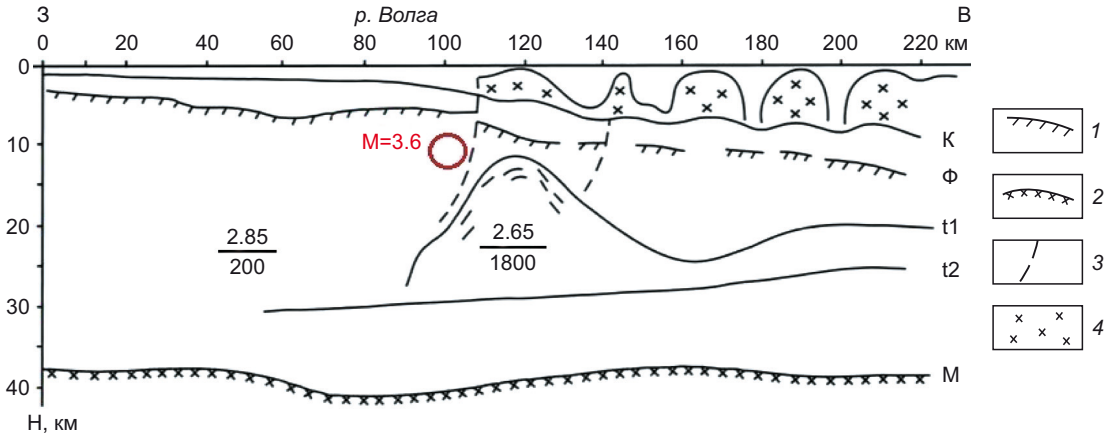

Рис. 7. Глубинный разрез через очаговую зону Камышинского землетрясения 1991 г.
1 – поверхность кристаллического фундамента; *2* – поверхность мантии; *3* – разрывные нарушения; *4* – соленосные толщи. К – поверхность подсолевых отложений, Ф – поверхность кристаллического фундамента, t1 и t2 – границы внутри кристаллического фундамента, М – поверхность мантии. Красным кружком показан гипоцентр Камышинского землетрясения с магнитудой 3.8. На профиле в числителе дроби показаны значения плотности, в знаменателе – значения магнитной восприимчивости в единицах системы СИ.

Fig. 7. Depth section through the source zone of the Kamyshin earthquake of 1991.
1 – crystalline basement surface; *2* – mantle surface; *3* – faults; *4* – salt-bearing strata. K – subsalt deposit surface, Ф– crystalline basement surface, t1 and t2 – boundaries inside the crystalline basement, M – mantle surface. The red circle shows the hypocenter of the Kamyshin earthquake with a magnitude of 3.8. The numerator of the profile shows densities, the denominator shows magnetic susceptibilities in ISQ units.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сильные землетрясения в пределах Скифско-Уральской зоны сейсмогенерирующих структур являются следствием концентрации сжимающих напряжений в зоне сочленения альпийской складчатости и складчатости более поздней стадии тектогенеза. Напряжения и деформации затем передаются на передний фронт сжатия в зоне сочленения герцинской и докембрийской геоструктур и далее во внутреннюю часть последней, что приводит к возникновению сильных землетрясений на востоке европейской части Евразийской плиты, в том числе землетрясений, эпицентры которых находятся на значительном расстоянии от зоны альпийской складчатости.

Литосфера Скифско-Уральской зоны дислокаций находится в поле деформаций, обусловленных не только горизонтальным давлением крупных блоков литосферы (плит), но и динамикой за счет разуплотнения горных пород. В связи с этим процессы, приводящие к разуплотнению земной коры и мантии, можно рассматривать в качестве факторов, способствующих усилению геодинамических проявлений за счет действия глобальных сил горизонтального давления, деформации от которых передаются во внутренние части областей герцинской и докембрийской складчатости. Эти геодинамические проявления способствуют деформациям горных пород, выраженным тектоническими разломами и возникновением очагов землетрясений как в краевых, так и во внутренних частях плит.

Во внутренних частях плит, где силы горизонтального давления не столь велики, как в краевых частях, разуплотнение комплексов земной коры и мантии может являться одной из основных причин геодинамических проявлений и структурообразования. Во внутренних областях герцинской и докембрийской складчатости, где деформации могут возникать по причине разуплотнения глубинных масс, магнитуда известных землетрясений составляет 5 и более.

В силу изложенного следует сделать вывод, что при прогнозе очаговых зон сильных землетрясений в пределах рассматриваемого региона комплексные геофизические исследования должны быть направлены на выявление зон разуплотнения и обусловленных ими деформаций земной коры и мантии.

6. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью. Автор прочел и одобрил финальную версию перед публикацией.

The author has no conflicts of interest to declare relevant to this article. The author read and approved the final manuscript.

7. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

Adushkin V.V., Malovichko A.A. (Eds), 2013. Explosions and Earthquakes in the European Part of Russia. GEOS, Moscow, 384 p. (in Russian) [Взрывы и землетрясения на территории европейской части России / Ред. В.В. Адушкин, А.А. Маловичко. М.: ГЕОС, 2013. 384 с.].

Batugin A., Ogadzhanov V., Khan S., Shevchuk S., Kostikov S., Oborin A., 2022. Exploring the Nature of Seismic Events in the Underground Gas Storages Area of the Volga Federal District. Russian Journal of Earth Sciences 22 (6), ES6010. https://doi.org/10.2205/2022ES000819.

Brodsky A.Ya., Voronin N.I., Mitalyov I.A., 1994. A Model of the Deep Structure of the Junction Area Between the Karpinsky Ridge and the Astrakhan Arch. National Geology 4, 50–54 (in Russian) [Бродский А.Я., Воронин Н.И., Миталев И.А. Модель глубинного строения зоны сочленения кряжа Карпинского и Астраханского свода // Отечественная геология. 1994. № 4. С. 50–54].

Dortman N.B. (Ed.), 1984. Physical Properties of Rocks and Minerals. Handbook of Geophysics. Moscow, Nedra, 455 p. (in Russian) [Физические свойства горных пород и полезных ископаемых. Справочник геофизика / Ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с].

Dyagilev R.A., Verkholantsev F.G., Varlashova Yu.V., Shulakov D.Yu., Gabsatarova I.P., Epifanskiy A.G., 2020. Katav-Ivanovsk Earthquake on 04.09.2018, mb=5.4 (Urals). Russian Journal of Seismology 2 (2), 7–20 (in Russian) [Дягилев Р.А., Верхоланцев Ф.Г., Варлашова Ю.В., Шулаков Д.Ю., Габсатарова И.П., Епифанский А.Г. Катав-Ивановское землетрясение 04.09.2018 г., mb=5.4 (Урал) // Российский сейсмологический журнал. 2020. Т. 2. № 2. С. 7–20]. https://doi.org/10.35540/2686-7907.2020.2.01.

Eppelbaum L.V., Katz Y.I., 2020. Significant Tectono-Geophysical Features of the African-Arabian Tectonic Region: An Overview. Geotectonics 54 (2), 266–283. https://doi.org/10.1134/S0016852120020041.

Grachev A.F., Magnitsky V.A., Mukhamediev S.A., Junga S.L., 1996. Determination of Possible Maximum Magnitudes of Earthquakes in the East European Platform. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 32 (7), 559–574.

Karus E.V., Kuznetsov O.L. (Eds), 1983. Geophysical and Geochemical Studies of Deep Zones of the Earth's Crust. Nedra, Moscow, 177 p. (in Russian) [Геофизические и геохимические исследования глубинных зон земной коры / Ред. Е.В. Карус, О.Л. Кузнецов. М.: Недра, 1983. 177 с.].

Kashubin S.N. (Ed.), 2002. Geotraverse GRANITE. East European Platform – Ural – West Siberia (Crustal Structure Based on Results of Complex Geological and Geophysical Studies). Ekaterinburg, 312 p. (in Russian) [Геотраверс «ГРАНИТ»: Восточно-Европейская платформа – Урал – Западная Сибирь (строение земной коры по результатам комплексных геолого-геофизических исследований) / Ред. С.Н. Кашубин. Екатеринбург, 2002. 312 с.].

Kopp M.L., 2004. Mobilistic Neotectonics of the Platforms of the Southeastern Europe. Nauka, Moscow, 340 p. (in Russian) [Копп М.Л. Мобилистическая неотектоника платформ Юго-Восточной Европы. М.: Наука, 2004. 340 с.].

Leonov Yu.G., Gushchenko O.I., Kopp M.L., Rastsvetaev L.M., 2001. Relationship Between the Late Cenozoic Stresses and Deformations in the Caucasian Sector of the

Alpine Belt and Its Northern Foreland. Geotectonics 35 (1), 30–50.

Martyshko P.S., Fedorova N.V., Rublev A.L., 2024. On the Crustal Sources of Magnetic Anomalies in the Middle Urals. Geodynamics & Tectonophysics 15 (3), 0763 (in Russian) [Мартышко П.С., Федорова Н.В., Рублев А.Л. Об источниках магнитных аномалий в земной коре Среднего Урала // Геодинамика и тектонофизика. 2024. Т. 15. № 3. 0763]. https://doi.org/10.5800/GT-2024-15-3-0763.

Ogadzhanov V.A., 2002. Volga Region Seismicity Features Due to Strong Earthquakes in the Caspian Basin. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 38 (4), 291–297.

Ogadzhanov V.A., 2023. Comparative Characteristics of Regional Seismogenic Structures of the European-African Through Tectonic Belt. Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences 23 (3), 184–192 (in Russian) [Огаджанов В.А. Сравнительная характеристика региональных сейсмогенерирующих структур Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия Науки о Земле. 2023. Т. 23. № 3. С. 184–192]. https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-3-184-192.

Ogadzhanov V.A., Chepkunas L.S., Mikhailova R.S., Solomin S.V., Usanova A.V., 2001. On the Catalogue of Earthquakes of the Middle and Lower Volga Regions. Earthquakes of Northern Eurasia in 1995. Vol. 4. GS RAS, Moscow, p. 119–127 (in Russian) [Огаджанов В.А., Чепкунас Л.С., Михайлова Р.С., Соломин С.В., Усанова А.В. О каталоге землетрясений Среднего и Нижнего Поволжья // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. М.: ГС РАН, 2001. Вып. 4. С. 119–127].

Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2014. Physics-Geological Characteristics Platform Parts of the Though European-African Tectonic Belt. Geophysics 4, 33–39 (in Russian) [Огаджанов В.А., Огаджанов А.В. Физико-геологические характеристики платформенной части Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса // Геофизика. 2014. № 4. С. 33–39].

Ogadzhanov V.A., Ogadzhanov A.V., 2015. Geological and Geophysical Characteristics of Deep Geostructures of European Plate. Geophysics 1, 60–66 (in Russian) [Огаджанов В.А., Огаджанов А.В. Геолого-геофизические характеристики основных типов глубинных геоструктур Европейской плиты // Геофизика. 2015. № 1. С. 60–66].

Ozerskaya M.L., Podoba N.V. (Eds), 1967. Physical Properties of the Sedimentary Cover of the Territory of the USSR. Handbook. Moscow, Nedra, 722 p. (in Russian) [Физические свойства осадочного покрова территории СССР. Справочник / Ред. М.Л. Озерская, Н.В. Подоба. М.: Недра, 1967. 722 с.].

Panina L.V., 2009. The Latest Structural Drawing of the Scythian Plate. Moscow University Geology Bulletin 1, 23–31 (in Russian) [Панина Л.В. Новейший структурный рисунок Скифской плиты // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2009. № 1. С. 23–31].

Patina I.S., Leonov Yu.G., Volozh Yu.A., Kopp M.L., Antipov M.P., 2017. Crimea–Kopet Dagh Zone of Concentrated Orogenic Deformations as a Transregional Late Collisional Right-Lateral Strike-Slip Fault. Geotectonics 51 (4), 353–365. https://doi.org/10.1134/S0016852117040069.

Reference Geological and Geophysical Profiles of Russia, 2013. Deep Seismic Sections Along the DSS Profiles Performed from 1972 to 1995. Atlas (in Russian) [Опорные геолого-геофизические профили России. Глубинные сейсмические разрезы по профилям ГСЗ, отработанным в период с 1972 по 1995 год: Атлас]. Available from: https://karpinskyinstitute.ru/ru/info/seismic/ (Last Accessed February 17, 2025).

Rudkevich M.Ya., 1974. Main Features of Tectonics of the Turanian and Scythian Plates. In: Paleotectonic Criteria of Oil and Gas Potential. Nedra, Moscow, p. 117–123 (in Russian) [Рудкевич М.Я. Главные черты тектоники Туранской и Скифской плит // Палеотектонические критерии нефтегазоносности. М.: Недра, 1974. С. 117–123].

Sarkisyan O.A., 1982. Some Considerations on the Nature, Nomenclature and Classification of the Transverse Tectonic Structures. Proceedings of the YSU. Geology 2, 118–124 (in Russian) [Саркисян О.А. Некоторые соображения о природе, номенклатуре и классификации поперечных тектонических структур // Ученые записки ЕГУ. Геология. 1982. № 2. С. 118–124].

Sato M., Sutton A.J., McGee K.A., Russell-Robinson S., 1986. Monitoring of Hydrogen Along the San Andreas and Calaveras Faults in Central California in 1980–1984. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 91 (B12), 12315–12326. https://doi.org/10.1029/JB091iB12p12315.

Sharov N.V., Malovichko A.A., Shchukin Yu.K. (Eds), 2007. Earthquakes and Microseismicity in Modern Geodynamics Problems on the East European Platform. Book 1. KRC RAS, Petrozavodsk, 381 p. (in Russian) [Сейсмотектоническое районирование западной части Восточно-Европейской платформы // Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / Ред. Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2007. Кн. 1. 381 с.].

Shatsky N.S., 1948. On Deep Dislocations Covering Both Platforms and Folded Areas (the Volga Region and the Caucasus). Bulletin of the USSR Academy of Sciences. Geological Series 5, 39–66 (in Russian) [Шатский Н.С. О глубоких дислокациях, охватывающих и платформы и складчатые области (Поволжье и Кавказ) // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1948. № 5. С. 39–66].

Tevelev A.V., Tevelev A.V., Khotylev A.O., Prudnikov I.A., Kosheleva I.A., Volodina E.A., Moseichuk V.M., 2019. Tectonic Situation in the Area of Catav-Ivanovsk Earthquakes in September 2018 (South Urals). Moscow University Geology Bulletin 2, 23–29 (in Russian) [Тевелев А.В., Тевелев А.В., Хотылев А.О., Прудников И.А., Кошелева И.А., Володина Е.А., Мосейчук В.М. Тектоническая обстановка в районе Катав-Ивановских землетрясений в сентябре 2018 г. (Южный Урал) // Вестник Московского университета. Серия 4: Геология. 2019. № 2. С. 23–29]. https://doi.org/10.33623/0579-9406-2019-2-23-29.

Ulomov V.I., Danilova T.I., Medvedeva N.S., Polyakova T.P., Shumilina L.S., 2007. Assessment of Seismic Hazard in the North Caucasus. Izvestiya, Physics of the Solid Earth 43 (7), 559–572. https://doi.org/10.1134/S1069351307070051.

Volozh Yu.A., Antipov M.P., Leonov Yu.G., Morozov A.F., Yurov Yu.A., 1999. Structure of the Karpinsky Ridge. Geotectonics 1, 28–43 (in Russian) [Волож Ю.А., Антипов М.П., Леонов Ю.Г., Морозов А.Ф., Юров Ю.А. Строение кряжа Карпинского // Геотектоника. 1999. № 1. С. 28–43].

Zverev S.M., Kosminskaya I.P. (Eds), 1980. Seismic Models of the Lithosphere of the Main Geostructures of the Territory of the USSR. Moscow. Nauka, 184 p. (in Russian) [Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР // Ред. С.М. Зверев, И.П. Косминская. М.: Наука, 1980.184 с.].