



February 6, 2023. After the earthquakes on February 6, 2023, the migration of seismic activity in the northeast direction, in the area of the Caucasus fold structure and the East European platform, was noted.

Keywords: tectonic belt, seismogenic structures, earthquakes, gravity anomalies

For citation: Ogadzhanov V. A. Comparative characteristic of regional seismo-generating structures of the European-African through tectonic belt. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2023, vol. 23, iss. 3, pp. 184–192 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2023-23-3-184-192>, EDN: BQJDCM

This is an open access article distributed under the terms of Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC-BY 4.0)

Введение

Сквозные тектонические пояса – это протяженные зоны дислокаций, пересекающие как геосинклинали, так и платформы. «Впервые гипотеза о единых тектонических поясах, охватывающих области самого раннего геологического строения, была высказана Н. С. Шатским (1948 г.) и доказана на примере зоны субмеридионального направления, прослеживающейся от р. Камы в Саратовское Поволжье, Кавказ и далее в пределы аравийской части Африканской платформы. Подобные пояса имеют сверхглубокое заложение...» [1, с. 176].

Согласно формулировке автора настоящей статьи, под сквозным тектоническим Европейско-Африканским поясом следует понимать систему разных по своей ориентировке и кинематическим характеристикам дизъюнктивных дислокаций, группирующихся вдоль северо-восточного и субмеридионального направлений [2]. Дислокации выражены в отложениях кайнозоя – рифея осадочной толщи, зачастую унаследованы от поверхности кристаллической коры и, согласно определению Н. С. Шатского (см. выше), должны проникать в более глубокие слои литосферы.

Тектоническими дислокациями сквозных поясов обусловлены зоны наиболее интенсивных геодинамических проявлений; с ними связаны очаги землетрясений, поэтому изучение геодинамических характеристик сквозных тектонических поясов представляется весьма актуальным.

Зачастую деформации, соответствующие этим поясам, формируются в зонах плотностных неоднородностей Земли. Пояса сейсмичности, обусловленные линейными планетарными неоднородностями, могут быть выражены активными разломами, которые являются лишь одним из признаков потенциально сейсмогенных зон. В то же время при выделении таких зон следует принимать во внимание не возможность отсутствия прямых геологических признаков разрывного нарушения, а наличие лишь косвенных геофизических методов, например гравиметрических, сейсмологических и др.

Гравитационные аномалии отражают контакты земной коры, отличающиеся по плотности. Чем больше разница плотностей блоков земной коры, тем интенсивнее происходит деформация и вероятнее возникновение очагов землетрясений на их контактах. Чем протяженнее зона

контакта плотностных неоднородностей, тем выше может быть ее сейсмический потенциал. Поэтому при решении задач выявления сейсмогенных зон на сквозных неоднородностях литосферы актуальным представляется изучение их связи с планетарными аномалиями гравитационного поля.

Методика исследований

Руководствуясь актуальностью настоящих исследований, поставлена задача изучения тектонической позиции сейсмогенерирующих структур вдоль зон глобальных плотностных неоднородностей. Для анализа нами были использованы данные спутниковой гравиметрии [3], а также карты аномалий геоида по гармоникам 3-й, 10-й и 30-й степеней.

Контакты плотностных неоднородностей выделялись на основе критериев разрывных нарушений по гравиметрическим данным. К таким критериям относятся зоны высоких горизонтальных градиентов, смена знака и сочленение различно ориентированных аномалий; такие зоны прогнозируются, как правило, в диапазоне высот геоида от +10 до –10 м (иногда в более широком диапазоне). Выделение плотностных неоднородностей на основе указанных выше критериев имеет свои ограничения. Эти ограничения обусловлены тем, что используемые карты гравитационных аномалий представлены в прямоугольной проекции, по причине чего изолинии значений геоида в высоких широтах искусственно разрежены и зоны сочленения аномалий визуально не прослеживаются. По данной причине надежное выделение контактов плотностных неоднородностей за пределами диапазона широт более 60° не всегда возможно.

Сведения о сейсмичности регионов взяты по данным Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба РАН» (ФИЦ ЕГС РАН), Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC), Геологической службы США (NEIC). К анализу были привлечены результаты инструментальных наблюдений за сейсмичностью до 2023 г. включительно.

Факты активных разломов в геосинклинальных областях очевидны и сомнений не вызывают. На территории платформ сведения об активных разломах получены по результатам исследований, выполненных рядом авторов [4–6] для Азиатско-Африканского региона. Эти сведения



позже были дополнены новыми материалами наблюдений по территории Урало-Поволжья, частично отраженными в [7]. На территории Урало-Поволжья сведения о позднекайнозойских дислокациях получены в основном по материалам структурно-картировочных и геофизических работ, в результате которых построены геологические карты и профили, подтверждающие наличие здесь активных разломов (рис. 1).

Дополнительно в области Волго-Уральской сейсмогенной структуры активные разломы также были установлены на основе исследования эпицентральных зон сильных землетрясений, в частности Шалкарского (26 апреля 2008 г.), при котором произошла подвижка по протяженному Шалкар-Аксайскому трансформному разлому северо-восточного простирания [7].

На Африкано-Аравийской платформе помимо опубликованных данных [8,9] в качестве доказанных фактов активных разломов служат задокументированные материалы исследователей, установивших наличие таких разломов при экспертном обследовании естественных геологических обнажений (рис. 2).

Результаты исследований

В пределах Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса выделяются региональные сейсмогенерирующие структуры: Волго-Уральская, Средиземноморско-Каспийская, Иорданская, Красноморская, Восточно-Африканская, Центральная-Африканская (рис. 3).

Волго-Уральская линия деформаций (см. рис. 3) левостороннего сдвига относится к зоне с умеренным уровнем сейсмичности. Эта зона определяется северо-восточным простиранием

поля сейсмичности, характеризующимся возникновением сильных землетрясений – 26 апреля 2008 г. ($M = 5,3$) от очаговой зоны древней Восточно-Европейской платформы и землетрясением 4 сентября 2018 г. ($M = 5,4$) от очаговой зоны в пределах герцинской складчатости Урала.

Волго-Каспийская линия деформаций (см. рис. 3) состоит из двух меридиональных структур правостороннего и левостороннего сдвига. Данная линия имеет субмеридиональное направление. В пределах этой линии деформаций известны сильные землетрясения – 25 ноября 2000 г. с магнитудой 6,2 и 6 декабря 2000 г. с магнитудой 7,3. Оба землетрясения находятся в пределах шовной зоны альпийской складчатости Кавказ-Копетдага и эпигерцинской Скифско-Туранской платформы.

Согласно данным ФИЦ ЕГС РАН, решения механизма очага для землетрясения 25 ноября 2000 г. указывает на сброс и сбросо-сдвиг. Нодальные плоскости по разным решениям имеют ориентацию юго-восточное и субмеридиональное направления.

Решение механизма очага для землетрясения 6 декабря 2000 г. указывает на сбросо-сдвиг, но преобладает взбросовая компонента, движение в очаге происходит под действием сжимающих напряжений, оси сжатия субгоризонтальны и ориентированы субмеридионально, что по направлению совпадает с сейсмогенерирующими разломами.

Средиземноморско-Каспийская линия деформаций (см. рис. 3) левостороннего сдвига находится в области альпийской Кавказ-Анатолийской складчатости, которая сформировалась под воздействием давления Аравийской плиты, а ее северо-восточное продолжение проходит

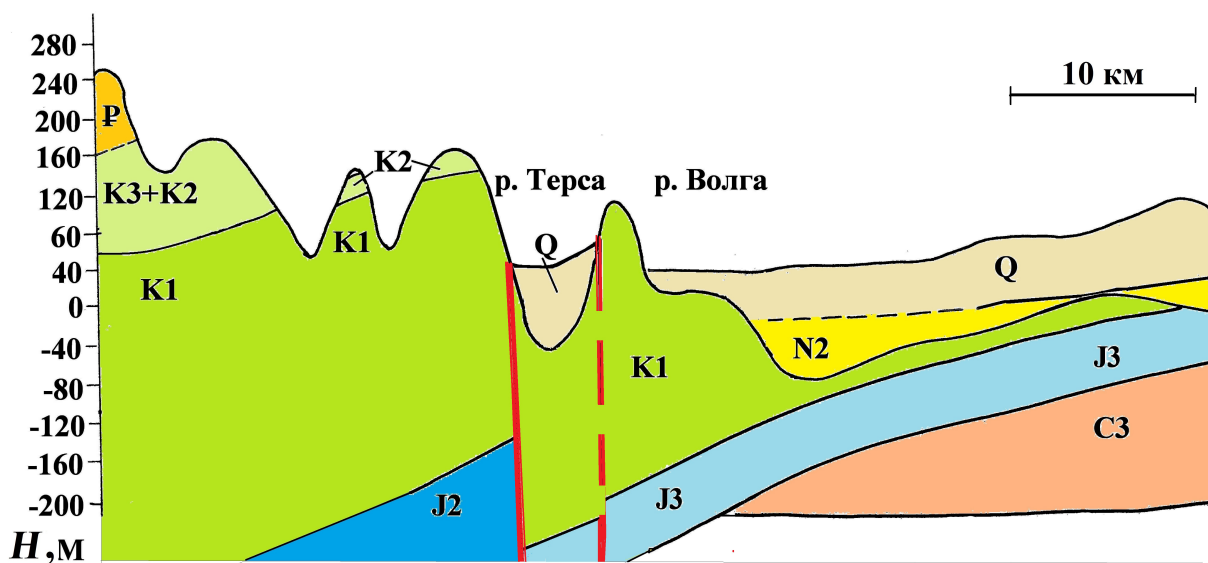


Рис. 1. Активный разлом на территории Восточно-Европейской платформы (приволжская часть Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса) (цвет онлайн)



Рис. 2. Активный разлом в обнажениях неогена аравийской части Африкано-Аравийской платформы. Справа крупным планом показано вертикальное смещение пластов по разлому (фото автора) (цвет онлайн)

по Скифско-Туранской и частично по Восточно-Европейской платформам. Эта линия деформаций является зоной с высоким уровнем сейсмичности и определяется простиранием поля сейсмичности в северо-восточном направлении. Указанная сейсмогенная структура характеризуется сильными землетрясениями, одно из которых произошло 6 февраля 2023 г. в 1 ч. 17 мин (по Гринвичу) и имело магнитуду по разным определениям от 7,8 до 8. Решение для механизма очага этого землетрясения показывает, что nodальная плоскость NP2 ориентирована на юго-запад согласно ФИЦ ЕГС РАН и NEIC и на северо-восток согласно Ломонт-Дохертской земной обсерватории (США). Тип движения по плоскости NP2 левосторонний сдвиг, что в целом совпадает с направлением и кинематикой Средиземноморско-Каспийской линии деформаций (рис. 4).

Другое землетрясение с магнитудой 7,8 произошло 6 февраля 2023 г. в 10 ч. 24 мин (по Гринвичу). Землетрясения 6 февраля 2023 г. можно считать одними из наиболее сильных из всех землетрясений, генерируемых структурами Европско-Африканского сквозного тектонического пояса. После землетрясений с магнитудами 7,8 и 8,0, произошедших 6 февраля 2023 г., в течение дня продолжались землетрясения с магнитудой до 6. Эпицентры землетрясений 6 февраля 2023 г. приурочены к разломам, которые имеют северо-восточное направление и находятся в системе Средиземноморско-Каспийской линии деформаций (см. рис. 4).

В последующее время вдоль Средиземноморско-Каспийской линии деформаций продолжились землетрясения с $M \geq 4$ с одновременной явно выраженной миграцией сейсмической активности на северо-восток. В последующем отмечено возникновение землетрясений в районе



складчатого сооружения Кавказа и далее в восточной приморской части Северного Каспия Восточно-Европейской платформы. Уже в пределах древней платформы, по данным EMSC, 13 февраля 2023 г. возникло землетрясение с $M = 4,9$; информация о нем по данным этого центра приведена на рис. 5¹.

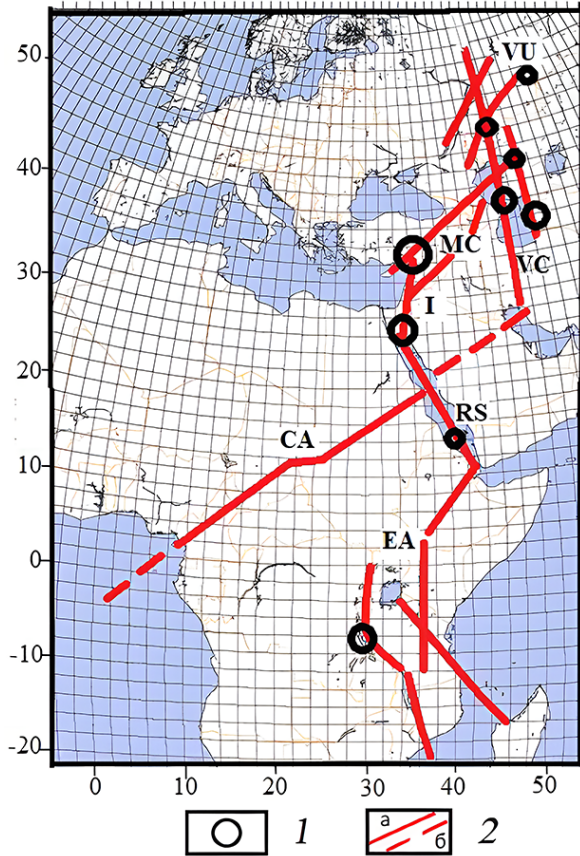


Рис. 3. Основные линии деформаций, соответствующие сейсмогенерирующим структурам Европско-Африканского сквозного тектонического пояса: 1 – эпицентры наиболее сильных землетрясений, произошедших в пределах каждой линии деформаций (большой радиус окружности соответствует большим значениям магнитуд – пояснения в тексте); 2 – линии деформаций: а – установленные, б – предполагаемые; VU – Волго-Уральская, VC – Волго-Каспийская, MC – Средиземноморско-Каспийская, I – Иорданская, RS – Красноморская, EA – Восточно-Африканская, CA – Центрально-Африканская (цвет онлайн)

Землетрясение 13 февраля 2023 г. произошло в очаговой зоне, которая находится в зоне сочленения линий деформаций – Средиземноморско-Каспийской и Волго-Каспийской (см. рис. 3). В этой зоне в период с 2005 по 2020 г. по данным EMSC, произошло 25 землетрясений с магнитудой до 4,4, что свидетельствует

о достаточно высоком сейсмическом потенциале указанной очаговой зоны².

Иорданская линия деформаций (см. рис. 3) левостороннего сдвига относится к зоне с высоким уровнем сейсмичности; она находится в аравийской части древней Африкано-Аравийской платформы, характеризуется полем сейсмичности меридионального направления. Наиболее сильное землетрясение, известное в пределах этой зоны, произошло 22 ноября 1995 г. с $M = 7,2$.

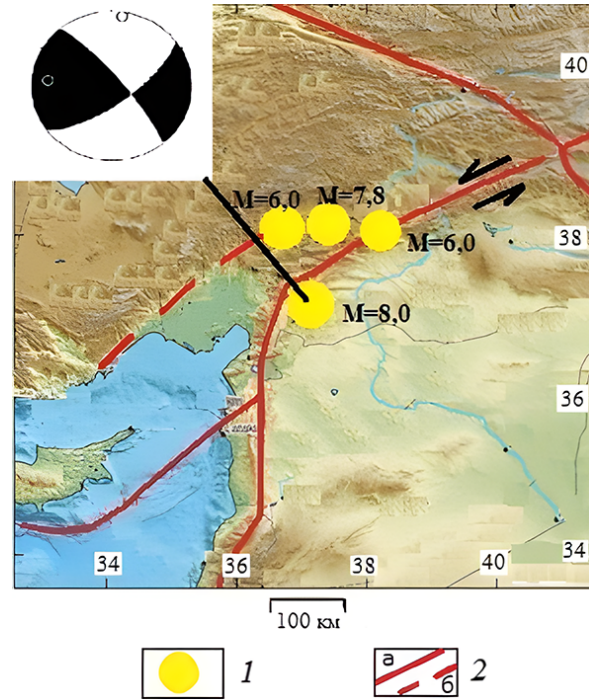


Рис. 4. Положение эпицентров наиболее сильных землетрясений, произошедших 6 февраля 2023 г. относительно разломов левостороннего сдвига Средиземноморско-Каспийской линии деформаций: 1 – эпицентры землетрясений с указанием магнитуды; 2 – тектонические разломы: а – установленные, б – предполагаемые (на врезке показана сферограмма очага землетрясения 6 февраля 2023 г. с $M = 8,0$) (цвет онлайн)

Красноморская линия деформаций (см. рис. 3) растяжения в пределах древней Африкано-Аравийской платформы относится к зонам с высоким уровнем сейсмичности, характеризуется полем сейсмичности юго-восточного направления, сосредоточенным вдоль грабена Красного моря. Однако большинство землетрясений этой сейсмогенной структуры характеризуется магнитудным уровнем до 5, исключение составляет землетрясение 8 июля 2013 г. с $M = 5,5$.

Восточно-Африканская линия деформаций (см. рис. 3) растяжения связана с рифтовыми

¹Информация о землетрясении была удалена с сайта EMSC 14 февраля 2023 г. Первичная информация о землетрясении содержится на сайте мониторинга землетрясений: <https://www.volcanodiscovery.com>.

²По данным EMSC и ФИЦ ЕГС РАН, в данной очаговой зоне 25 апреля 2023 г. произошло еще одно землетрясение с $M = 4,5$.

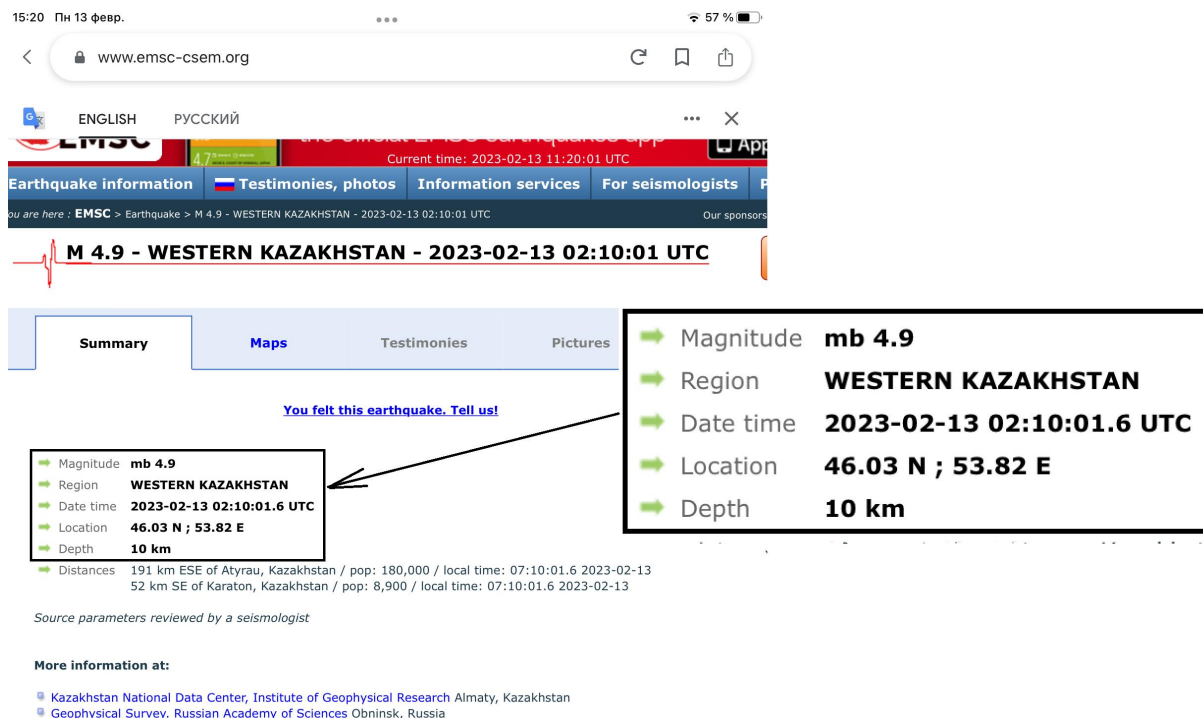


Рис. 5. Скриншот страницы с сайта EMSC с информацией о землетрясении 13 февраля 2023 г.

структурами африканской части древней Африкано-Аравийской платформы. Совокупность структур этой сейсмогенной зоны вытянута в субмеридиональном и юго-восточном направлениях. Она относится к зонам с высоким уровнем сейсмичности и характеризуется частым возникновением землетрясений с магнитудой более 5. Самое сильное землетрясение, зарегистрированное в пределах указанных рифтовых структур, произошло 5 декабря 2005 г. ($M = 6,9$). По данным ФИЦ ЕГС РАН, движение в очаге землетрясения 5 декабря 2005 г. произошло под действием растягивающих напряжений, ориентированных в субширотном направлении. Обе нодальные плоскости имеют близкие простирания (субмеридиональные), что соответствует направлению разлома (см. рис. 3). Тип движения – сброс.

Центрально-Африканская линия деформаций (см. рис. 3) правостороннего сдвига пересекает всю африканскую часть Аравийско-Африканской платформы с юго-запада на северо-восток. Имея достаточно большую протяженность, эта линия деформаций характеризуется, тем не менее, низким уровнем сейсмической активности с возникновением относительно слабых и редких землетрясений с магнитудами, не превышающими 4,5.

Центрально-Африканский сдвиг находит отражение в аномалиях геоида по гармоникам 30-й степени. Вместе с тем граница между положительными и отрицательными аномалиями геоида по гармоникам 30-й степени не выглядит в достаточной степени контрастной, связь обла-

сти смены знака аномалий с линией деформаций Центрально-Африканского сдвига, однако, прослеживается (рис. 6). Конфигурация контакта аномалий позволяет предположить, что Центрально-Африканская линия деформаций на северо-востоке не ограничивается Красноморской структурой, а продолжается далее на северо-восток в область аравийской части Африкано-Аравийской платформы и далее, по всей вероятности, в область альпийской складчатости (см. рис. 3, 6).

Связь контакта аномалий геоида с Центрально-Африканским сдвигом в области африканской части платформы более очевидной представляется по гармоникам 10-й степени (см. рис. 6).

По аномалиям геоида гармоник 30-й и 10-й степеней также уверенно отображаются субмеридиональные линии деформаций Восточно-Европейской и Скифско-Туранской платформ.

Наибольшее соответствие линий сейсмогенных деформаций зонам сочленения аномалий геоида определяется при анализе таковых по гармоникам 3-й степени (см. рис. 6). Такие соответствия линиям деформаций северо-восточного направления отмечены в области Восточно-Европейской платформы, складчатых областей Урала, Кавказа и Восточной Анатолии, субмеридионального направления – в области аравийской части Африкано-Аравийской платформы и юго-восточного простирания – в области африканской части Африкано-Аравийской платформы.

Учитывая глубинные характеристики аномалий геоида для гармоник разных степеней можно

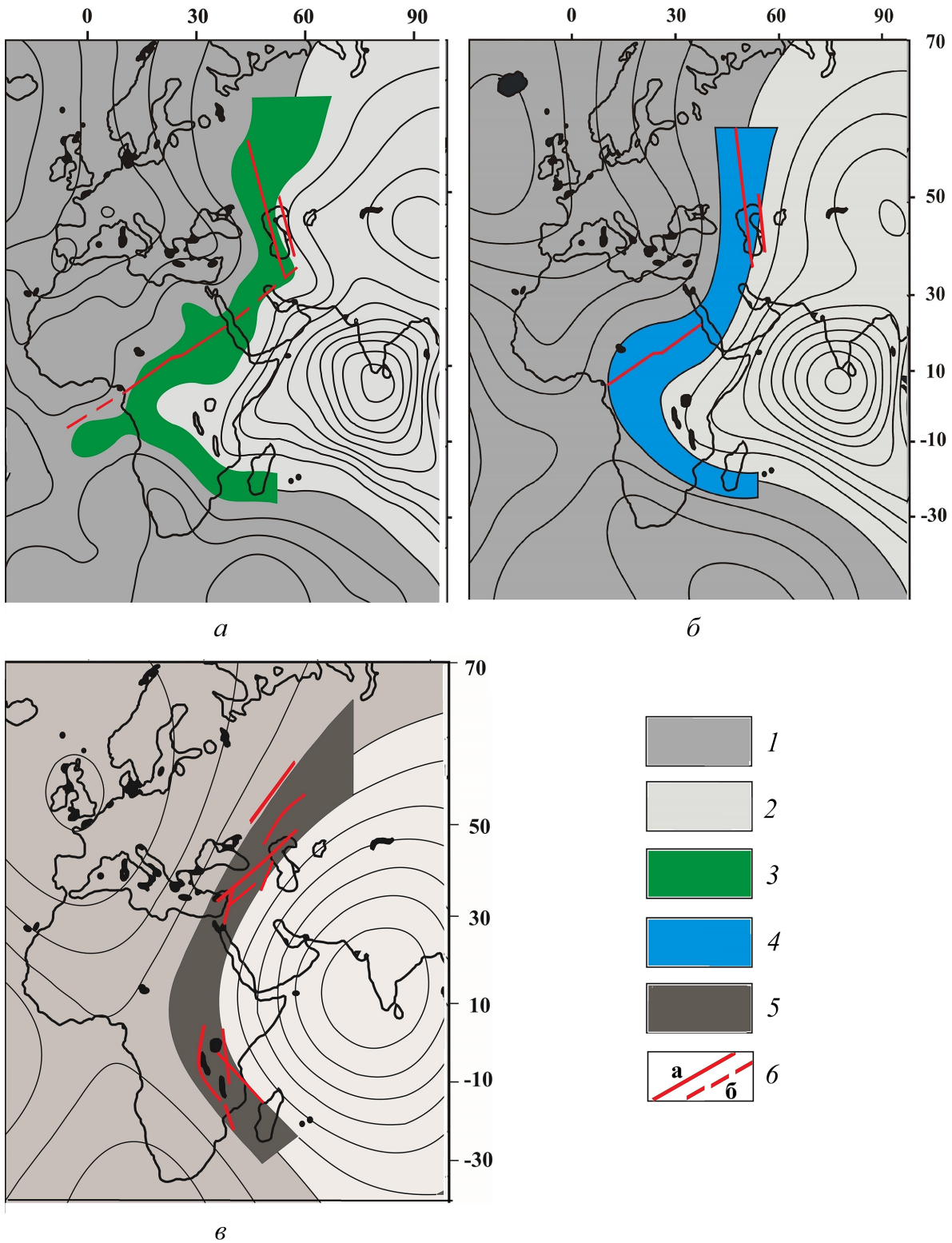


Рис. 6. Положение линий сейсмогенерирующих деформаций по результатам анализа аномалий поверхности геоида по гармоникам 30-й(*а*), 10-й (*б*) и 3-й (*в*) степени: 1 – максимумы аномалий геоида, 2 – минимумы аномалий геоида; области смены знака аномалий геоида гармоник: 3 – 30-й степени, 4 – 10-й степени, 5 – 3-й степени; 6 – линии сейсмогенерирующих разломов: *а* – установленные, *б* – предполагаемые (цвет онлайн)



предположить, что чем ниже степень гармоник, соответствующих тем или иным аномалиям, тем более глубокие слои Земли в этих аномалиях находят отображение. Иными словами, можно считать, что наиболее глубокое заложение имеют линии деформаций, отображающиеся в аномалиях геоида 3-й степени.

Основываясь на сопоставлении аномалий геоида с данными других геофизических исследований: спутниковой магниторазведки, глубинных сейсмических методов, сведений о затухании сейсмических волн землетрясений и глубине гипоцентров землетрясений, – можно косвенно определить глубину неоднородностей, отображающихся в этих аномалиях.

В аномалиях геоида по гармоникам 30-й степени отображаются неоднородности верхней части земной коры.

Присутствие в литосфере зон с наименьшим затуханием сейсмических волн от землетрясений с глубинами очагов, превышающих 20 км, их соответствие в плане зонам сочленения аномалий геоида, а также материалы глубинной сейсморазведки [2, 10, 11, 12] дают основание считать, что аномалии геоида по гармоникам 10-й степени отображают неоднородности, расположенные на глубинах до 60 км.

Сейсмогенерирующие структуры, соответствующие зонам сочленения аномалий геоида по гармоникам 3-й степени, видимо, имеют заложение, значительно превышающее глубину структур, отражающихся по аномалиям геоида 10-й степени. Согласно данным о глубине очагов землетрясений, можно сделать вывод о том, что линии деформаций, отражающиеся в аномалиях геоида гармоник 3-й степени, находятся в интервале глубин до 150 км.

Заключение

Факт существования Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса находит свое подтверждение в материалах спутниковой гравиметрической съемки. По результатам изучения распределения аномалий геоида по гармоникам разных степеней выявилась особенность, заключающаяся в изменении направлений контактов аномалий при переходе через Центрально-Африканскую линию деформаций.

Южнее Центрально-Африканской линии деформаций контакты аномалий всех гармоник имеют направление с северо-запада на юго-восток.

К северу от Центрально-Африканской линии деформаций контакты аномалий разных гармоник меняют свою ориентировку, а именно северо-восточное направление отмечается для гармоник 3-й степени, меридиональное – для гармоник 10-й степени и северо-западное – для гармоник 30-й степени. Данное обстоятельство, очевидно, свидетельствует о перестройке структурных планов глубинных линий деформаций при переходе

от более ранней фазы тектогенеза к более поздней; все указанные линии деформаций испытали активизацию в позднекайнозойское время.

В пределах Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса сейсмичность установлена для региональных структур всех направлений. Как следует из анализа магнитуд землетрясений, сейсмогенерирующие структуры альпийской складчатости, находящиеся в пределах контактов аномалий геоида, имеют сейсмический потенциал, достаточный для возникновения землетрясений с магнитудой до 8. В свете имеющихся данных наибольшим сейсмическим потенциалом обладают структуры Волго-Каспийской и Срезиземноморско-Каспийской линий деформаций.

Независимые исследования, основанные на построении графиков повторяемости землетрясений, проведенные авторами работы [13], позволили сделать вывод о возможности возникновения в пределах Срезиземноморско-Каспийской линии деформаций землетрясений, магнитуды которых могут превышать наблюдаемые за инструментальный период. При этом очевидна миграция сейсмической активности вдоль Срезиземноморско-Каспийской линии деформаций в северо-восточном направлении с понижением магнитуд вероятных землетрясений до 7 – в районе складчатого сооружения Кавказа. Миграция сейсмической активности далее в северо-восточном направлении от Скифо-Туранской платформы через Восточно-Европейскую платформу до складчатого сооружения Урала также может сопровождаться возникновением местных очагов землетрясений с магнитудой до 5,5. Наряду с возникновением местных очагов следует принимать во внимание и возможность усиления интенсивности сотрясений ввиду незначительного затухания сейсмических волн вдоль меридиональных структур сквозного тектонического пояса при землетрясениях от удаленных очагов области альпийской складчатости.

Данное обстоятельство следует учитывать при оценке сейсмической опасности регионов.

Библиографический список

1. Глубинные разломы сквозные // Геологический словарь: в 2 томах. Москва: Недра, 1978. Т. 1. С. 176.
2. Огаджанов В. А., Огаджанов А. В. Физико-геологические характеристики платформенной части Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса // Геофизика. 2014. № 4. С. 33–39.
3. Bowin C. Global gravity maps and the structure of the Earth // The utility of Regional gravity and Magnetic Anomaly Maps / ed. W. J. Hinze; Soc. of Exploration. Geophysicists. Oklahoma, 1985. P. 88–101.
4. Trifonov V. G. The Map of active Faults in Eurasia: Principles. Methods and Results // Journal of Earthquake Prediction Research. 1996. Vol. 5, № 6. P. 326–347.



5. Трифонов В. Г. Живые разломы земной коры // Соросовский образовательный журнал. 2001. Т. 7, № 7. С. 66–44.
6. Леонов Ю. Г., Гуценко О. И., Копп М. Л., Расцветев Л. М. Взаимосвязь позднекайнозойских напряжений и деформаций в Кавказском секторе Альпийского пояса и в его северном платформенном обрамлении // Геотектоника. 2001. № 1. С. 36–59.
7. Взрывы и землетрясения на территории европейской части России / редакторы В. В. Адушкина, А. А. Маловичко. Москва : ГЕОС, 2013. 360 с.
8. Хаин В. Е. Общая геотектоника. Москва : Недра, 1973. 512 с.
9. Dorbath C., Dorbath L., Fairhead J. D., Stuart G. W. A teleseismic delay time study across the Central African Shear Zone in the Adamawa region of Cameroon, West Africa // Geophysics. 1986. № 86. P. 751–756.
10. Огаджанов В. А. Глубинные меридиональные структуры Восточно-Европейской платформы // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2022. Т. 22, вып. 3. С. 185–190. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2022-22-3-185-190>
11. Огаджанов В. А. О проявлениях сейсмичности в Поволжье после сильных землетрясений в бассейне Каспийского моря // Физика Земли. 2002. № 4. С. 48–54.
12. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы / под редакцией Н. В. Шарова, А. А. Маловичко, Ю. К. Щукина : в 2 книгах. Петрозаводск : Кар НЦ РАН, 2007. Кн. 1. 381 с.
13. 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.

Поступила в редакцию 02.05.2023; одобрена после рецензирования 10.07.2023; принята к публикации 28.07.2023
The article was submitted 02.05.2023; approved after reviewing 10.07.2023; accepted for publication 28.07.2023