



Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 274–280
Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 274–280
<https://geo.sgu.ru>

<https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-4-274-280>

Научная статья
УДК 550.34.013.4



Физико-геологическая модель Шалкарской очаговой зоны землетрясений

В. А. Огаджанов

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

Огаджанов Виктор Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, ozhva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2645-4110>

Аннотация. Шалкарская очаговая зона характеризуется наиболее сильными землетрясениями из всех, произошедших на территории юго-востока Восточно-Европейской платформы. Разработана физико-геологическая модель и определены параметры Шалкарской очаговой зоны, которые могут быть использованы для оценки интенсивности сотрясений от возможных землетрясений. Показана связь землетрясений юго-востока Восточно-Европейской платформы с напряженно-деформированным состоянием мантии.

Ключевые слова: землетрясение, модель, разлом, земная кора, мантия

Для цитирования: Огаджанов В. А. Физико-геологическая модель Шалкарской очаговой зоны землетрясений // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 4. С. 274–280. <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-4-274-280>

Статья опубликована на условиях лицензии Creative Commons Attribution 4.0 International (CC-BY 4.0)

Article

Physical and geological model of the Shalkar earthquake focal zone

V. A. Ogadzhanov

Saratov State University, 83 Astrakhanskaya St., Saratov 410012, Russia

Viktor A. Ogadzhanov, ozhva@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-2645-4110>

Abstract. The Shalkar earthquake focal zone is characterized by the strongest earthquakes of all that occurred in the southeast of the East – European Platform. A physical and geological model has been developed, on the basis of which the parameters of the Shalkar earthquake focal zone have been determined, which can be used to assess the intensity of shaking from possible earthquakes. The relationship between earthquakes in the southeast of the East European platform and deformations in the mantle is shown.

Keywords: earthquakes, model, fault, crust, mantle

For citation: Ogadzhanov V. A. Physical and geological model of the Shalkar earthquake focal zone. *Izvestiya of Saratov University. Earth Sciences*, 2021, vol. 21, iss. 4, pp. 274–280 (in Russian). <https://doi.org/10.18500/1819-7663-2021-21-4-274-280>

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

Введение

Шалкарская очаговая зона землетрясений является одной из наиболее активных на юго-востоке Восточно-Европейской платформы. В этой очаговой зоне известно пять землетрясений с магнитудами от 3,8 до 5,3 (таблица).

Наиболее сильное из землетрясений Шалкарской зоны ($M = 5,3$) [1] произошло 26 апреля 2008 г. с интенсивностью сотрясений в эпицентре семь баллов по шкале MSK-64. Землетрясение подобного магнитудного уровня и интенсивности для Восточно-Европейской платформы является

событием достаточно редким, поэтому оценка параметров данной очаговой зоны представляется особенно актуальной.

Для оценки параметров очагов возможных землетрясений необходимо исследовать их тектоническую позицию, глубинные геодинамические условия, физические свойства литосферы, характеризующие ее напряженно-деформированное состояние. С этой целью необходимо построение физико-геологической модели. Построению модели Шалкарской очаговой зоны землетрясений благоприятствует наличие кондиционного геофизического материала: сейсморазведки, в частности



профилей глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), расположенных в непосредственной близости от данной очаговой зоны, магнитотеллурического зондирования (МТЗ), а также гравиразведки и магниторазведки масштабов 1 : 1000000 и 1 : 200000.

Методика исследования

Исходным сейсмологическим материалом для определения параметров Шалкарской очаговой зоны является каталог тектонических землетрясений инструментального периода наблюдений (см. таблицу). Каталог составлен по данным Международного сейсмологического центра (ISC), Национального центра информации о землетрясениях США (NEIC), Европейско-Средиземноморского сейсмологического центра (EMSC), Геофизической службы РАН (ГС РАН) и опубликованным материалам.

Землетрясение 26.04.2008 г. произошло вблизи озера Шалкар Западно-Казахстанской области Республики Казахстан, в нескольких километрах от населённых пунктов Шалкар и Рыбцех.

Согласно макросейсмической информации в семибалльную зону попали поселки Рыбцех и Шалкар. В шестibalльную зону – поселки Ерсары и Сарьюмир. В Уральске, находящемся на расстоянии примерно 80 км от эпицентра, землетрясение проявилось интенсивностью сотрясений четыре балла, в Оренбурге – на расстоянии 270 км от эпицентра – три балла, в Самаре – на расстоянии 310 км от эпицентра – в два балла шкалы MSK-64 [1].

Параметры очага землетрясения 26.04.2008 г. были получены в Службе срочных донесений ГС РАН по первым вступлениям продольных волн на 34 станциях, расположенных на расстоянии от 2,1° до 93° и равномерно распределённых азимутально, включая ближайшую к эпицентру сейсмическую станцию «Саратов»; магнитуда землетрясения, согласно данным этих станций, была оценена по объёмным волнам и составила 5,3. Позднее по поверхностным волнам Рэлея, зарегистрированным на пяти станциях – «Арти»,

«Кисловодск», «Обнинск», «Ловозеро» и «Пулков», – определена магнитуда 4,7 [1–3]. В дальнейшем в ГС РАН по обмену поступили данные ряда международных центров, а также результаты станционной обработки некоторых станций ГС РАН. Согласно данным ряда международных агентств, величина магнитуды этого землетрясения варьирует в диапазоне от 4,3 до 5,1 [1]. Глубина очага землетрясения 26.04.2008 г., по данным этих агентств, составляет 0–10 км. Дополнительные исследования по поиску и интерпретации глубинных фаз, проведённые Варшавским агентством (WAR), дали основание для увеличения глубины очага до 18 км. В источнике [3] глубина гипоцентра условно принята как 33 км.

При такой степени неопределённости параметров очага (магнитуда, глубина) важным является обоснование такой модели очаговой зоны Шалкарских землетрясений, при которой в наибольшей степени согласовываются значения магнитуды, глубины очага и наблюдаемой интенсивности.

Для построения согласованной модели очаговой зоны Шалкарских землетрясений был применён детерминированный подход, основанный на расчете интенсивности при разных значениях магнитуд и глубин гипоцентров и определении соответствия параметров очага фактической интенсивности сотрясений.

Для оценки параметров очагов возможных землетрясений Шалкарской очаговой зоны на основе детерминированного подхода были построены физико-геологические модели. Для этого были привлечены данные по тектонике района ее расположения, глубинному строению и физическим свойствам литосферы.

Очаговая зона Шалкарских землетрясений в тектоническом отношении находится в северной части Прикаспийской впадины докембрийской Восточно-Европейской платформы; восточная часть Восточно-Европейской платформы пересечена с юга-юго-запада на север-северо-восток сегментом планетарного сквозного Европейско-Африканского тектонического пояса (рис. 1). Дислокации Европейско-Африканского тектонического пояса

Каталог землетрясений Шалкарской очаговой зоны по инструментальным данным

Номер события	Год	Месяц	День	Часы	Минуты	Секунды	Координаты эпицентра		Глубина гипоцентра, км	Магнитуда	Интенсивность, баллы MSK-64	Источник
							°с.ш.	°в.д.				
1	1976	06	26	11	02	04	50,30	51,00	–	3,8	–	[2]
2	1989	05	14	11	46	56	50,87	51,38	–	4,5	–	ISC, NEIC
3	2008	04	26	13	14	53,4	50,58	51,73	10-18	4,3-5,3	7	[1], WAR
4	2008	07	18	19	36	40,3	50,72	51,92	–	4,0	–	ГС РАН
5	2011	12	30	23	58	17	50,71	51,63	26	4,3	–	ГС РАН

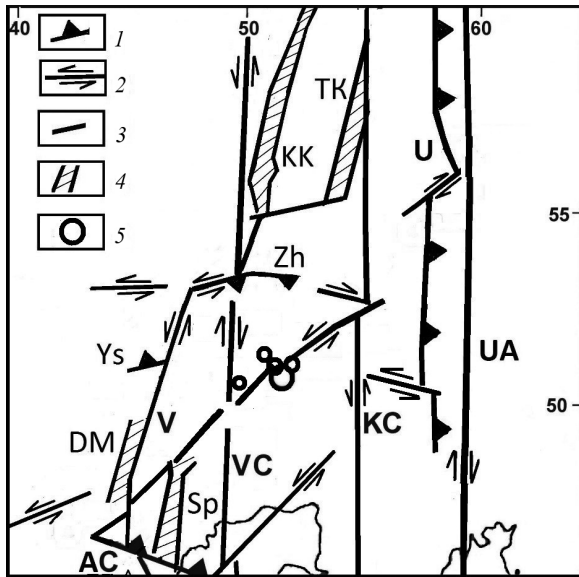


Рис. 1. Позиция Шалкарской очаговой зоны землетрясений относительно дислокаций Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса: 1 – зоны преобладающих деформаций сжатия: региональных: AC – Арало-Каспийская, U – Уральская; локальных: Es – Елшано-Сергиевская, Zh – Жигулевская; 2 – зоны преобладающих деформаций сдвига и растяжения: V – Волжская, VC – Волго-Каспийская, KC – Камско-Каспийская, UA – Урало-Аральская; 3 – зоны дизъюнктивных дислокаций с неустановленной кинематикой; 4 – структуры раздвига, активные в новейшее время тектогенеза; KK – Казанско-Кажимский авлакоген, TK – Верхнекамский авлакоген, DM – Доно-Медведицкий авлакоген, SP – Сарпинский авлакоген; 5 – эпицентры землетрясений Шалкарской очаговой зоны

имеют глубокое заложение с корнями, уходящими в кристаллическую кору и мантию [4–6] (рис. 2, 3). Системы дислокаций Европейского сегмента этого пояса (см. рис. 1) активизированы в новейшую эпоху тектогенеза.

Новейшая тектоническая активность указанных дислокаций проявилась в основном вдоль направления ЮЮЗ – ССВ и по кинематической характеристике в большей части представляет собой сдвиги.

В частности, при землетрясении 26.04.2008 г. произошла подвижка по трансформному тектоническому разлому северо-восточного простирания мимо озера Шалкар в сторону города Аксай (Бурлинский район Казахстана); разлом представляет собой левосторонний сдвиг [3].

В эпицентральной области, между поселками Рыбцех и Шалкар, проявились водно-песчаные гейзеры, которые выстроены в линию субширотного направления. По свидетельству очевидцев фонтаны этих гейзеров были высотой до одного метра; обнаружено девять конусов от песчано-водных гейзеров [3].

Модели литосферы строились вдоль двух ближайших к Шалкарской очаговой зоне профилей ГСЗ Элиста – Бузулук и Челкар – Волгоград [7]; расположение этих профилей приведено на рис. 2, 3. Вдоль указанных профилей ГСЗ была проведена интерпретация гравитационных аномалий в редукции Буге [6], на основании которой были дополнены сведения о глубинном строении и физических свойствах литосферы.

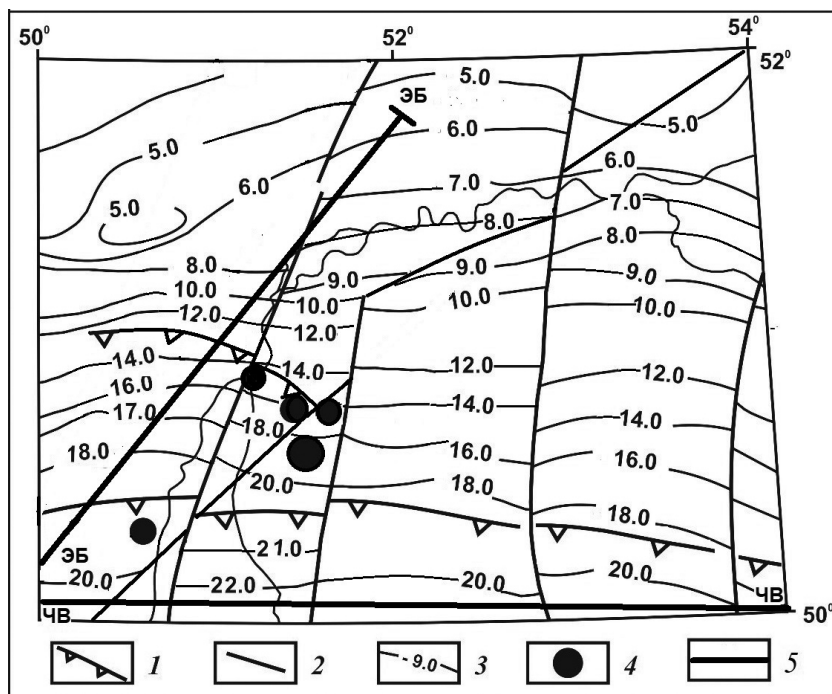


Рис. 2. Позиция Шалкарской очаговой зоны землетрясений в структуре поверхности докембрийского фундамента: 1 – крупные сбросы в докембрийском фундаменте; 2 – разломы; 3 – изогипсы по поверхности докембрийского фундамента; 4 – эпицентры землетрясений Шалкарской очаговой зоны; 5 – разрезы глубинного строения вдоль профилей ГСЗ: Элиста – Бузулук (ЭБ), Челкар – Волгоград (ЧВ)

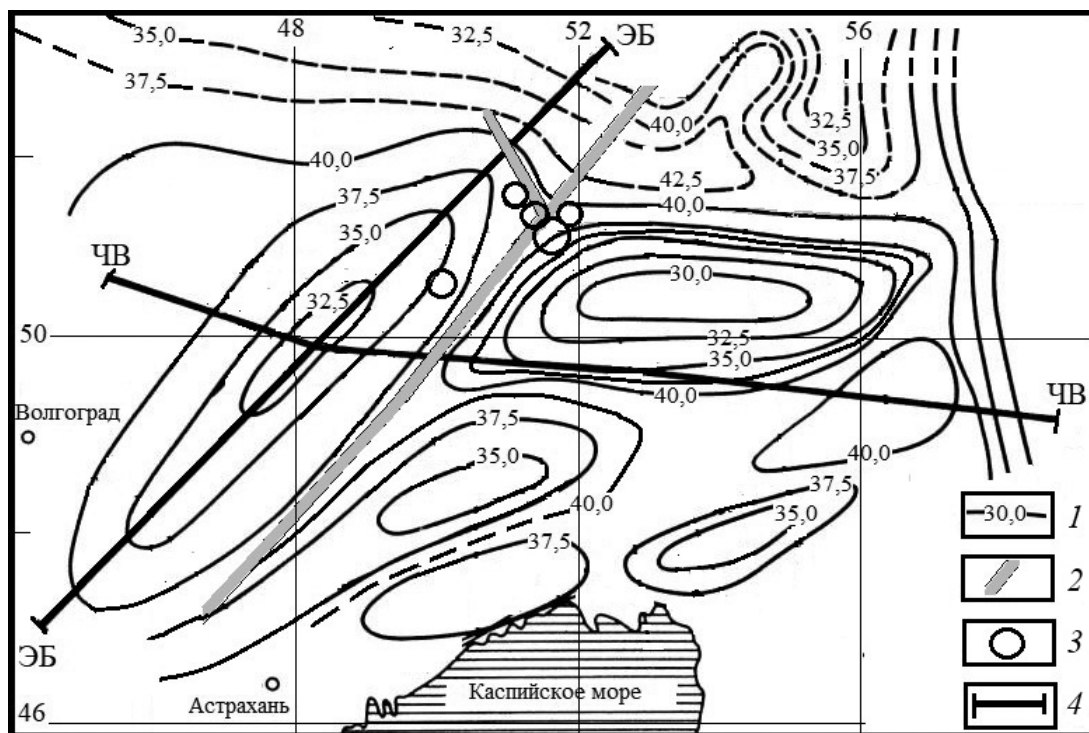


Рис. 3. Позиция Шалкарской очаговой зоны землетрясений в структуре поверхности мантии: 1 – изогипсы по поверхности мантии; 2 – разломы в мантии; 3 – эпицентры землетрясений Шалкарской очаговой зоны; 4 – профили ГСЗ: Челкар – Волгоград (ЧВ), Элиста – Бузулук (ЭБ)

Относительно поверхности кристаллического фундамента Шалкарская очаговая зона землетрясений приурочена к крупным геоструктурам Прикаспийской впадины – тектоническим сбросам северного борта, в том числе Центрально-Прикаспийского грабена, субширотного направления, – и разломам сквозного тектонического пояса направления ЮЮЗ-ССВ и субмеридиональным (см. рис. 2). Таким образом, направления профилей ГСЗ, которые служили основой для построения, физико-геологических моделей, расположены вкрест простирания указанных геоструктур и дают наиболее полную картину о позиции очагов землетрясений данной очаговой зоны землетрясений в структуре кристаллического фундамента.

Относительно поверхности мантии Шалкарская очаговая зона землетрясений расположена в зоне сочленения наиболее крупных структур Прикаспийской впадины: Аралсорского поднятия простирания ЮЗ – СВ и Хобдинского поднятия широтного простирания. Данные ГСЗ и гравиразведки позволяют считать, что указанные два поднятия сочленяются по глубинному разлому направления ЮЗ – СВ (см. рис. 3).

Сопоставление гипоцентров землетрясений 26.04.2008 г. и 30.12.2011 г. с профилем ГСЗ Элиста – Бузулук, расположенным западнее очаговой зоны Шалкарских землетрясений (рис. 2, 3, 4) показывает, что эти гипоцентры приурочены к участкам наиболее резких изменений глубин поверхностей кристаллического фундамента и ман-

тии, а также повышенного градиента в изменениях по латерали скоростей сейсмических волн внутри мантии, что свидетельствует о проникновении разломов ниже подошвы кристаллической коры. Глубже гипоцентров землетрясений, в нижней части земной коры и верхней мантии, по данным МТЗ, выделяется зона аномально высокой электропроводности. Эта зона, по данным МТЗ, в плане совпадает с прогнозируемой по данным гравиразведки зоной разуплотнения в верхней мантии. Тем самым, по данным МТЗ, и гравиразведки в области расположения гипоцентров землетрясений выделяется зона разуплотнения, которая может быть отождествлена с глубинным диапиром. Аномально высокие значения скоростей сейсмических волн в области этого диапира свидетельствуют о том, что он находится в напряженном состоянии.

В соответствии с дилатационной моделью очага землетрясений, подробно описанной в работе [8], напряжения в дилатирующем объеме обуславливают формирование диапировой структуры, а внедрение диапира в перекрывающие его толщи приводит к их деформации с образованием разрывных нарушений и, следовательно, зон возникновения очагов землетрясений.

При динамических воздействиях масс диапировой структуры могли быть активированы глубинные разломы с возникновением сейсмичности. В соответствии с изложенным, формирование очагов землетрясений в толщах, перекрывающих

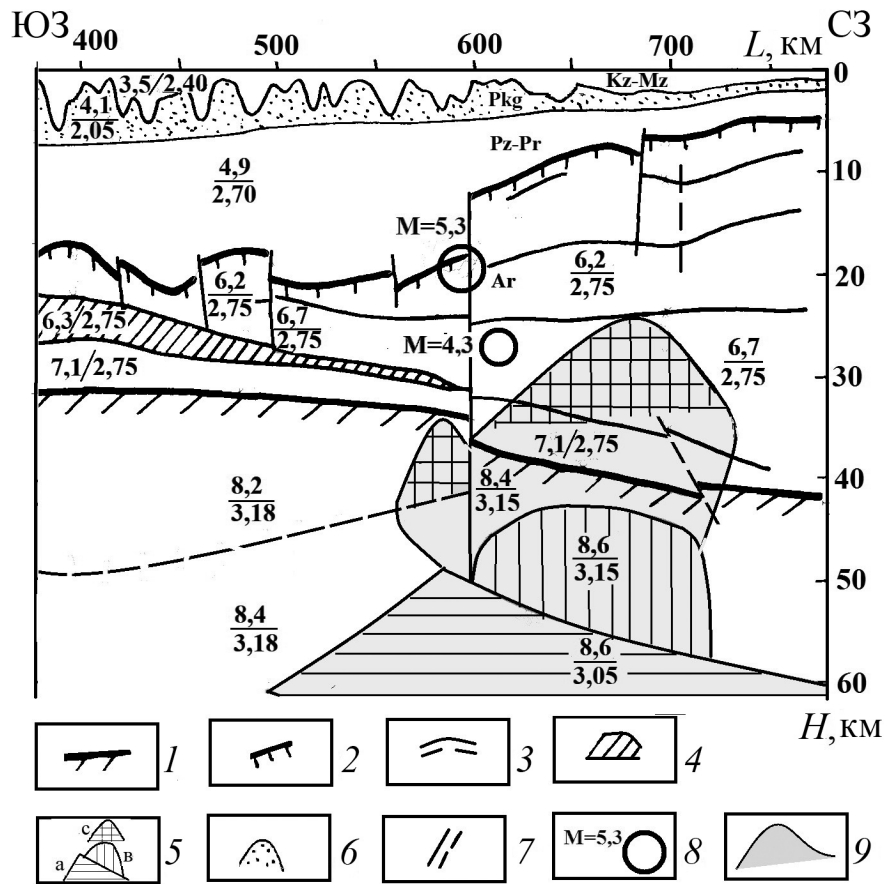


Рис. 4. Физико-геологическая модель Шалкарской очаговой зоны землетрясений вдоль части профиля ГСЗ Элиста – Бузудук: 1 – поверхность докембрийского фундамента; 2 – поверхность мантии; 3 – сейсмические границы внутри докембрийского фундамента и мантии; 4 – слои пониженной скорости; 5 – блок пониженной плотности (а), блок повышенных скоростей сейсмических волн (б), блок высокой электропроводности (с); 6 – соленосные толщи; 7 – разрывные нарушения; 8 – гипоцентры землетрясений Шалкарской очаговой зоны 26.04.2008 г. и 30.12.2011 г. со значениями магнитуд; 9 – зона глубинного диапира; цифрами в числителе дроби указаны величины скоростей продольных волн (км/с), в знаменателе – величины плотностей ($\cdot 10^3$ кг/м³). Положение профиля показано на рис. 2, 3

структуру глубинного диапира (см. рис. 4), представляется вполне обоснованным.

Сопоставление гипоцентров землетрясений 26.04.2008 г. и 30.12.2011 г. с профилем ГСЗ Челкар – Волгоград, расположенным южнее очаговой зоны Шалкарских землетрясений (рис. 2, 3, 5), показывает, что эти гипоцентры приурочены к глубинному разлому, нарушающему поверхности кристаллического фундамента и мантии и проникающему во внутреннюю часть мантии; данное обстоятельство также свидетельствует о природе Шалкарской зоны очагов землетрясений как обусловленной процессами, происходящими ниже подошвы земной коры.

Детерминированный подход к оценке правдомерности предложенной модели Шалкарской очаговой зоны землетрясений основан на сопоставлении интенсивности расчетных значений сейсмических сотрясений и значений сотрясений по макросейсмическим данным. Макросейсмиче-

ские данные были получены для землетрясения 26.04.2008 г.

Расчетная интенсивность землетрясения в эпицентре и городах Уральск, Оренбург и Самара была определена по уравнению Блейка – Шебалина (закон затухания интенсивности сотрясений с расстоянием)

$$I_i = bM - v \lg \sqrt{\Delta_i^2 + h^2} + c, \quad (1)$$

где M – магнитуда землетрясения, I_i – интенсивность сотрясений на эпицентральной дистанции Δ_i , h – глубина гипоцентра, b , v и c – константы (средние значения для землетрясений, очаги которых в земной коре $b = 1,5$; $v = 3,5$ и $c = 3,0$).

Следует обратить внимание на то, что вычисленные значения интенсивности сотрясений по формуле (1) дают их оценки в предположении однородной геологической среды. В реальных геологических средах, определяемых гетероген-



ностью литосферы по физическим свойствам, особенностями тектонических и геодинамических характеристик, местных грунтовых условий, фактическая интенсивность сотрясений может отличаться от расчетной.

карских землетрясений при данных значениях магнитуд и глубин очагов может считаться согласованной.

Заключение

Из результатов физико-геологического моделирования, выполненного на основе интерпретации геофизических и сейсмологических данных, следует вывод, что очаги землетрясений Шалкарской зоны могут возникать вследствие не только деформаций земной коры, но и мантии.

По данным EMSC, в пределах юго-восточной части докембрийской Восточно-Европейской платформы известны землетрясения в южной части Прикаспийской впадины с глубинами очагов до 60 км.; глубина поверхности мантии в данном районе 35–38 км, что указывает на размещение очагов землетрясений в верхней мантии.

По данным наблюдений на Саратовском геодинамическом полигоне в 1999–2007 гг., в южной части Волго-Уральской антеклизы и северо-западной части Прикаспийской впадины также известны землетрясения с глубинами очагов до 60–65 км [9] при глубине поверхности мантии 35–40 км.

Наличие очагов землетрясений в верхней мантии рассматриваемого региона может объясняться активностью дислокаций Европско-Африканского сквозного тектонического пояса, которые, как отмечалось выше, имеют глубокое заложение; исходя из этого физико-геологическая модель Шалкарской очаговой зоны, определяющая связь землетрясений с напряженно-деформированным состоянием мантии, создает основу для оценки параметров возможных землетрясений, принимая во внимание их обусловленность геодинамической активностью дислокаций указанного тектонического пояса.

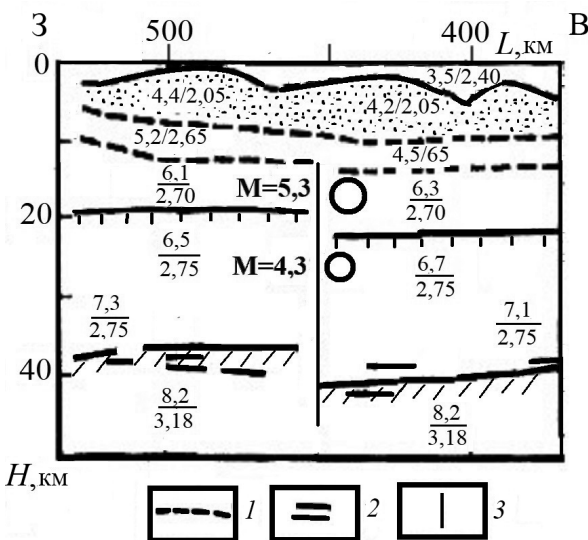


Рис. 5. Физико-геологическая модель Шалкарской очаговой зоны землетрясений вдоль части профиля ГСЗ Челкар – Волгоград: 1 – границы в подсолевых отложениях Прикаспийской впадины; 2 – отражающие границы вблизи поверхности мантии; 3 – глубинный разлом. Положение профиля показано на рис. 2, 3. Остальные условные обозначения см. рис. 4

Результаты исследований и их обсуждение

Расчеты интенсивности Шалкарского землетрясения 26.04.2008 г. в разных пунктах проведены для значений магнитуд 4,7 и 5,3 по формуле (1).

При параметрах очага $H = 10–18$ км и $M = 4,7$ расчетная интенсивность сотрясений значительно меньше фактической, определенной по макросейсмическим данным [1]; наиболее существенна разница между расчетными и наблюдаемыми значениями интенсивности в пунктах Оренбург и Самара, где расчетная интенсивность в среднем составляет 1,5 и 1,4 балла по шкале MSK-64 соответственно. Отсюда следует, что при магнитуде землетрясения 26.04.2008 г., равной 4,7, в городах Оренбург и Самара макросейсмических проявлений, описание которых приведено в [1], не должно было наблюдаться.

При параметрах очага $H = 10–18$ км и $M = 5,3$ вычисленные значения интенсивности в Оренбурге составляют в среднем 2,5, в Самаре – 2,2 балла по шкале MSK-64; таким образом, при этих параметрах очага расчетные значения сотрясений в наибольшей степени согласуются с наблюдаемыми, а детерминированная физико-геологическая модель очаговой зоны Шал-

Библиографический список

1. Огаджанов В. А., Чепкунас Л. С., Габсатарова И. П. Шалкарское землетрясение 28 апреля 2008 г. // Связь поверхностных структур с глубинными : материалы XIV международной конференции. Петрозаводск : Карельский научный центр РАН, 2008. С. 86–89.
2. О каталоге землетрясений Среднего и Нижнего Поволжья / В. А. Огаджанов, Л. С. Чепкунас, Р. С. Михайлова [и др.] // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году : сборник научных трудов. Москва : Геофизический центр РАН, 2001. С. 119–127.
3. Взрывы и землетрясения на территории Европейской части России / под редакцией В. В. Адушкина, А. А. Моловичко. Москва : ГЕОС, 2013. 360 с.
4. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. Петрозаводск : Издательство Карельского НЦ, 2007. 381 с.
5. Шатский Н. С. О глубоких дислокациях, охватывающих и платформы, и складчатые области (Поволжье и



Кавказ) // Известия АН СССР. Серия Геология. 1948. № 5. С. 39–66.

6. *Огаджанов В. А., Огаджанов А. В.* Физико-геологические характеристики платформенной части Европейско-Африканского сквозного тектонического пояса // Геофизика. 2014. № 4. С. 33–39.

7. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР / И. П. Косминская, Н. И. Давыдова,

А. В. Егоркин [и др.] ; ответственный редактор С. М. Зверев. Москва : Наука, 1980. 184 с.

8. *Огаджанов В. А., Огаджанов А. В.* К вопросу о формировании очагов землетрясений при дилатации горных пород // Геофизика. 2016. № 3. С. 34–39.

9. *Огаджанов В. А., Огаджанов А. В.* Аномалии геофизических полей при дилатации горных пород // Геофизика. 2013. № 6. С. 65–69.

Поступила в редакцию 22.07.2021, после рецензирования 20.08.2021, принята к публикации 20.09.2021
Received 22.07.2021, revised 20.08.2021, accepted 20.09.2021