

Структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений)

© Ю. М. Вольфман, 2013

Институт геофизики НАН Украины, Киев, Украина

Поступила 17 декабря 2012 г.

Представлено членом редколлегии О. Б. Гинтовым

На підставі результатів аналізу структурно-кінематичних парагенезисів розривів і зміщень у вогнищах землетрусів складчасто-розривної системи Загроса обґрунтовано основні типи сейсмогенезу і побудовано їх стереографічні моделі, що характеризують деформаційні режими і кінематичні обстановки сейсмогенного розривоутворення в регіоні. Встановлені особливості просторового розподілу вогнищ різних типів, апроксимованих цими моделями, послужили основою для структурно-кінематичної ідентифікації сейсмогенних зон, формування яких зумовлено особливостями будови і геодинамічного розвитку досліджуваної території.

On the base of results of analysis of structural-kinematic parageneses of ruptures and displacements in the earthquakes foci of the folded-faulted Zagrosa system the main types of seismogenesis have been substantiated and their stereographic models plotted characterizing deformation regimes and kinematic conditions of seismogenic rupturing in the region. Special features revealed for spatial distribution of the different types foci, approximated by these models, served as the basis for structural-kinematic identification of seismogenic zones which formation was determined by peculiarities of structure and geodynamic development of the territory under investigation.

Введение. Многообразие проявлений сейсмогенеза в пределах Украины обусловлено главным образом позицией ее территории, расположенной в области сочленения древней Восточно-Европейской платформы и западного фланга альпийского Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса, возникшего в результате коллизионного взаимодействия Евразийской, Африканской и Аравийской литосферных плит. Именно в зоне этого взаимодействия сконцентрированы основные геодинамически активные структуры, формирующие сейсмический климат Центральной и Южной Европы [Полякова, 1985; Казьмин и др., 2004 и др.]. Они характеризуются широким спектром сеймотектонических условий и разнообразием кинематических обстановок, которые проявляются как в общей латеральной зональности процессов сейсмогенеза, так и в специфических трансформациях напряженно-деформированного состояния тектоносферы в пределах самих сейсмогенных зон. Обладая энергетическим потенциалом, несоизмеримо более высоким по сравнению с прилегающими территориями, в том числе с основными сеймотектоническими провинциями Украи-

ны — Карпатской, Крымско-Черноморской и Днепроовско-Донецкой, они в значительной мере предопределяют структурно-кинематические особенности проявлений сейсмогенеза в пределах указанных регионов. Это обстоятельство обусловило необходимость проведения специальных сеймотектонических исследований, выполняемых в настоящее время в Институте геофизики НАН Украины, целью которых является изучение влияния современных геодинамических процессов зоны конвергенции Средиземноморско-Гималайского пояса на сейсмичность территории Украины. Основу работы составляет структурно-кинематический анализ проявлений сейсмогенеза в пределах геоструктур, обрамляющих территорию Украины и смежные акватории Черного моря. Исследования включают: унификацию сейсмогенерирующих полей напряжений по данным решений механизмов очагов землетрясений, структурно-кинематическую характеристику основных сейсмогенных зон и построение стереографических моделей обстановок сейсмогенеза как для отдельных геоструктур, так и для всего изучаемого сегмента тектоносферы. В этих

моделях особенности сейсмогенеза разных областей Украины получают свое системное обоснование как результат последовательного взаимовлияния основных геоструктур Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса и прилегающих территорий.

На примере одной из таких геоструктур — складчато-разрывной системы Загроса, расположенной на юго-восточном фланге центральной части Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса, апробированы методы и приемы стереографического решения сформулированных выше задач. Поскольку проведенные исследования с методологической точки зрения отражают несколько нетрадиционный подход к изучению сейсмотектоники, а полученные результаты имеют системный характер и заверченный вид, они вполне могут послужить предметом рассмотрения в отдельной работе.

Выбор системы Загроса в качестве первоочередного объекта для изучения сейсмогенных структур Средиземноморско-Гималайского пояса не случаен и предопределен следующими ее особенностями.

1. Система является геоструктурным выражением зоны конвергенции Аравийской плиты и окраины Евразии; в современной геодинамической трактовке она позиционирует-

ся как северо-восточный фланг Аравийского Синтаксиса протяженностью более 2 тыс. км, что позволяет отнести ее к разряду геоструктур планетарного масштаба (рис. 1).

2. Протягиваясь в северо-западном направлении от Оманского залива до центральной части восточной Турции, где она образует тектонический узел с Анатолийским и Северо-Анатолийским разломами (вершина Синтаксиса), система Загроса трассируется комплексом складчатых и разрывных структур преимущественно северо-западной ориентировки [Баженов, Буртман, 1990; Хаин, 2001 и др.]. Структурная выраженность системы позволяет ограничить область ее динамического влияния и обеспечить тем самым формирование выборки данных по механизмам очагов землетрясений, локализованных в пределах этой области; при этом объем выборки вполне представлятелен для изучения особенностей сейсмогенеза региона.

3. Результаты предварительного анализа механизмов очагов в пределах Загроса показали, что двойственная геодинамическая природа этой системы (правосдвиговая и палеосубдукционная — взбросо-надвиговая или шарьяжная), нашедшая отражение в палеогеодинамических реконструкциях и геологических построениях [Эволюция...

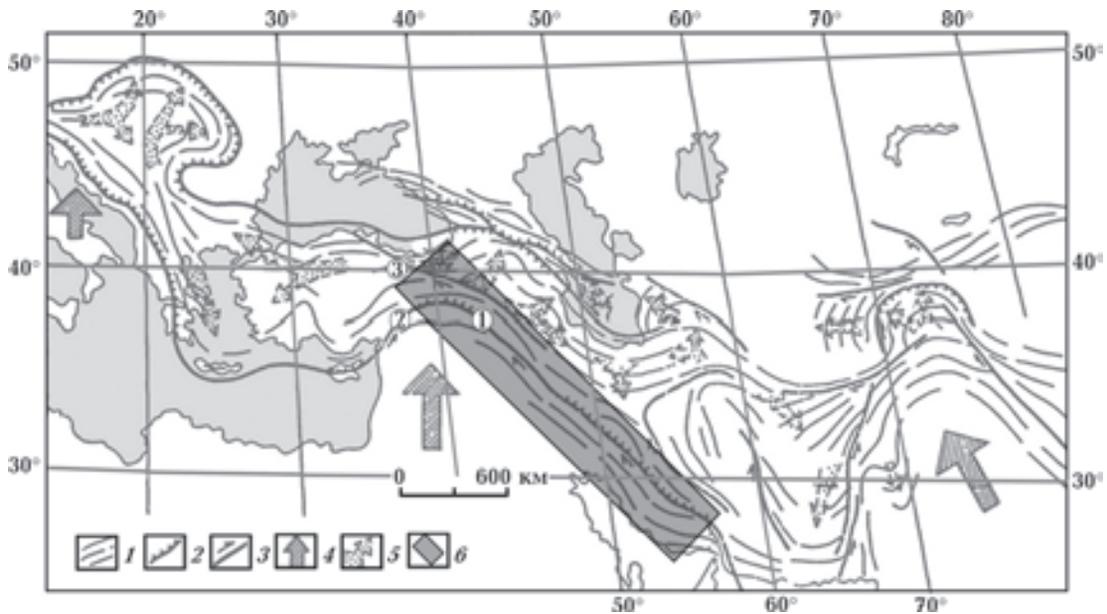


Рис. 1. Положение системы Загроса в структуре Альпийско-Гималайского складчатого пояса (структурная основа, по [Баженов, Буртман, 1990]): 1 — простирание складок; 2 — надвиги, фронт шарьяжей; 3 — сдвиги; 4 — движение литосферных плит относительно Евразии в новейшее время; 5 — главные тектонические течения в новейшее время; 6 — исследуемый регион (система Загроса). Цифры в кружках — зоны региональных разломов: 1 — Загроса, 2 — Анатолийского, 3 — Северо-Анатолийского.

1987; Баженов, Буртман, 1990 и др.], проявляется и в настоящее время в характере сейсмогенеза. Это обстоятельство, свидетельствующее о полигенетичности данной сейсмотектонической системы, априори гарантировало разнообразии структурно-кинематических типов и параметров создаваемых стереографических моделей, отражающих различные деформационные режимы и кинематические обстановки процессов сейсмогенеза. Таким образом, предопределены предпосылки для выявления и анализа особенностей сейсмотектонического развития системы Загроса во всем многообразии его проявления.

Исходные сейсмологические данные и особенности их тектонофизической интерпретации. Фактологической основой исследований послужили решения механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах системы Загроса и в области ее сочленения с зонами Анатолийских разломов. Данные позаимствованы из сейсмологического каталога Гарвардского университета (США) за 1977—2001 гг., размещенного на Web-узле университета (globalcm1.org/CM1search.html). Формирование выборки существенно облегчило то обстоятельство, что в пределах области 25—40° с.ш. и 40—60° в.д. система Загроса выражена линейной зоной относительно обособленного скопления очагов землетрясений. Полученная выборка («основной» каталог) насчитывает 100 решений механизмов преимущественно коровых очагов с $M > 4,0$. Для последующей верификации полученных моделей и выводов использованы результаты решений механизмов, найденные в других источниках Internet-ресурсов: Гарвардского университета (hera.wdcb.ru/tols/tecton/db/seism/Harvard.mek), на сайтах «Виртуальная лаборатория по тектонофизическому анализу современных и палеонапряжений» (авторы Ю. Л. Ребецкий, Д. Н. Задорожный, А. А. Соловьев, И. А. Дзюба) (hera.wdcb.ru/tols/tecton/db/seism/Harvard.mek), Геофизической службы РАН (seme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl) и др. Этот массив («контрольная» выборка) содержит данные по землетрясениям как предшествующим времени «основного» каталога (три очага 1976 г), так и произошедшим за период с 2001 г. до настоящего времени (20 решений механизмов очагов).

Начальный этап обработки материала включал разбраковку очагов землетрясений по типам *деформационных режимов*. По мнению О. Б. Гинтова, который первым среди украинских ученых использовал этот прием для анализа тектонофизических и сейсмологических данных [Гинтов и др., 2002; Гинтов, 2005], наиболее удачная классификация деформационных режимов земной коры, применимая к процессу возникновения тектонических (в том числе — сейсмогенных) разрывов, была предложена О. И. Гуценко с соавторами [Гуценко и др., 1991]. Она основана на принятых в тектонофизике параметрах — углах наклона γ^1, γ^2 и γ^3 главных осей нормальных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 ¹ (в решениях механизмов очагов землетрясений — Р, N и Т соответственно в пересчете на нижнюю полусферу) к горизонту (табл. 1).

Т а б л и ц а 1. Деформационные режимы, определяемые величиной углов наклона главных осей σ_1, σ_2 , и σ_3 (соответственно γ^1, γ^2 и γ^3) к горизонту, по [Гуценко и др., 1991; Гинтов, 2005]

Взбросовый	$\gamma^1 \leq 30^\circ$	$\gamma^2 \leq 30^\circ$	$\gamma^3 \geq 45^\circ$
Сбросовый	$\gamma^1 \geq 45^\circ$	$\gamma^2 \leq 30^\circ$	$\gamma^3 \leq 30^\circ$
Сдвиговый	$\gamma^1 \leq 30^\circ$	$\gamma^2 \geq 45^\circ$	$\gamma^3 \leq 30^\circ$
Взбросо-сдвиговый	$\gamma^1 \leq 30^\circ$	$\gamma^2 > 30^\circ$	$\gamma^3 > 30^\circ$
Сбросо-сдвиговый	$\gamma^1 > 30^\circ$	$\gamma^2 > 30^\circ$	$\gamma^3 \leq 30^\circ$
Взбросо-сбросовый	$\gamma^1 > 30^\circ$	$\gamma^2 < 30^\circ$	$\gamma^3 > 30^\circ$
Октаэдрический	$\gamma^1 > 30^\circ$	$\gamma^2 > 30^\circ$	$\gamma^3 > 30^\circ$

При сопоставлении решений механизмов очагов, характеризуемых однотипными режимами, выяснилось, что их параметры (ориентировки нодальных плоскостей со сходными траекториями подвижек, проекции векторов смещений, проекции осей сжатия Р и растяжения Т) образуют обособленные скопления в пределах весьма ограниченных сегментов стереограмм. Позиции этих совокупностей во многих случаях настолько различаются, что априори могут рассматриваться как проявления разных условий сейсмогенеза. Поэтому следующий этап работ заключался в идентификации *кинематических обстановок* сейсмогенного разрывообразования, которые от-

¹ Сжатие принято положительным при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Углы наклона осей к горизонту соответственно γ^1, γ^2 и γ^3 .

ражают доминирующие условия сжатия или растяжения в регионе и особенности ориентировок главных осей структурообразующих полей напряжений относительно сторон света, присущие отдельным группам очагов землетрясений.

Подобные приемы успешно применялись при тектонофизическом изучении условий тектонического разрывообразования и вторичных смещений в пределах Горного Крыма и других территорий [Гинтов, 2005; Вольфман, Колесникова, 2012 и др.]. В частности, при анализе данных по зеркалам скольжения путем последовательной их разбраковки по деформационным режимам и кинематическим обстановкам формирования выделялись *структурно-кинематические парагенезисы тектонических разрывов и смещений, представляющие собой совокупности зеркал, элементы залегания которых и направления смещений по ним соответствуют одному полю напряжений* [Реконструкция..., 2011; Вольфман, Колесникова, 2012]. По-видимому, аналогичный подход применим и к группам землетрясений, которые характеризуются единством деформационных режимов и сходством кинематических обстановок. Так, *очаги, имеющие близкие пространственно-кинематические параметры, могут быть объединены в один структурно-кинематический парагенезис сейсмогенных разрывов* (далее в тексте — парагенезис или P_gN_g), отражение которого на стереограмме рассматривается в качестве стереографической модели (или одной из ее составляющих) соответствующей обстановки (типа) сейсмогенеза, а в случае закономерного или компактного расположения этих очагов — в качестве модели сейсмогенной или очаговой зоны.

Основная часть исследований включала реконструкцию (унификацию) сейсмогенерирующих полей напряжений для групп очагов, характеризующихся сходными деформационными режимами и общностью кинематических обстановок их формирования. Особенность этой процедуры заключалась в анализе сейсмологических данных с позиций метода структурных парагенезисов тектонофизики. Поскольку сейсмологическое решение механизма очага и тектонофизическое решение обратной задачи по реконструкции условий тектонического разрывообразования характеризуют (с применением разных методов) одно и то же явление — мгновенное хрупкое разрушение горного массива, такой подход вполне допустим. Это допущение обусловле-

но исходными сейсмологическими данными и параметрами решения механизма землетрясения, получаемыми в процессе исследования напряжений и разрывов в очагах [Введенская, 1969]. В этих решениях априори заложена структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов, отчающих положение нодалльных плоскостей: они соответствуют L - и L' -сколам, совпадающим с поверхностями главных касательных напряжений. Следовательно, и само решение будет отражать реальную ситуацию лишь при условии, что разрывы в очаге представлены L - и L' -сколами. Однако экспериментально установлено [Шерман и др., 1988; Гинтов, Исай, 1988 и др.] и подтверждено полевыми тектонофизическими исследованиями [Стоянов, 1977; Гинтов, Исай, 1988; Новик, Вольфман, 1997; Гинтов, 2005 и др.], что деформирование горного массива происходит либо посредством образования сопряженных систем L -, L' -, R -, R' -сколов и трещин отрыва, составляющих единый структурный парагенезис, либо активизацией подвижек по уже существующим разломам (последнее возможно лишь в том случае, если положение данного разрыва и направление смещения по нему удовлетворяют возмущающему полю напряжений). Поскольку в процессе деформирования реализуются, как правило, не все вышеперечисленные типы, а только некоторые из них (например, R - и R' -сколы) или их комбинации [Стоянов, 1977; Шерман и др., 1983; Гинтов, 2005 и др.], весьма вероятно, что и в механизме очага одна из нодалльных плоскостей соответствует активному разрыву типа R -скол как первоочередному и наиболее распространенному элементу структурного парагенезиса. В этом случае в окончательное решение механизма очага должны быть внесены некоторые коррективы. Принципиальная возможность, последовательность и результаты подобной интерпретации показаны ниже при построении стереографических моделей сейсмогенных зон (рис. 2, 4 и др.).

Таким образом, проведенный сеймотектонический анализ системы Загроса базируется на:

- дифференциации очагов землетрясений или их совокупностей по типам деформационных режимов и кинематических обстановок сейсмогенеза;
- вариативном подходе к интерпретации решений механизмов очагов с позиций метода структурных парагенезисов тектонофизики;
- структурно-кинематической идентифи-

кации и пространственной параметризации сейсмогенных зон разных типов.

Полученные результаты позволили построить стереографические модели основных типов сейсмогенеза, установить особенности пространственного распределения очагов разных типов и обосновать некоторые закономерности трансформаций напряженно-деформированного состояния тектоносферы в пределах изучаемого сегмента области конвергенции — системы Загроса.

Общая характеристика сеймотектонических условий региона. Анализ решений механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах зоны Загроса, показал, с одной стороны, широкий спектр деформационных режимов и кинематических обстановок, с другой, преобладание очагов землетрясений, возникших в обстановках субмеридионального сжатия (58 %). В этих условиях проявились преимущественно сдвиговый и близкие к нему (взбросо- и сбросо-сдвиговый, всего 31 % очагов), а также взбросовый (27 %) деформационные режимы сейсмогенеза (табл. 2).

Вторая в количественном отношении группа очагов (35 % от общего количества) указывает на наличие обстановок юго-западного—северо-восточного сжатия. Возникновение сейсмогенных разрывов в очагах этих землетрясений происходило главным образом в условиях взбросового (20 %) и сдвигового (9 %) деформационных режимов.

Очаги землетрясений, отражающие разные обстановки сейсмогенеза, в пределах изучаемой территории распределены весьма неравномерно. В большинстве случаев можно локализовать участки проявления однотипных очагов, т. е. выделить сейсмогенные

зоны, характеризующиеся определенными деформационными режимами и кинематическими обстановками. При этом учитываются как особенности латерального распространения очагов тех или иных типов, так и ориентировки нодальных плоскостей, отождествляемых с разрывами. Структурно-кинематическая характеристика этих сейсмогенных зон определяется параметрами стереографических моделей соответствующих парагенезисов.

Таким образом, большинство имеющихся решений механизмов очагов отражает четыре типа сейсмогенеза, которые формируют сеймотектонический климат региона и характеризуются:

- сдвиговым и близкими к нему (взбросо- и сбросо-сдвиговым) деформационными режимами, обусловленными условиями субмеридионального (1-й тип) и юго-западного—северо-восточного (2-й тип) сжатия;
- взбросовым режимом, обусловленным условиями юго-западного—северо-восточного (3-й тип) и субмеридионального (4-й тип) сжатия.

Каждый из них можно представить в виде стереографической модели, отражающей деформационные режимы сейсмогенных зон, в пределах которых локализованы очаги соответствующего вида, и кинематические обстановки, обусловившие возникновение сейсмогенных разрывов тех или иных структурно-кинематических типов и направлений.

За рамками указанных моделей осталась незначительная часть очагов, которые невозможно сгруппировать в статистически представительные выборки по идентичности их параметров. Тем не менее попытки использо-

Т а б л и ц а 2. Распределение количества очагов землетрясений зоны Загроса по деформационным режимам и кинематическим обстановкам

Деформационные режимы	Кинематические обстановки				Количество очагов	
	Субмеридиональное сжатие	ЮЗ-СВ сжатие	Субширотное сжатие	ЮВ-СЗ сжатие		
Сдвиговый	25	9	—	1	35	Σ=45
Взбросо-сдвиговый	4	2	—	—	6	
Сбросо-сдвиговый	2	2	—	—	4	
Взбросовый	27	20	1	1	49	
Сбросовый	2	—	2	—	4	
Взбросо-сбросовый	—	2	—	—	2	
Всего					100	

Примечание: для сбросового режима кинематические обстановки — растяжения: субширотное (колонка 2) и субмеридиональное (колонка 4)

вания их в качестве индикаторов напряженно-деформированного состояния земной коры позволяют рассматривать большинство из них в качестве системных элементов сейсмогенеза региона. Часть из них имеет определенное сходство с полученными моделями основных обстановок. Такие очаги или их структурно-кинематические парагенезисы условно можно отнести к соответствующему типу сейсмогенеза, рассматривая их в качестве элемента, отражающего локальные трансформации доминирующих полей напряжений. Оставшиеся очаги либо характеризуют обстановки, слабо проявленные в изучаемом регионе (например, сдвиговое землетрясение 13.04.1998 г., $M=4,8$, произошедшее в условиях юго-восточного—северо-западного сжатия), либо свидетельствуют о высоком уровне локальных трансформаций доминирующего поля напряжений, не позволяющем уверенно установить причастность очага к какому-либо из вышеуказанных типов сейсмогенеза.

Стереографические модели сейсмогенеза сдвиговых типов. Очаги землетрясений сдвиговых типов формировались преимущественно в условиях субмеридионального (25 очагов) и юго-западного—северо-восточного (9 очагов) горизонтального сжатия (см. табл. 2).

Результаты решений механизмов сдвиговых очагов, сформировавшихся в *обстановках субмеридионального сжатия (1-й тип сейсмогенеза)*, на первый взгляд, указывают на наличие двух структурно-кинематических парагенезисов (Pg1a и Pg1б) с компактным распределением их параметров на стереограммах (рис. 2, а, б). Нодальные плоскости этих парагенезисов характеризуются субвертикальным падением и имеют диагональные (северо-западное и северо-восточное) простирания. Оси P и T расположены в субгоризонтальной плоскости и ориентированы соответственно: P — в субмеридиональном (Pg1a=170/2° и Pg1б=10/12°) и T — в субширотном (Pg1a=80/3° и Pg1б=101/4°) направлениях². Однако в каждом из приведенных парагенезисов, как и в решениях конкретных механизмов очагов, включенных в их состав, определяющим элементом является одна из нодальных плоскостей, соответствующая реальному сейсмогенному разрыву. Поскольку

² Параметры проекций осей напряжений в пересчете на нижнюю полусферу; поскольку все построения и определения элементов залегания выполнялись вручную на стереографических сетках Шмидта, возможна ошибка в пределах $\pm 1-2^\circ$.

рассматриваемые очаги локализованы в пределах геоструктуры северо-западного простирания, положению и кинематике реальных разрывов более всего удовлетворяют правые сдвиги аналогичной ориентировки. Предположив, что часть этих разрывов реализовалась по типу L-сколов (в Pg1a), а остальные (в Pg1б) — как R-сколы, их можно объединить в один структурно-кинематический парагенезис, характеризующий сейсмогенную зону как совокупность сколов этих типов, сформированных в едином поле тектонических напряжений (рис. 2, в). Величина угла скалывания полученной системы ($\alpha=20\div 25^\circ$) вполне соответствует результатам экспериментов, моделирующим условно-мгновенное разрушение осадочных и магматических образований — песчаников, мраморов, мраморизованных известняков, диабазов и т. п. [Гзовский, 1975]. Обратное соотношение (L-сколы из Pg1б, а R-сколы из Pg1a) принципиально невозможно, поскольку не удовлетворяет рассматриваемой кинематической обстановке.

Таким образом, стереографическая модель сдвигового сейсмогенеза 1-го типа представлена структурно-кинематическим парагенезисом сейсмогенных разрывов в виде крутопадающих правых L- и R-сколов с простираниями соответственно 305° и 328°. Ориентировки главных осей напряжений реконструированного поля составляют: $P \approx 172/2^\circ$ и $T \approx 82/3^\circ$ при субвертикальном положении промежуточной оси N (см. рис. 2, в). Реализация второй нодальной плоскости в Pg1a (NP₂ с простиранием 35—40°) по левому сдвигу не противоречит полученному тензору напряжений и вполне вероятно, особенно на северо-западном фланге рассматриваемой зоны — в области ее пересечения с системой Анатолийских разломов северо-восточного простирания. Возникновение же сейсмогенных разрывов, соответствующих положению нодальной плоскости северо-восточной ориентировки в Pg1б (NP₂ с простиранием 55—60°), теоретически маловероятно.

К 1-му типу сейсмогенеза с некоторой долей условности также можно отнести четыре очага взбросо-сдвигового и два сбросо-сдвигового типов, сформировавшиеся в обстановке субмеридионального сжатия—субширотного растяжения.

Решения механизмов очагов взбросо-сдвигового типа во многом схожи, что позволяет объединить их в один структурно-кинематический парагенезис. Его параметры не-

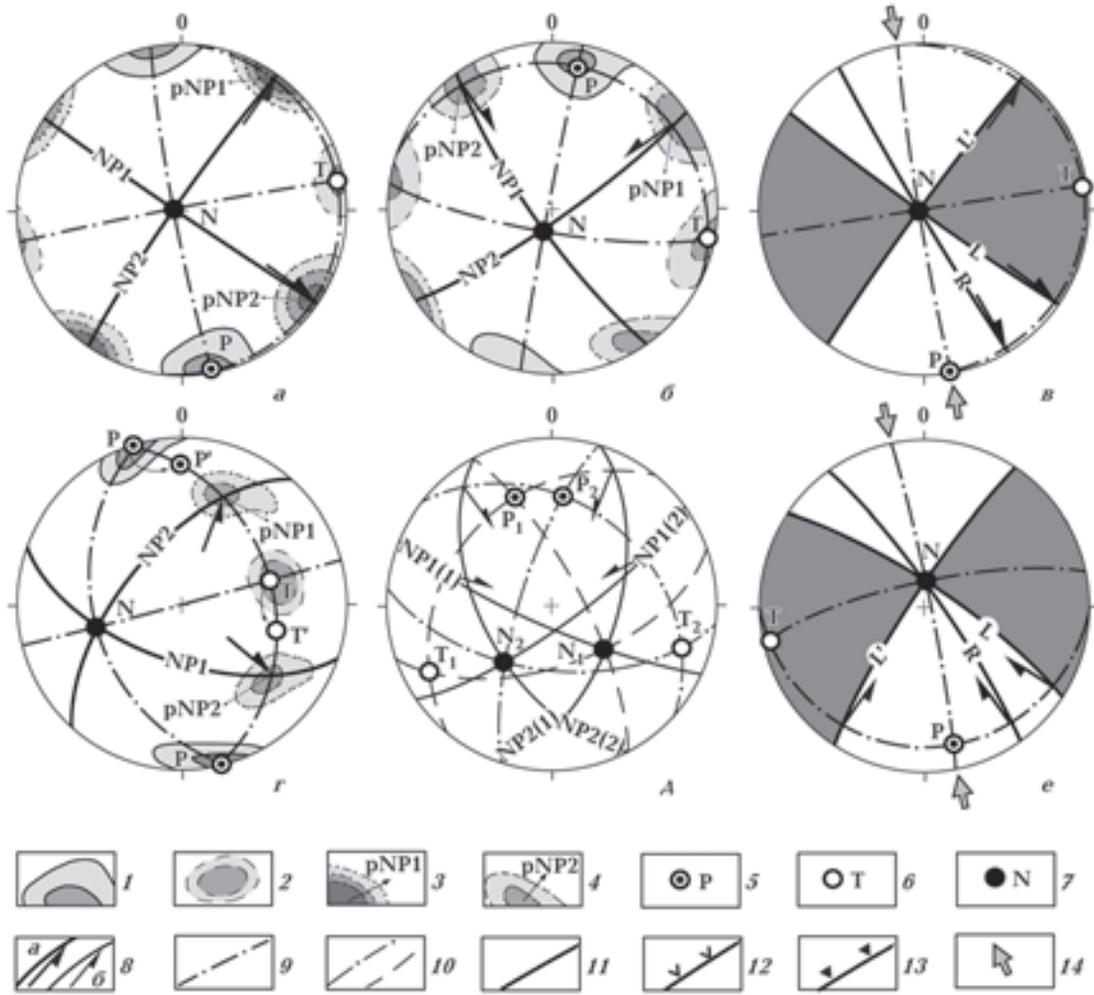


Рис. 2. Структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов в очагах и стереографические модели сейсмогенных зон сдвигового типа, сформировавшихся в обстановке субмеридионального сжатия — 1-й тип сейсмогенеза (в скобках — количество очагов): *a, б* — парагенезисы 1а (13) и 1б (12) сдвиговых сейсмогенных разрывов; *в* — сводная стереографическая модель сейсмогенеза 1-го типа (25); *г* — парагенезис взбросо-сдвигового типа (4); *д* — механизмы очагов сбросо-сдвигового типа; *е* — верификационная модель по решениям механизмов очагов контрольной выборки (8); 1—4 — изолинии плотностей параметров решений механизмов очагов: осей максимального (1) и минимального (2) сжатия, полюсов нодальных плоскостей NP1 (3) и NP2 (4); 5—7 — проекции главных осей напряжений (5 — максимального, 6 — минимального сжатия, 7 — промежуточной); 8 — проекции усредненных (*a*) и единичных (*б*) нодальных плоскостей и векторов смещения (стрелка указывает направление перемещения лежачего крыла разрыва); 9 — проекции плоскостей размещения главных осей нормальных напряжений; 10 — то же самое для единичных очагов; 11—13 — проекции плоскостей вероятных сейсмогенных разрывов в моделях (*L, L', R* — типы сколов) и их структурно-кинематические типы — сдвиги, взбросо- и сбросо-сдвиги (11), взбросы (12), надвиги (13); 14 — направление регионального сжатия. Здесь и далее — все построения на нижней полусфере.

сколько отличаются от вышеописанной модели вследствие разворота тензора напряжений вокруг оси P, поэтому он приведен на отдельной стереограмме (рис. 2, *г*). При отождествлении (по определению) нодальных плоскостей с *L*- и *L'*-сколами этот парагенезис в общем виде отражает обстановку субмеридионального сжатия с ориентировками осей напряжений: P=165/0°, N=255/44°, T=75/44°. Нодальные пло-

скости, имеющие параметры³ NP1=201/60° и NP2=311/60°, представляют собой соответственно правый и левый взбросо-сдвиги. Учитывая, что три из четырех указанных очагов тяготеют к вершине Аравийского Синтаксиса,

³ В числителе — азимут, в знаменателе — угол падения плоскости; здесь и далее номера нодальных плоскостей приведены по их нумерации в соответствующих каталогах.

вполне вероятно, что сейсмогенным разрывам в их решениях соответствуют нодальные плоскости северо-восточного простирания, согласующиеся с левосдвиговой и в некоторой степени — с палеосубдукционной природой Анатолийского разлома. В случае активизации этой плоскости в виде *R*-скола проекции осей *P* и *T* сместятся по часовой стрелке до положений P^1 и T^1 соответственно, характеризуя строго меридиональное направлений сжимающих напряжений (см. рис. 2, *г*).

Как отмечено выше, решения двух механизмов очагов, сформировавшихся в условиях сбросо-сдвиговых деформационных ре-

жимов, по своим основным параметрам почти удовлетворяют модели сейсмогенеза 1-го типа (рис. 2, *д*). Незначительное (несколько градусов) увеличение угла наклона оси *P* и соответственно отклонение оси *T* от субширотного положения могут быть обусловлены либо локальными трансформациями структурообразующего поля напряжений, либо неоднородностями вмещающей очаг среды, предопределившими ориентировку сейсмогенного разрыва.

Очаги землетрясений, аппроксимированные стереографической моделью сейсмогенеза 1-го типа и кинематически близкие к ним,

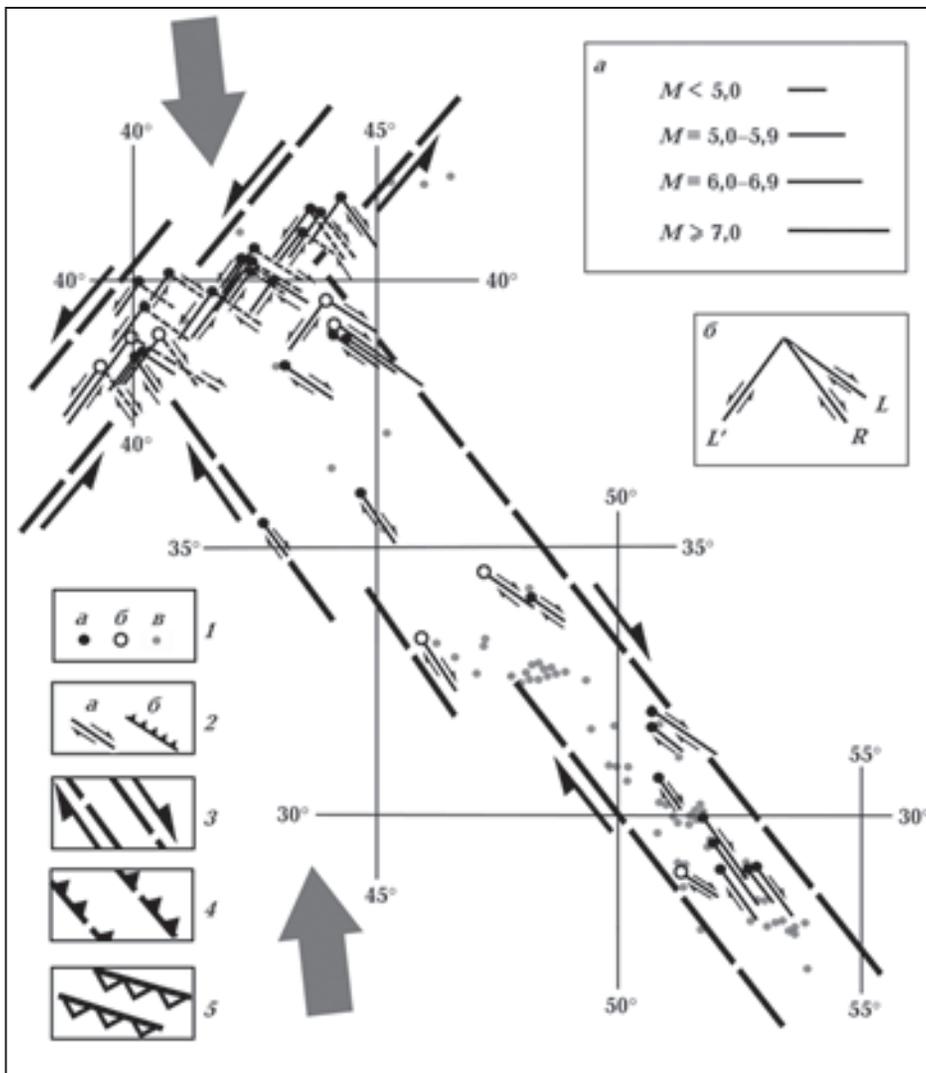


Рис. 3. Особенности площадного распределения и структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений 1-го типа: 1 — очаги землетрясений (*a* — соответствующего типа «основной» выборки, *б* — соответствующего типа из «контрольной» выборки, *в* — иных типов «основной» выборки); 2 — сейсмогенные разрывы (*a* — сдвиги и направления смещений по ним, *б* — взбросы и надвиги, бергштрихи указывают направление падения разрывов); 3—5 — границы сейсмогенных зон (3 — 1-го и 2-го типов, 4 — 3-го типа, 5 — 4-го типа, бергштрихи указывают направление падения зон). На врезках: *a* — магнитуда землетрясения, *б* — структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов в очаге. Большие стрелки — направление регионального сжатия.

локализованы (хоть и неравномерно) вдоль внешней части северо-восточного фланга Аравийского Синтаксиса, образуя протяженную (более 2000 км) правосдвиговую сейсмогенную зону северо-западного простирания. Разрывы в этих очагах представлены преимущественно R -сколами, в меньшей мере — L -сколами. Значительное количество очагов 1-го типа расположено также в области сочленения системы Загроса с зонами Анатолийских разломов, свидетельствуя о возможности реализации сейсмогенных разрывов как общезагорского (северо-западного) направления, так и соответствующих положению Анатолийской зоны северо-восточного простирания (рис. 3).

Следует добавить, что суммарный (включая «контрольную» выборку) каталог землетрясений данного типа содержит наибольшее количество (шесть) катастрофических событий с $M \geq 6,0$, вызвавших разрушения зданий и сооружений и повлекших многочисленные человеческие жертвы. Часть этих землетрясений локализована в области сочленения системы Загроса с зоной Анатолийского разлома: 24.11.1976 г. ($M=6,1$), 30.10.1983 г. ($M=6,9$), 08.03.2010 г. ($M=6,1$). По кинематическим характеристикам решений механизмов очагов и особенностям их местоположения сейсмогенный разрыв первого из них идентифицируется как L -скол северо-западного (общезагорского) простирания. Что касается реализации разрывов в остальных очагах, то здесь равновероятно возникновение как L -сколов северо-западного простирания, так и L' -сколов северо-восточной ориентировки, согласующейся с общим направлением зоны Анатолийского разлома.

Три катастрофических землетрясения — 03.05.1989 г. ($M=6,2$), 01.03.1994 г. ($M=6,0$), 06.05.1999 г. ($M=6,3$) — произошли на юго-восточном фланге системы Загроса, при этом параметры сейсмогенных разрывов в очагах позволяют идентифицировать их как R -сколы общезагорского (северо-западного) простирания.

Модель сдвигового сейсмогенеза 2-го типа характеризует обстановки юго-западного—северо-восточного сжатия. Особенности распределения на стереограмме параметров соответствующих очагов также позволяют выделить два структурно-кинематических парагенезиса, крутопадающие нодальные плоскости которых имеют субширотное и субмеридиональное простирания, а оси сжатия и растяжения ориентированы в диагональных направлениях: для $Pg2a$ — $P=42/6^\circ$, $T=135/14^\circ$;

для $Pg2b$ — $P=201/22^\circ$, $T=115/13^\circ$ (рис. 4, а, б). Поскольку рассматриваемые очаги локализованы главным образом в пределах относительно узкой зоны субширотного простирания (рис. 5, а), наиболее вероятно, что сейсмогенным разрывам соответствуют нодальные плоскости, ориентированные в широтном направлении. На сводной стереографической модели эти плоскости интерпретируются как левосдвиговые L - и R -сколы одного парагенезиса с ориентировками приблизительно 90 и 70° соответственно (рис. 4, в). Положение осей напряжений при этом определяется параметрами парагенезиса 2а: $P=42/6^\circ$, $T=135/14^\circ$. В этих же условиях, в принципе, возможно образование и правосдвиговых сейсмогенных разрывов меридиональной ориентировки (L' -сколов), однако соответствующие им региональные геоструктурные элементы не установлены.

В количественном отношении L - и R -сколы представлены примерно одинаково, однако единственное землетрясение данного типа, магнитуда которого превышает 6,0 (11.08.1988 г., $M=6,1$), реализовалось по типу левосдвигового R -скола.

Добавим, что, несмотря на субширотную ориентировку сейсмогенных разрывов в очагах 2-го типа, последние не являются структурно-кинематическими аналогами разрывов в пределах расположенной севернее субширотной Северо-Анатолийской зоны, активизация которой обусловлена обстановками юго-восточного—северо-западного сжатия и характеризуется правосдвиговыми смещениями.

Ко 2-му типу сейсмогенеза отнесены также два землетрясения сбросо-сдвигового типа (06.12.1988 г., $M=5,6$; 02.04.1989 г., $M=5,0$), весьма близких по параметрам решений механизма очага, что позволило объединить их в один парагенезис (рис. 4, г). Как и в сдвиговых очагах этого типа, положению реального разрыва, по-видимому, соответствует вторая нодальная плоскость ($NP2$), идентифицируемая как левый сдвиг с элементами залегания $346/54^\circ$. Первое из этих землетрясений локализовано в пределах основной зоны развития аналогичных сдвиговых очагов; второе реализовалось северо-западнее — в области скопления очагов 4-го (взбросового) типа (см. рис. 5).

Усложняющим данную модель сейсмогенеза элементом можно считать и единичные землетрясения взбросо-сдвигового типа (30.04.1999 г., $M=4,8$; 01.05.2000 г., $M=4,5$), сформировавшиеся в условиях юго-западного—

северо-восточного сжатия. Они отражают локальные трансформации поля напряжений сдвигового типа; при этом решения очагов почти симметричны относительно центра стереограммы, будучи развернутыми одно относительно другого приблизительно на 180° (см. рис. 4, д). Подобная симметрия наблюдается и во взбросо-сбросовых очагах, отнесенных к 3-му типу (см. ниже), с сохранением направления сжимающих напряжений ($\sim 220^\circ \leftrightarrow \sim 40^\circ$).

Стереографические модели сейсмогенеза взбросовых типов. Большая часть землетрясений Загроса, очаги которых характеризуются взбросовыми деформационными режимами, также формировалась в обстановках диагонального (юго-западного—северо-восточного) и субмеридионального сжатия. Соответственно их можно аппроксимировать двумя моделями сейсмогенеза, условно отнесенными к 3-му и 4-му типам.

Параметры решений (ориентировки осей Р и Т, элементы залегания нодальных плоскостей) очагов, обусловленных субгоризонтальным сжатием юго-западного—северо-восточного направления (3-й тип сейсмогенеза), образуют вполне компактные скопления на стереограмме, позволяя отнести их к одному структурно-кинематическому парагенезису (рис. 6, а) и, следовательно, отразить в виде одной стереографической модели (рис. 6, б). Последняя характеризуется следующими значениями: ориентировки осей Р и Т составляют соответственно $39/12^\circ$ и $266/72^\circ$; одна из нодальных плоскостей NP2 представляет собой левый сдвиг-надвиг (надвиг с небольшой левосдвиговой составляющей), падающий в юго-западном направлении (элементы залегания $205/31^\circ$), вторая (NP1) идентифицируется как взброс противоположного падения ($51/58^\circ$). Поскольку плоскость РТ в данной мо-

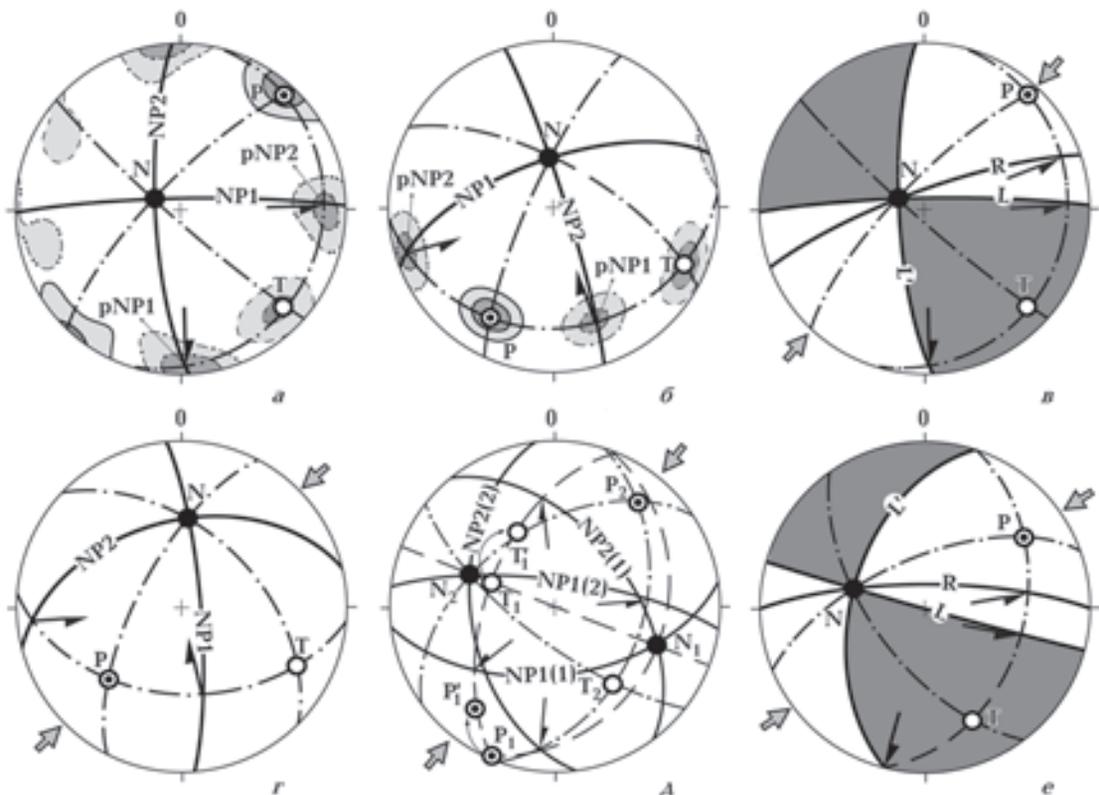


Рис. 4. Структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов в очагах и стереографические модели сейсмогенных зон сдвигового типа, сформировавшихся в обстановке юго-западного—северо-восточного сжатия — 2-й тип сейсмогенеза (в скобках — количество очагов): а, б — парагенезисы 2а (6) и 2б (3) сдвиговых сейсмогенных разрывов; в — сводная стереографическая модель сейсмогенеза 2-го типа (9); г — парагенезис сбросо-сдвигового типа (2); д — механизмы очагов взбросо-сдвигового типа; е — верификационная модель по решениям механизмов очагов контрольной выборки (2). Условные обозначения см. на рис. 2.

дели субвертикальна, идентификация какой-либо из нодальных плоскостей в качестве R -скола не повлияет существенно образом на ориентировку структурообразующих осей напряжений, а только приведет к некоторому изменению углов их наклона по отношению к земной поверхности.

Полученной модели удовлетворяют 20 % всех очагов землетрясений. Они локализованы на юго-восточном фланге и в меньшей мере в центральной части изучаемой геоструктуры (рис. 7). Как и очаги 1-го типа, они относительно неравномерно распреде-

лены вдоль зоны северо-западного простирания, элементы залегания и структурно-кинематическая характеристика которой определяются по типу нодальных плоскостей, отождествляемых с сейсмогенными разрывами. Хотя простирание обеих плоскостей согласуется с ориентировкой сейсмогенной зоны, в случае однонаправленного разрыва в очаге наиболее вероятной является активизация $NP1$ (взброс северо-восточного падения), пространственно-кинематические параметры которой соответствуют положению зоны палеосубдукции Аравийской плиты под

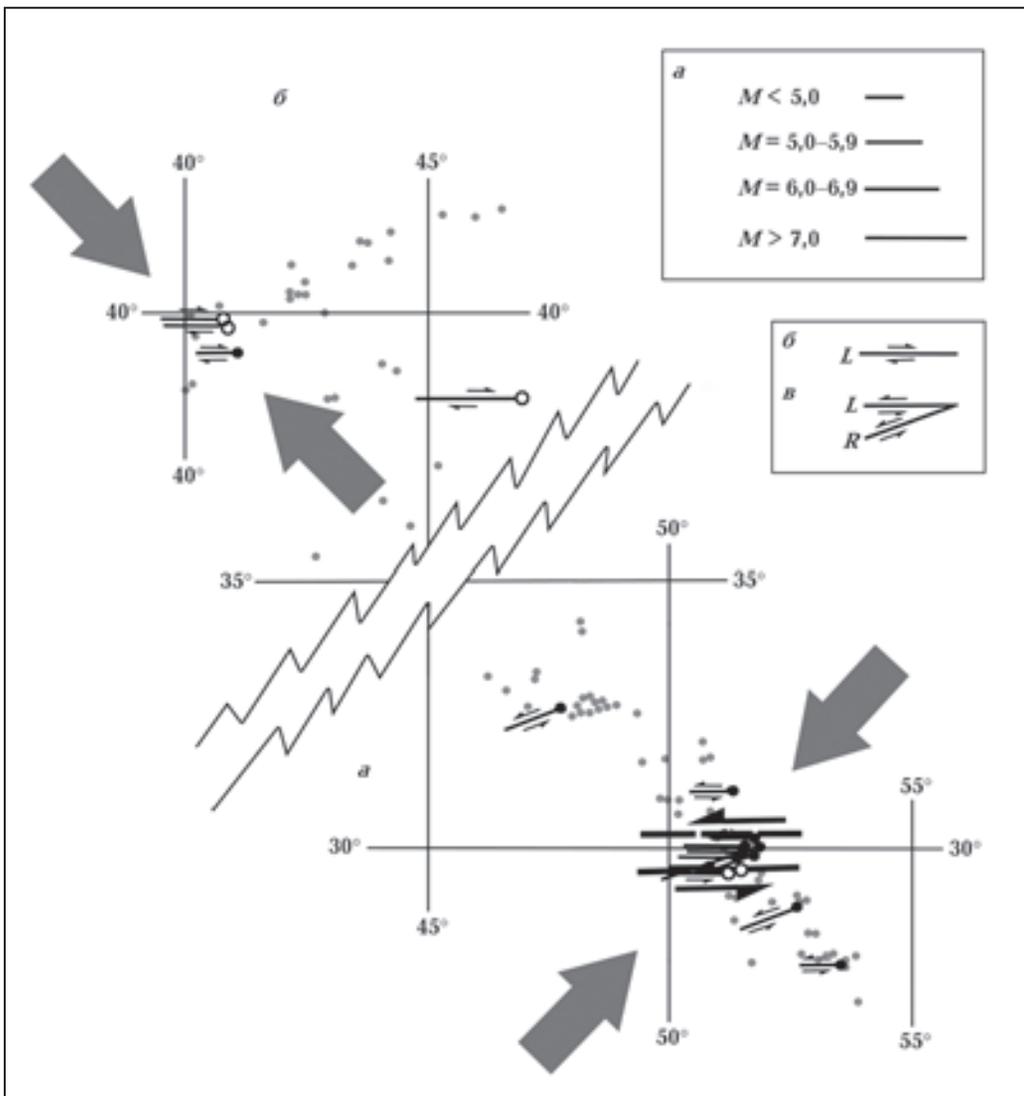


Рис. 5. Особенности площадного распределения и структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений 2-го (а) и 5-го (б) типов. На врезках: а — магнитуда землетрясения, б — структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов в очагах 5-го типа, в — то же самое в очагах 2-го типа. Условные обозначения см. на рис. 3.

Евразийский континент. При этом сдвиговая зона Загроса (1-го типа) как бы «подпирает» последнюю со стороны Евразии, ограничивая область распространения взбросовых очагов пределами внутреннего (по отношению к Аравии) северо-восточного края Аравийского синтаксиса (см. рис. 7).

К разновидности этого же — 3-го типа сейсмогенеза можно отнести и землетрясения, образовавшиеся в обстановке юго-западного—северо-восточного сжатия, характеризующиеся взбросо-сбросовым деформационным режимом. В анализируемой выборке выделяется всего два очага такого типа (05.03.1983 г., $M=5,2$; 28.03.2001 г., $M=4,7$). Их решения практически симметричны относительно центра стереограммы, будучи развернутыми одно относительно другого приблизительно на 180° . Ввиду значительного разброса параметров решений эти очаги не могут быть объединены в один структурно-кинематический парагенезис. Они отражают локальные трансформации структурообразующего поля взбросового типа, происходящие путем разворота тензора напряжений вдоль линии осей N_1 —

N_2 (рис. 6, в). При этом неизменным остается направление сжатия ($\sim 220^\circ \leftrightarrow \sim 40^\circ$) и ориентировка сейсмогенных разрывов, которым соответствуют нодальные плоскости NP1(1) и NP1(2). Последние представляют собой субвертикальные взбросы северо-западного простириания, согласующегося с ориентировкой зоны локализации очагов 3-го типа (см. рис. 7). Субгоризонтальные плоскости NP2(1) и NP2(2) в качестве возможных сейсмогенных разрывов не рассматриваются.

Из числа землетрясений данного типа только одно характеризуется магнитудой 6,0 — 22.04.1976 г. (из «контрольной» выборки). Оно локализовано на юго-восточном фланге системы Загроса; сейсмогенный разрыв в очаге идентифицирован как взброс общезагросского простириания с падением на северо-восток, что согласуется с пространственно-кинематическими характеристиками остальных очагов этого типа.

Группа взбросовых землетрясений, сформировавшихся в обстановках *субмеридионального сжатия* (4-й тип сейсмогенеза), не столь однородна по распределению параметров

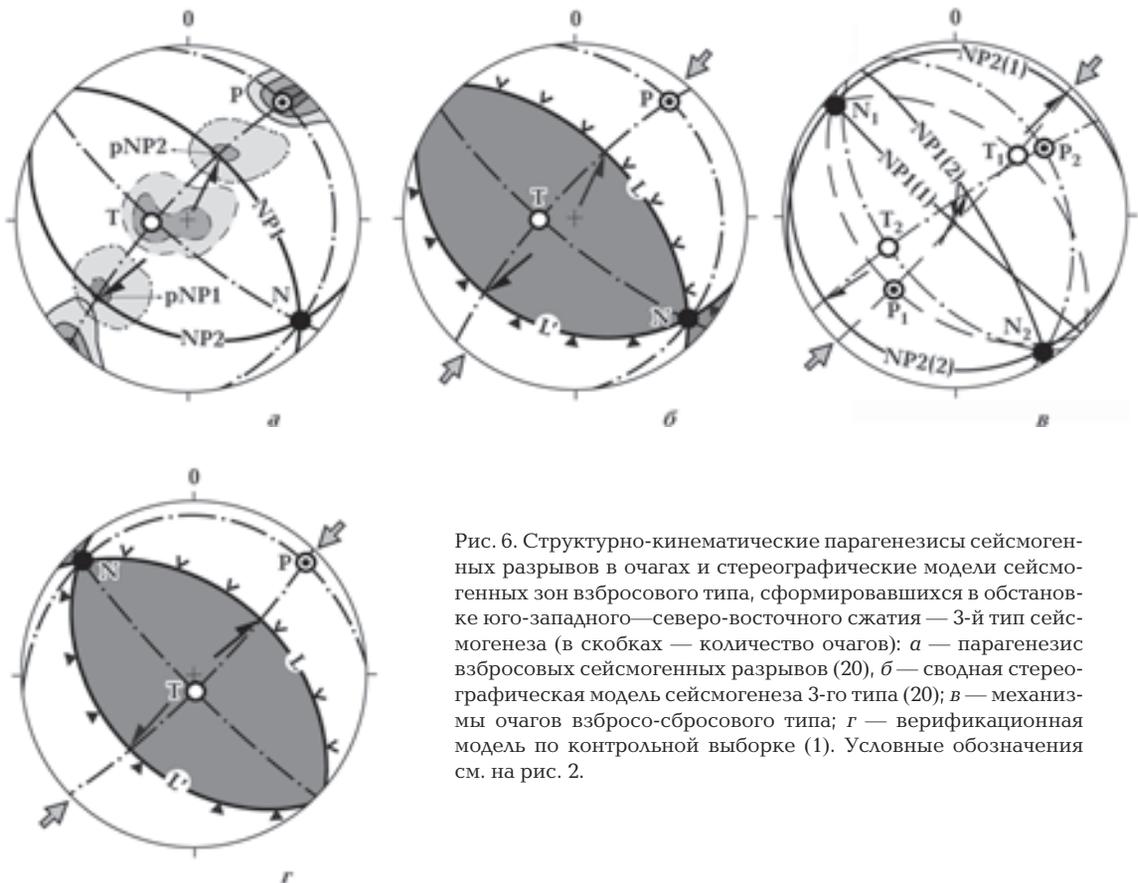


Рис. 6. Структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов в очагах и стереографические модели сейсмогенных зон взбросового типа, сформировавшихся в обстановке юго-западного—северо-восточного сжатия — 3-й тип сейсмогенеза (в скобках — количество очагов): а — парагенезис взбросовых сейсмогенных разрывов (20), б — сводная стереографическая модель сейсмогенеза 3-го типа (20); в — механизмы очагов взбросо-сбросового типа; г — верификационная модель по контрольной выборке (1). Условные обозначения см. на рис. 2.

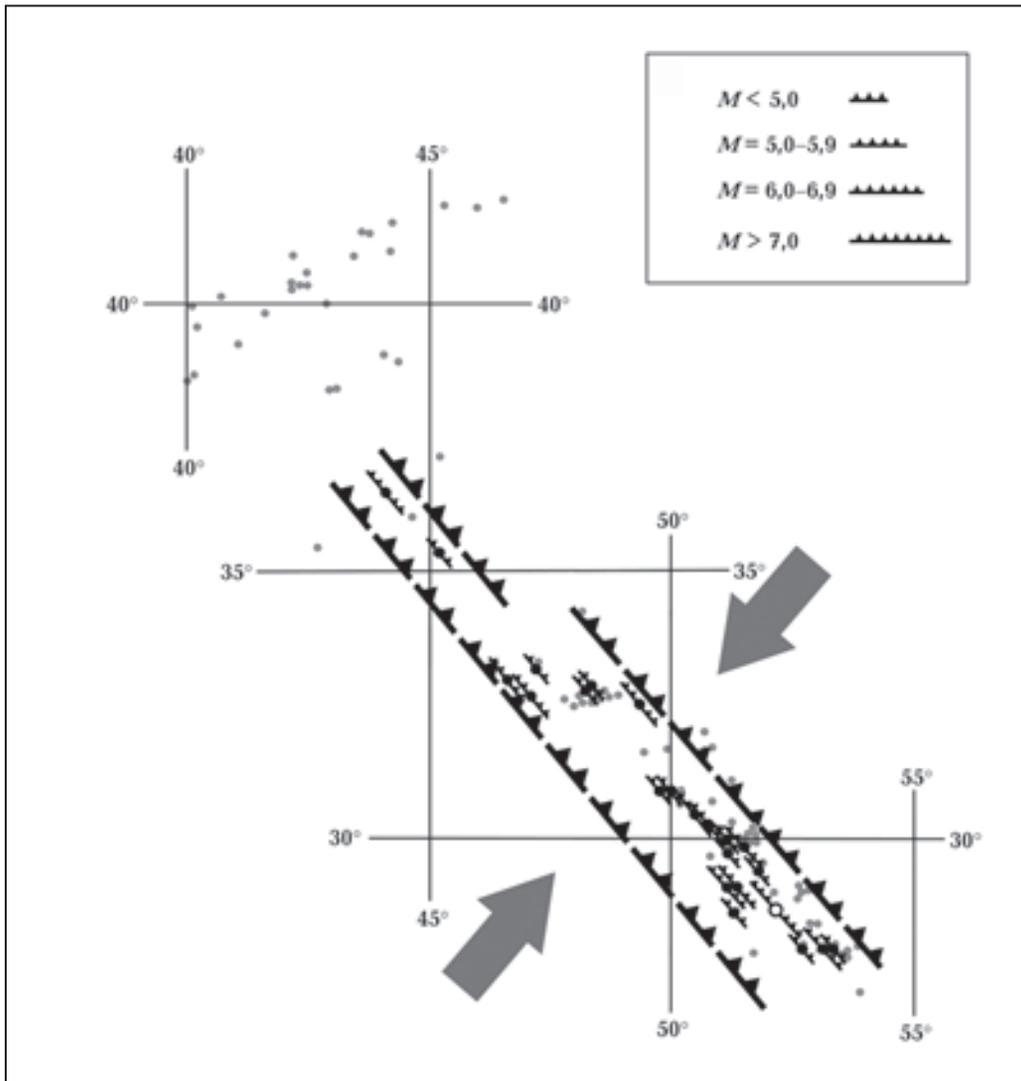


Рис. 7. Особенности площадного распределения и структурно-кинematicкая идентификация сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений 3-го типа. Условные обозначения см. на рис. 3.

решений механизмов, как предыдущая. Полюсы нодальных плоскостей этой категории очагов образуют две парные совокупности (рис. 8, а), которые (вместе с соответствующими ориентировками осей Р и Т) на стереограммах можно отразить в виде двух парагенезисов (рис. 8, б, в). При этом один из них (Pg4а) указывает на наличие обстановок субмеридионального сжатия с ориентировкой оси Р = 11/16°, второй (Pg4б) — юго-юго-западного — северо-северо-восточного сжатия с Р = 198/13°. В первом случае нодальные плоскости идентифицируются: NP1(4а) — как надвиг с элементами залегания 203/28°, NP2(4а) — как взброс (3/62°). Во второй модели нодальные плоскости так же представлены надвигом и взбросом, но

с противоположными направлениями падения: надвиг NP1(4б) падает на северо-северо-восток (22/32°), взброс NP2(4б) — на юго-юго-запад (193/58°). В этой интерпретации указанные группы очагов землетрясений можно рассматривать как самостоятельные структурно-кинematicкие парагенезисы сейсмогенных разрывов и смещений, отражающие две, хоть и близкие по своим параметрам, но все-таки различные обстановки сейсмогенеза.

Возможна и иная трактовка данной совокупности решений механизмов очагов. Абстрагируясь от полученных параметров ориентировок осей Р и Т, поскольку они являются производными от положений нодальных плоскостей, можно отметить одну осо-

бенность в условиях залегания последних, а именно: три из четырех максимумов их полюсов (рNP1(4a), рNP2(4a) и рNP2(4б)) лежат в одной плоскости, и, следовательно, сами плоскости пересекаются на стереограмме в одной точке, которую можно рассматривать в качестве проекции промежуточной оси напряжений N для всей совокупности сейсмогенных разрывов данного множества (см. рис. 8, а). По определению в этой же плоскости будут располагаться и оси напряжений P и T . Предположив, что из каждой вышеописанной пары нодальных плоскостей только одна плоскость соответствует сейсмогенному разрыву, а реализация последнего может осуществляться по типу как L -, так и R -сколов, по имеющимся данным можно построить еще одну стереографическую модель сейсмогенеза (рис. 8, г). В этой модели из всех нодальных плоскостей, показанных на рис. 8, а, задействованы только плоскости, пересекающиеся

в точке, соответствующей положению оси N , две из которых имеют южное падение. Таким образом, условия сейсмического разрывообразования, аппроксимированного полученной моделью, отражают обстановку субмеридионального сжатия ($P=186/8^\circ$, $T=50/78^\circ$, $N=277/8^\circ$) и возможность возникновения в очагах субширотных разрывов с южным падением по типу L - и R -сколов. При этом L -сколы, имеющие более крутой угол падения ($193/54^\circ$), характеризуются как взбросы, а более пологие R -сколы ($202/28^\circ$) — как надвиги одного структурно-кинематического парагенезиса. В этой модели нодальные плоскости с северным падением — NP2(4a) соответствуют положению L' -сколов, в то время как активизация NP1(4б) в указанных условиях теоретически маловероятна.

Как видно, полученные модели весьма близки по своим параметрам и отражают проявление взбросового деформационного режи-

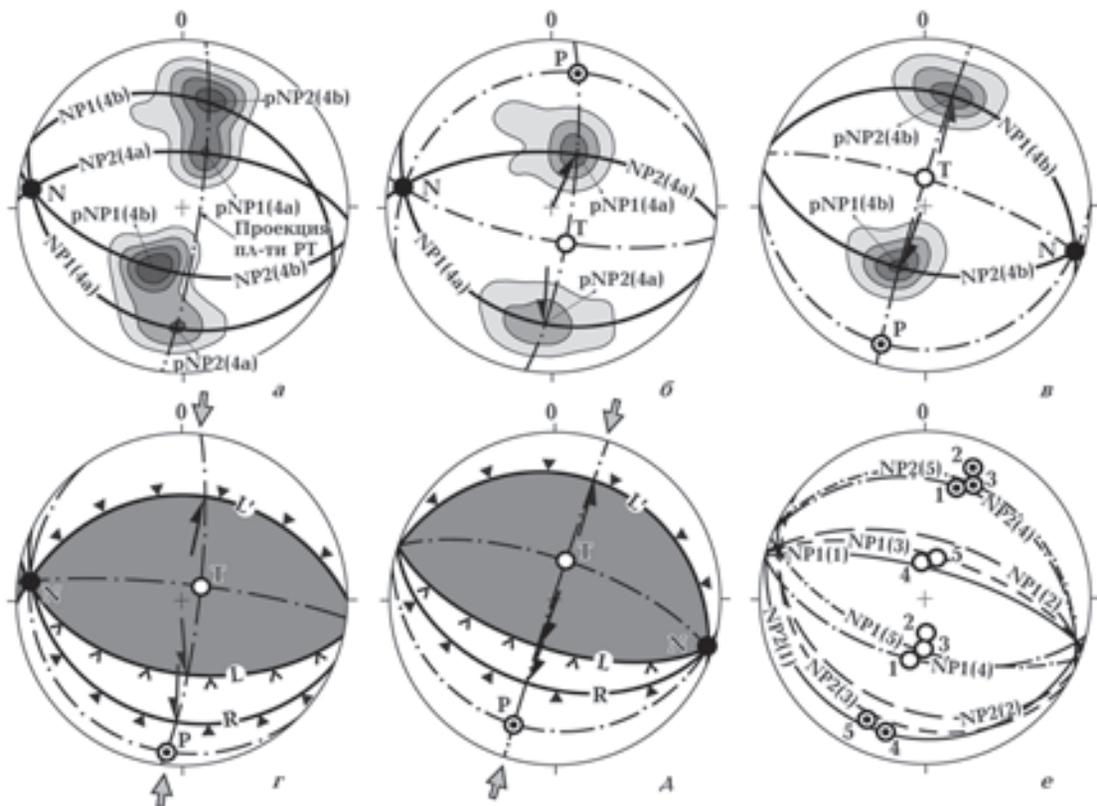


Рис. 8. Структурно-кинематические парагенезисы сейсмогенных разрывов в очагах и стереографические модели сейсмогенных зон взбросового типа, сформировавшихся в обстановке субмеридионального сжатия — 4-й тип сейсмогенеза (в скобках — количество очагов): а — сводная стереограмма распределения полюсов нодальных плоскостей в механизмах очагов 4-го типа (27); б, в — парагенезисы 4а (14) и 4б (13) взбросовых сейсмогенных разрывов; г — сводная стереографическая модель сейсмогенеза 4-го типа (27); д — верификационная модель по решениям механизмов очагов контрольной выборки (7); е — согласованность проекций осей напряжений одной группы взбросовых очагов с нодальными плоскостями другой группы. Условные обозначения см. на рис. 2.

ма в обстановке субмеридионального сжатия. Структурным аргументом в пользу последней модели является наличие субширотного взброса с южным падением в районе локализации одной из групп очагов этого типа (33° с.ш., 48° в.д.) (hera.wdcb.ru/tols/tecton/db_modern_arabian.html).

Указанные очаги локализованы в пределах нескольких относительно узких непротяженных зон субширотной ориентировки, пространственно приуроченных (примыкающих) к сейсмогенным зонам 1-го и 3-го типов и косопоперечных по отношению к ним (рис. 9).

Суммарный (включая «контрольную» выборку) каталог землетрясений данного типа содержит четыре катастрофических события с $M \geq 6,0$ (07.12.88 г., $M=6,8$; 22.06.2002 г., $M=6,2$;

27.11.2005 г., $M=6,1$; 23.11.2011 г., $M=7,1$), повлекших многочисленные жертвы и разрушения. Три из них (в том числе самое крупное землетрясение в Турции за последние годы с $M=7,1$) произошли в последнее десятилетие.

Таким образом, более 90 % имеющихся решений механизмов очагов исследуемой территории можно аппроксимировать четырьмя типами стереографических моделей (см. рис. 2, в; 4, в; 6, б; 8, г). Эти модели отражают основные деформационные режимы и кинематические обстановки сейсмогенного разрывообразования в регионе и являются критериями для структурно-кинематической идентификации сейсмогенных разрывов и зон, в пределах которых локализованы очаги определенного типа.

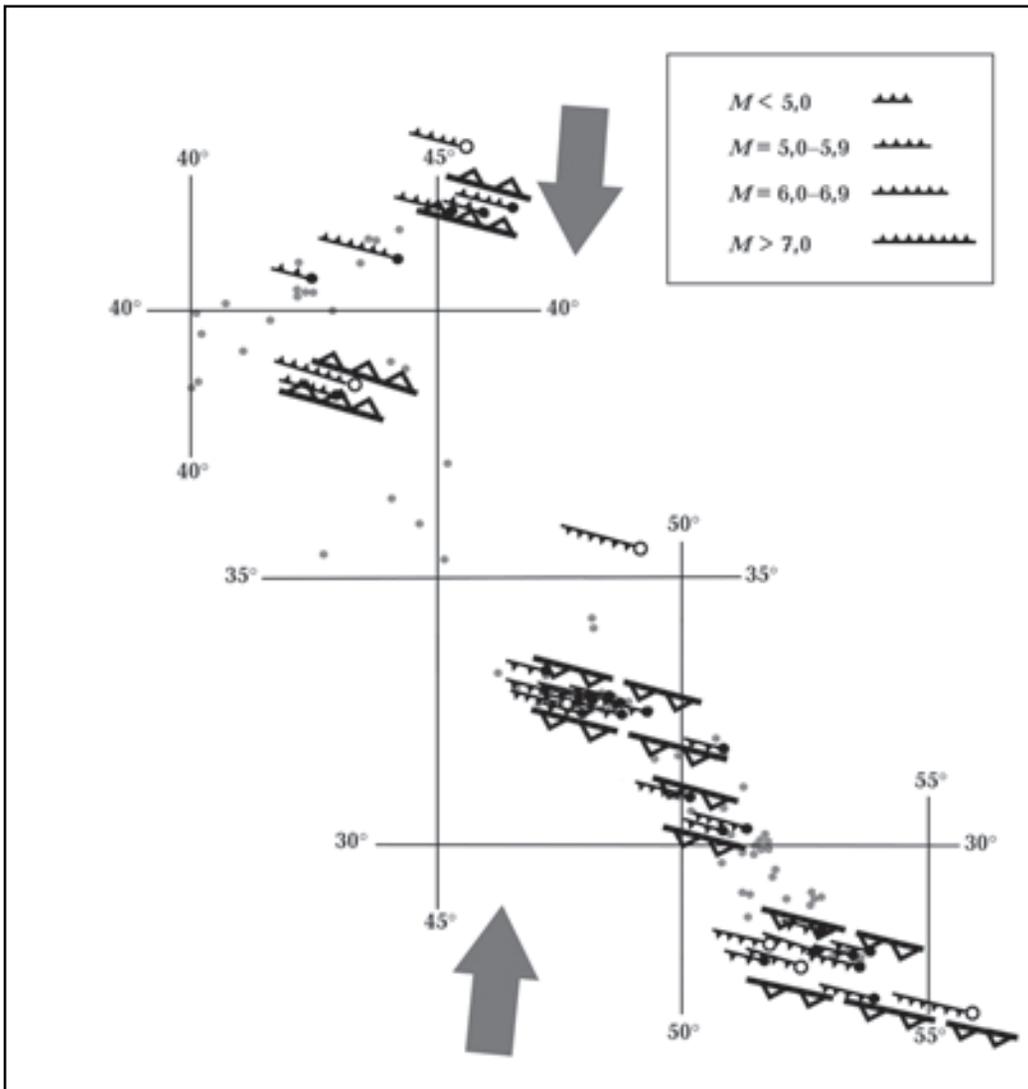


Рис. 9. Особенности площадного распределения и структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений 4-го типа. Условные обозначения см. на рис. 3.

Верификация моделей сейсмогенеза. Для верификации полученных результатов использованы данные из «контрольной» выборки, которая включает решения по 23 очагам землетрясений как предшествующим времени «основного» каталога, так и произошедшим в последующий период (до настоящего времени). Проверка осуществлялась:

- путем сравнения параметров очагов землетрясений «контрольной» выборки, соответствующих тому или иному типу сейсмогенеза, с параметрами однотипных моделей и построения верификационных моделей (при нескольких решениях механизмов данного типа с незначительным разбросом их параметров);
- анализом пространственной приуроченности очагов «контрольной» выборки к зонам сейсмогенеза соответствующих типов.

При построении верификационных моделей применялись те же приемы, что и при создании моделей с использованием данных «основной» выборки.

Результаты разбраковки очагов по деформационным режимам и кинематическим обстановкам формирования показали, что из 23 событий «контрольной» выборки к вышеописанным четырем типам сейсмогенеза относится 18 землетрясений (табл. 3). Остальные пять очагов вместе с их единичными аналогами из «основной» выборки отражают условия юго-восточного—северо-западного сжатия (рис. 10, $a-r$), что позволило обосновать еще два типа сейсмогенеза (сдвиговый и взбросовый) и даже построить модель одного из них (см. ниже).

Сравнение параметров основных (см. рис. 2, b ; 4, b ; 6, b ; 8, r) и верификационных (см. рис. 2, e ; 4, e ; 6, r ; 8, d) стереографических моде-

Т а б л и ц а 3. Сравнение параметров основных и верификационных моделей четырех типов сейсмогенеза

Тип сейсмогенеза	Модели по выборкам (число очагов)	Элементы залегания (азимут простираения—направление падения—угол падения, град) и структурно-кинематический тип основных сейсмогенных разрывов (слева — наиболее вероятных, справа — возможных)				Ориентировка главных осей напряжений		Деформационный режим
						Р	Т	
1	Основная (25)	305-ЮЗ-88 37-СЗ-88	правый сдвиг (L) левый сдвиг (L')	328-ЮЗ-88	правый сдвиг (R)	172/02°	82/03°	Сдвиговый
	Верификация (8)	304-СВ-78 34-СЗ-82	правый сдвиг (L) левый сдвиг (L')	325-СВ-82	правый сдвиг (R)	167/14°	258/03°	Сдвиговый
						$\Delta=13^\circ (5^\circ)$	$\Delta=7^\circ (4^\circ)$	
2	Основная (9)	91-С-84	левый сдвиг (L)	70-ССЗ-80	левый сдвиг (R)	42/06°	135/14°	Сдвиговый
	Верификация (2)	106-90	левый взбросо-сдвиг (L)	88-С-76	левый взбросо-сдвиг (R)	54/24°	158/24°	Сдвиговый
						$\Delta=21^\circ (12^\circ)$	$\Delta=25^\circ (23^\circ)$	
3	Основная (20)	321-СВ-58	взброс (L)	295-ЮЗ-34	надвиг (L')	39/12°		Взбросовый
	Верификация (1)	310-СВ-49	взброс (L)	321-ЮЗ-41	надвиг (L')	45/05°		Взбросовый
						$\Delta=9^\circ (6^\circ)$		
4	Основная (27)	283-Ю-54	взброс (L)	292-ЮЮЗ-28	надвиг (R)	186/08°		Взбросовый
	Верификация (7)	286-ЮЗ-65	взброс (L)	302-ЮЮЗ-24	надвиг (R)	198/19°		Взбросовый
						$\Delta=15^\circ (12^\circ)$		

лей соответствующих типов сейсмогенеза показало высокую сходимость построений даже в тех случаях, когда в основу верификационных моделей было заложено минимальное количество механизмов очагов из «контрольной» выборки (два очага — для 2-го типа, один — для 3-го). Расхождение (Δ°) в ориентировках (азимут/угол падения) основных структурообразующих осей напряжений составило 7—21° (см. табл. 3); разница же в направлении действия основной оси P (без учета угла падения — указана в скобках) не превышает 12°. Указанные величины не выходят за пределы отклонений, допустимых при сейсмологическом решении механизма каждого конкретного очага.

Пространственное распределение очагов «контрольной» выборки, отнесенных к тому или иному типу, также хорошо согласуется с положением соответствующих зон сейсмогенеза, геометризованных по данным «основного» каталога (см. рис. 3, 5, 7, 9). Даже в случае весьма ограниченного распространения очагов 2-го типа (см. рис. 5, а) соответствующие события из «контрольной» выборки приурочены именно к этой зоне. Это же можно констатировать и в отношении сдвиговых землетрясений, сформировавшихся в обстановках юго-восточного—северо-западного сжатия, которые образовали весьма компактную группу в зоне сочленения системы Загроса и Северо-Анатолийского разлома (см. рис. 5, б).

Таким образом, большинство очагов «контрольной» выборки по своим параметрам и местоположению соответствуют построенным моделям сейсмогенеза четырех основных типов и локализовано в пределах зон, характеризующихся этими моделями. Остальным пяти землетрясениям «контрольной» выборки соответствуют единичные очаги «основного» каталога, что позволило обосновать наличие и определить параметры еще двух типов сейсмогенеза, отнесенных к разряду слабопроявленных ввиду малого количества очагов соответствующих типов.

Слабопроявленные типы сейсмогенеза играют второстепенную роль в сейсмотектоническом процессе исследуемой территории. Они представлены несколькими очагами, сформировавшимися в разных, не поддающихся унификации (ввиду статистической непредставительности соответствующих событий) кинематических обстановках.

Прежде всего следует отметить землетрясения сдвигового (13.04.1998 г., $M=4,8$) и взбросового (05.08.1998 г., $M=4,9$) типов, отражающие

наличие условий юго-восточного—северо-западного сжатия.

Первое из них ($P=136/14^\circ$, $T=228/8^\circ$, $N=345/74^\circ$, деформационный режим — сдвиговый), локализованное в области сочленения системы Загроса и зон Анатолийских разломов, по-видимому, представляет собой активизировавшийся фрагмент Северо-Анатолийского разлома (см. рис. 5, б). В пользу этого свидетельствует пространственно-кинематическая характеристика одной из нодальных плоскостей (NP2), идентифицируемой как субвертикальный правый сдвиг широтного простирания. Следует отметить, что «контрольная» выборка включает в себя еще три землетрясения подобного типа. Два из них (25.03.2004 г., $M=5,0$ и 28.03.2004 г., $M=5,3$) локализованы в непосредственной близости от очага 13.04.1998 г. и по решениям механизмов являются полным его аналогом — расхождения в их параметрах составляют всего несколько градусов. Это позволило объединить их в один парагенезис сейсмогенных разрывов (см. рис. 10, а) и обосновать 5-й тип сейсмогенеза (сдвиговый, в обстановке юго-восточного—северо-западного сжатия), параметры модели которого составляют: $P=138/12^\circ$, $T=230/2^\circ$, NP2 (идентифицируемая как L-скол)= $5/81^\circ$, NP1 (L'-скол)= $273/81^\circ$ (см. рис. 10, б). Третье землетрясение (точнее два толчка с $M=6,5$ и $M=6,4$, следовавших один за другим с интервалом менее 10 мин) произошло 11.08.2012 г. в Северо-Западном Иране к востоку от предыдущих. Оно вызвало сильные разрушения населенных пунктов (Ахар, Варазкан, Хариз); число жертв среди населения превысило 300 человек, более 2 тыс. получили ранения. В течение двух суток после основного толчка было зарегистрировано 25 афтершоков с $M \geq 4,1$ (seme.gsras.ru/cgi-bin/info_quake.pl). Решение механизма этого очага (см. рис. 10, в): $P=308/24^\circ$, $T=48/21^\circ$, NP2= $179/57^\circ$ (правый сдвиг) также можно считать вполне удовлетворяющим условиям полученной модели сейсмогенеза 5-го типа.

В решении механизма очага 05.08.1998 г. ($P=123/28^\circ$, $T=331/59^\circ$, $N=220/12^\circ$, деформационный режим — взбросовый) положение оси сжатия на стереограмме почти совпадает с таковой сдвигового землетрясения 13.04.1998 г., указывая на определенную общность условий их формирования. Сейсмогенному разрыву соответствует крутопадающая нодальная плоскость северо-восточного простирания (NP1), характеризующаяся как взброс с элементами залегания $133/74^\circ$ (см. рис. 10, г). В условиях юго-

восточного—северо-западного сжатия также реализовались два разрушительных (с человеческими жертвами) землетрясения, содержащиеся в «контрольной» выборке. Одно из них с $M=6,0$ произошло на территории Западного Ирана 31.03.2006 г. ($P=123/48^\circ$, $T=325/40^\circ$, деформационный режим — взбросо-сбросовый). Второе с $M=6,1$ ($P=149/6^\circ$, $T=341/84^\circ$, деформационный режим — взбросовый) — 10.09.2008 г. на побережье Южного Ирана. Сейсмогенные разрывы в очагах этих землетрясений реализовались как взбросы северо-восточного простирания. Подобие кинематических обстановок формирования всех трех очагов позволяет обосновать еще один — 6-й тип сейсмогенеза (взбросовый, в обстановке юго-восточного—северо-западного сжатия), однако построение стереографической модели этого типа затруднительно ввиду малого количества подобных событий и существенного разброса параметров решений механизмов их очагов (см. рис. 10, *r*).

Вообще говоря, условия юго-восточного—северо-западного сжатия в пределах системы Загроса не являются случайными, о чем свидетельствуют результаты тектонофизических и сейсмологических исследований в разных регионах Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса. Это позволяет обосновать на непредставительном материале наличие двух вышеуказанных типов сейсмогенеза — сдвигового (5-й) и взбросового (6-й), обусловленных этими обстановками.

Очаги землетрясений *сбросового типа* «разбросаны» вдоль внешнего (по отношению к Аравии) края системы Загроса, отражая наличие разрывов в теле Евразийской плиты, формирующихся под воздействием разноориентированных полей напряжений. Параметры решений механизмов очагов этих землетрясений весьма разнятся между собой, что не позволяет обосновать наличие устойчивых обстановок растяжения и воплотить это в виде статистически обеспеченной модели сейсмо-

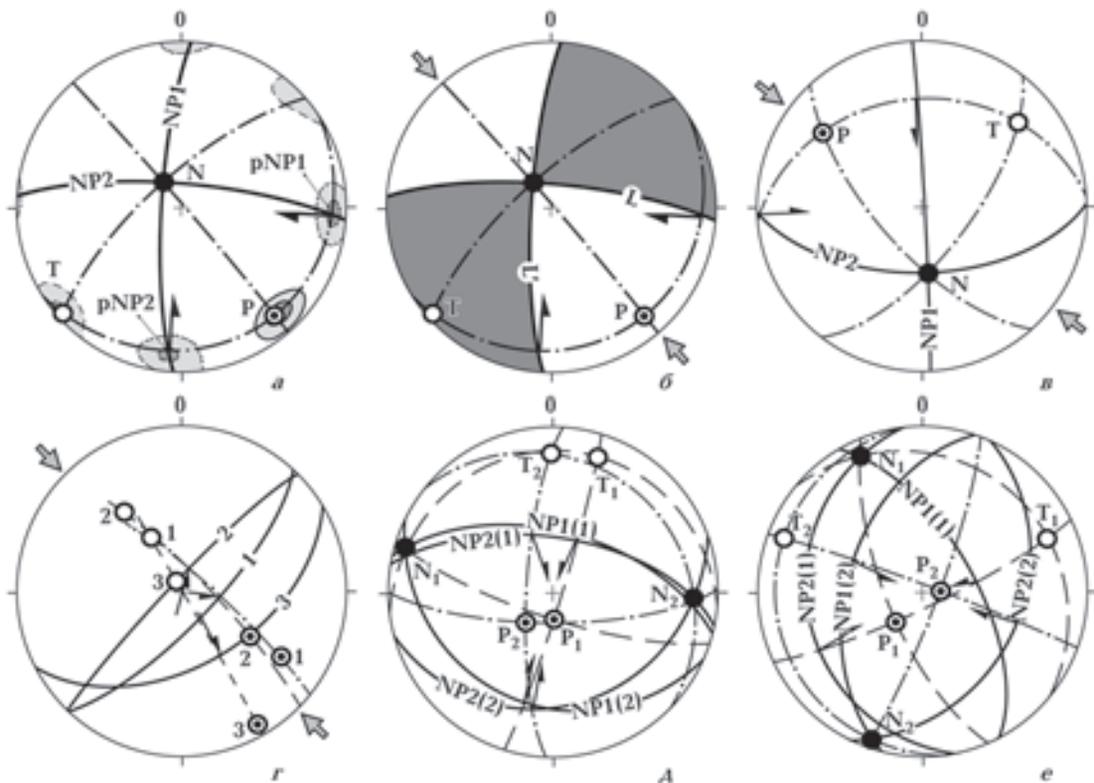


Рис. 10. Слабопроявленные типы сейсмогенеза (в скобках — количество очагов): *a* — парагенезис сдвиговых сейсмогенных разрывов, сформировавшихся в обстановке юго-восточного—северо-западного сжатия (3); *b* — стереографическая модель сейсмогенеза 5-го типа (3); *в* — механизм очага разрушительного землетрясения 11.08.2012 г.; *г* — основные параметры очагов взбросового типа, сформировавшихся в обстановке юго-восточного—северо-западного сжатия (6-й тип сейсмогенеза); *д* — основные параметры очагов сбросового типа, сформировавшихся в обстановке субмеридионального растяжения (1 — 02.02.1985 г., 2 — 27.03.1985 г.); *е* — то же самое, для очагов субширотного растяжения (1 — 23.07.1981 г., 2 — 21.08.1998 г.). Условные обозначения см. на рис. 2.

генеза сбросового типа. Тем не менее можно отметить некоторые особенности проявления этой немногочисленной группы очагов:

- два землетрясения (02.02.1985 г. и 27.03.1985 г.) реализовались в условиях субмеридионального (рис. 10, д), два (23.07.1981 г. и 21.08.1998 г.) — субширотного растяжения (рис. 10, е);
- при уровне магнитуд, соответствующем средним показателям по региону ($M=4,4\div 5,6$), сбросовые землетрясения характеризуются большими глубинами их очагов — от 33 до 52 км, что превышает средние глубины проявления сейсмогенеза в пределах Загроса и отражает, по-видимому, особенности локальных деформационных обстановок на границе земная кора—мантия.

Таким образом, анализ пространственно-распределения четырех основных типов сейсмогенеза показал, что соответствующие этим типам очаги землетрясений локализованы в пределах зон разной ориентировки и протяженности, отражая ячеисто-решетчатый характер проявления сейсмичности в регионе (рис. 11).

Обсуждение результатов. Выполненная структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса позволяет уточнить некоторые аспекты сеймотектоники и геодинамики изучаемого сегмента альпийского Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса и более детально осветить особенности сейсмогенеза как такового, в частности:

- особенности сейсмического разрывообразования как отражение напряженно-деформированного состояния тектоносферы;
- виды трансформаций структурообразующих полей напряжений в процессе сеймотектогенеза.

Построенные стереографические модели основных типов сейсмогенеза, проявившихся в пределах системы Загроса, характеризуют в основном две доминирующие кинематические обстановки — субмеридионального и диагонального (юго-западного—северо-восточного) сжатия, обусловленные геодинамическими особенностями изучаемой территории. Первая из этих обстановок отражает продолжающееся в настоящее время движение Аравийской плиты в северном направлении. Возникновение условий юго-западного—северо-восточного сжатия вызвано процесса-

ми дивергенции в пределах Красноморского рифта, вследствие чего Аравийский полуостров перманентно «напирает» на Евразию в северо-восточном направлении.

Проявление указанных обстановок в виде дискретных событий — землетрясений того или иного типа свидетельствует о том, что рассматриваемая геодинамическая система постоянно находится в *состоянии неустойчивого равновесия*, подвергаясь сжатию в двух направлениях. При этом ее современные деформации, в частности сейсмогенные разрывы, отражают *не суммарное воздействие указанных типов полей напряжений как некоего результирующего поля, а поочередное преобладание напряжений одного типа поля над другим*.

Подобный характер разрывообразования под влиянием разноориентированных систем напряжений не случаен. Несмотря на различия в строении разных фрагментов альпийского Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса и многообразии геодинамических условий, проявляющихся тем или иным образом в его пределах, сейсмогенное разрывообразование, как правило, повсеместно характеризуется избирательностью ориентировок главных осей напряжений (особенно осей сжатия). Так, на основании анализа механизмов очагов землетрясений О. И. Гуценко установил, что «...практически однородное по ориентации главных осей поле мегарегиональных напряжений прослеживается в пределах обширной, различной по структуре и геологической истории области тектоносферы от Кавказа на западе вплоть до Зондских островов на юго-востоке во всем интервале глубин от 10—30 до 110—300 км» [Гуценко, 1979, с. 42]. В доказательство им приведены данные об ориентировках осей напряжений в 330 очагах землетрясений, из которых 194 (59 %) характеризуются субмеридиональным сжатием при малых углах наклона оси сжатия, 51 (15 %) — субширотным и 85 (26 %) — диагональным сжатием, близким по направлению к ориентировке максимальных касательных напряжений «мегарегионального» (по О. И. Гуценко) поля. Данное утверждение справедливо не только для Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса, но и для процессов сейсмогенеза во внутриплатформенных областях. К примеру, сейсмологами Беларуси при решении механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах северо-западной части Припятского прогиба, установлено,

что большая их часть, несмотря на различие структурно-кинематических типов разрывов в очагах, происходила в условиях субмеридионального сжатия с небольшим (до 10°) отклонением оси сжатия на северо-северо-запад [Аронов, Аронова, 2008].

Указанные особенности «мегарегионального» поля обуславливают возможность и корректность сопоставления параметров моделей сейсмогенеза системы Загроса с результатами тектонофизического изучения условий новейшего тектонического разрывообразования и сейсмичности Крымско-Черноморского региона.

Во-первых, направления меридионального ($\sim 355^\circ \leftrightarrow \sim 175^\circ$) и юго-западного–северо-

восточного ($\sim 40^\circ \leftrightarrow \sim 220^\circ$) сжатий, обусловивших формирование основной части землетрясений системы Загроса (рис. 12, а), как и ориентировки сейсмогенных разрывов в соответствующих моделях сейсмогенеза, согласуются с параметрами некоторых структурообразующих полей напряжений и парагенезисов субвертикальных сколовых разрывов, установленных ранее для плейстоценового этапа альпийского тектогенеза при изучении разрывных структур Крыма и Карпат [Борисенко и др., 1995 Новик, Вольфман, 1997].

Во-вторых, тектонофизическими исследованиями последних лет, имеющими целью идентификацию структурно-кинематических парагенезисов тектонических разрывов (сме-

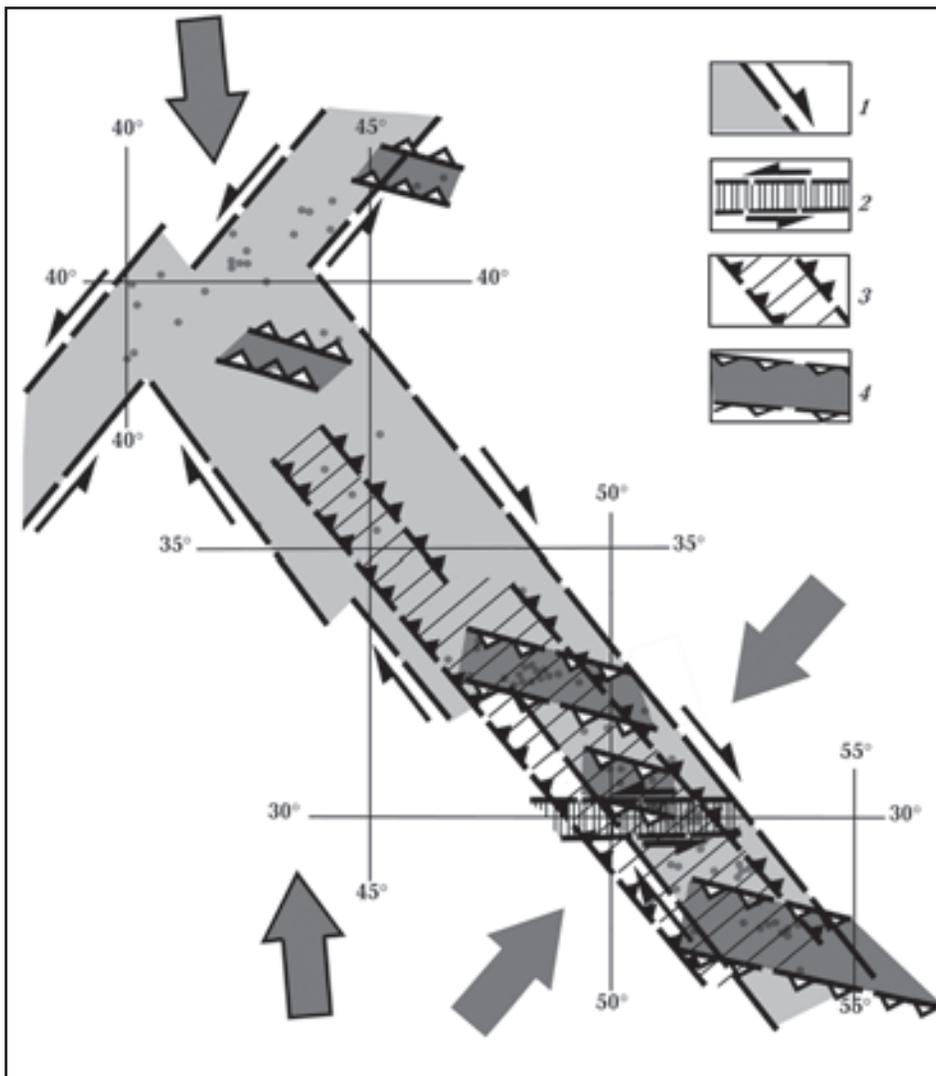


Рис. 11. Схема основных сейсмогенных зон системы Загроса: 1, 2 — сдвиговых 1-го (1) и 2-го (2) типов и направления смещений по ним; 3, 4 — взбросовых 3-го (3) и 4-го (4) типов (бергштрихи — в направлении падения зон). Большие парные стрелки — направления регионального субмеридионального и юго-западного–северо-восточного сжатия.

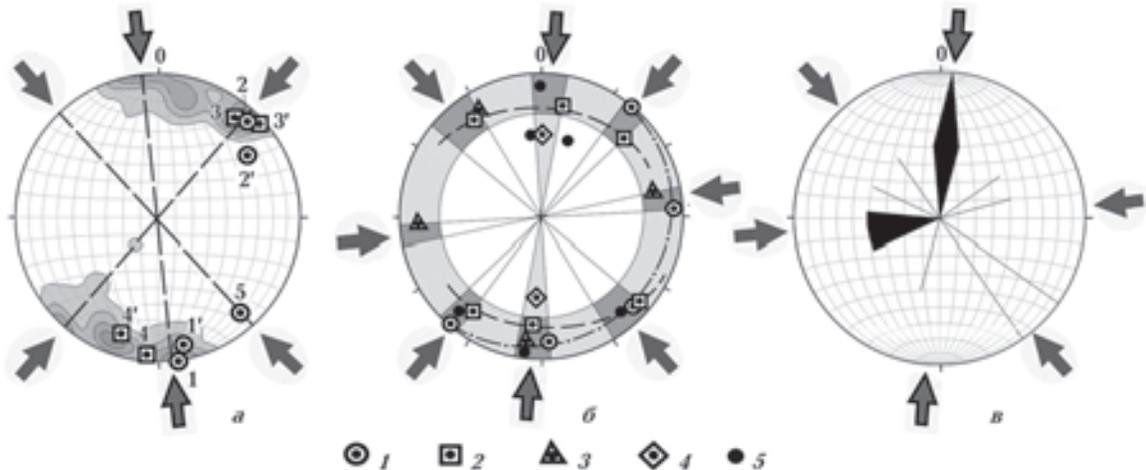


Рис. 12. Сопоставление кинематических условий формирования сейсмогенных (в очагах землетрясений — по сейсмологическим данным) и тектонических (в пределах Горного Крыма — по тектонофизическим данным) разрывов: *а* — стереограмма распределения осей сжатия в решениях механизмов очагов системы Загроса и их ориентировки в моделях сейсмогенеза (цифры — тип сейсмогенеза, с индексами — верификационные модели); *б* — стереограмма ориентировок осей сжатия в моделях деформационных режимов новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма [Вольфман и др., 2012]; *в* — роза-диаграмма ориентировок осей сжатия в очагах землетрясений Крымско-Черноморского региона [Реконструкция..., 2011]; 1–5 — проекции осей сжатия сдвиговых (1), взбросовых (2), взбросо-сдвиговых (3), взбросо-сбросовых (4) и одноосного сжатия (5) деформационных режимов.

щений) и реконструкцию условий их формирования, установлены некоторые фундаментальные, с точки зрения автора, особенности разрывообразования в пределах Горного Крыма [Реконструкция..., 2011; Вольфман и др., 2012]. Одна из них заключается в том, что проекции «активных» осей напряжений σ_1 и σ_3 (обуславливающих соответственно обстановку сжатия и растяжения) на стереограмме группируются в пределах четырех пар узких, диаметрально противоположных секторов меридиональной, широтной и диагональных ориентировок. При этом усложнение типов деформационных режимов (от сдвиговых к взбросо-сдвиговым, взбросовым и т. д.) происходит путем «опрокидывания» первичных (субгоризонтальных сжимающих—растягивающих) систем напряжений относительно земной поверхности таким образом, что оси σ_1 или σ_3 несколько изменяют углы падения, сохраняя свои ориентировки в границах этих секторов (рис. 12, б). В моделях сейсмогенеза системы Загроса «задействованы», главным образом, два из указанных направлений сжатия — субмеридиональное и юго-западное—северо-восточное, в меньшей мере — юго-восточное—северо-западное; при этом направления сжимающих напряжений практически не выходят за рамки соответствующих секторов. Параметры очагов землетрясений других типов, не охваченных этими моделя-

ми, как правило, также удовлетворяют этому распределению.

В-третьих, установлено соответствие ориентировок структурообразующих осей напряжений в решениях механизмов очагов Крымско-Черноморского региона (по 26 землетрясениям [Пустовитенко Б. Г., 1977, 2002; Пустовитенко А. А., 2002 и др.]) секторальному распределению соответствующих осей в моделях деформационных режимов Горного Крыма (рис. 12, в). Правда, основными деформационными режимами, обусловившими возникновение сейсмогенных разрывов в очагах землетрясений, являются взбросовые, в меньшей мере — взбросо-сбросовые, сбросовые и взбросо-сдвиговые. Это изменение условий деформирования отражает наличие зональности, выражающейся в усложнении типов разрывных деформаций в направлении от Крымского полуострова к центру Черноморской впадины. Обратная зональность наблюдается по направлению к основным сейсмогенерирующим структурам турецкого побережья Черного моря, где сдвиговый характер деформаций очаговых зон весьма распространен [Реконструкция..., 2011; Вольфман и др., 2012]. При этом ориентировки главных осей структурообразующих полей напряжений соответствуют вышеуказанному секторальному распределению.

Таким образом, можно полагать, что избирательность ориентировок главных осей напряжений, обуславливающих процессы

современного тектогенеза вообще и сейсмогенеза в частности проявляется как минимум на мегарегиональном (а часто и на общепланетарном) уровне и является фундаментальным свойством тектоносферы. На общепланетарный характер этого явления в первую очередь указывает строгая избирательность ориентировок фрагментов срединно-океанических хребтов, смещаемых столь же избирательно ориентированными трансформными разломами. Поэтому при всей привлекательности гипотезы конвективного массопереноса, составляющей основу современной геодинамики [Зоненшайн, Савостин, 1979 и др.], все же следует искать дополнительные объяснения разрывообразованию, проявляющему столь четкую симметрию относительно оси вращения Земли. Это должен быть некоторый фактор, имеющий общепланетарное значение, влияющий как на направленность конвективных струй, так и на формирование структурно-кинематических особенностей тектонических границ крупных сегментов тектоносферы. При этом структура восходящих и нисходящих ветвей конвекционных потоков должна быть таковой, чтобы было возможным моделирование избирательно направленных систем напряжений, формирующих закономерно ориентированные системы тектонических разрывов разных рангов. Вышесказанное дает основание отказаться от однофакторных альтернативных концепций тектогенеза, отдающих предпочтение в качестве основного структурообразующего фактора либо исключительно конвективному массопереносу [Зоненшайн, Савостин, 1979 и др.], либо только воздействиям, вызванным изменениями ротационного режима Земли или внешними по отношению к Земле причинами, например лунно-солнечными приливами [Авсюк, 1987 и др.]. Представляется, что все эти факторы в той или иной мере формируют особенности планетарного тектогенеза. При этом в качестве фактора, энергетически обеспечивающего перемещение огромных масс литосферы на большие расстояния, выступают эндогенные процессы в недрах планеты, в то время как направленность плитных и внутриплитных перемещений вдоль разрывов, равно как и ориентировка самих разрывов, обуславливаются ротационными и внешними воздействиями.

Вышесказанное предполагает наличие определенной иерархии структурообразующих систем напряжений, определяющих кинематические обстановки в пределах тех или

иных регионов и возможность их локальных (также вполне закономерно проявляемых) трансформаций в процессе сейсмотектогенеза, которые обеспечивают многообразие деформационных режимов разрывообразования. В этой связи обращает на себя внимание то обстоятельство, что ориентировки осей нормальных напряжений одних типов сейсмогенеза совпадают с направлениями максимальных касательных напряжений, соответствующих положению разрывов в системах иного типа. Особенно наглядно это проявляется во взаимоотношении сдвиговых деформаций, примером чему могут служить модели сейсмогенеза 1-го и 2-го типов (см. рис. 2, в, 4, в), в которых основные параметры сдвиговых и близких к ним (взбросо- и сбросо-сдвиговых) режимов соотносятся таким образом, что диагонально ориентированные оси сжатия согласуются с направлением действия максимальных касательных напряжений систем ортогонального сжатия и наоборот. Принципиальную возможность подобного соотношения однотипных систем напряжений и разрывов взбросового типа иллюстрирует рис. 8, е, на котором показаны результаты решений механизмов очагов некоторых землетрясений «контрольной» выборки. Приведенные примеры отражают особенности изменения напряженно-деформированного состояния среды, когда поле напряжений меняет свою ориентировку на 45° .

Анализируемый в настоящей работе материал не содержит критериев для определения, какая из обстановок (меридионального или юго-западного–северо-восточного сжатия) является первичной, а какая — вторичной, производной от первой. В то же время геодинамические предпосылки для их возникновения достаточно очевидны (см. выше), что позволяет на данном этапе исследований считать указанные региональные обстановки условно равнозначными и принять каждую из них в качестве отправной точки в цепях последовательных трансформаций структурообразующих (в том числе сейсмогенерирующих) полей напряжений (рис. 13, а, б).

Определенные трудности возникают и при выборе деформационного режима, который можно рассматривать в качестве первичного в условиях тех или иных обстановок. Если в первом случае (см. рис. 13, а) вполне определенно можно полагать, что таковым является сдвиговый режим, то во втором (см. рис. 13, б) подобное утверждение выглядит весьма со-



Рис. 13. Последовательность трансформаций сейсмогенерирующих систем напряжений в обстановках субмеридионального (а) и юго-западного—северо-восточного (б) сжатия.

мнительным ввиду локального распространения очагов данного типа. Вследствие этого критериями выделения исходных (доминирующих) условий и деформационных режимов послужили опять-таки региональные геодинамические факторы, а также особенности латерального распространения очагов тех или иных типов на изучаемой территории и их количественные соотношения. Так, двойственная геодинамическая природа системы Загроса (правосдвиговая и взбросо-надвиговая) дает основание считать именно эти обстановки основными (субмеридионального сжатия, сдвиговый деформационный режим и юго-западного—северо-восточного сжатия, взбросовый режим), на фоне которых происходят последующие трансформации полей напряжений. Об этом же свидетельствуют практически повсеместный характер распространения очагов соответствующих (1-го и 3-го) типов вдоль системы Загроса и их количественное преобладание над очагами других типов сейсмогенеза, характеризующихся относительно локальным распространением.

В первом случае, отражающем напряженно-деформированное состояние изучаемой геодинамической системы в результате современных перемещений Аравийской плиты в северном направлении, усложнение типов деформационных режимов (от сдвиговых к взбросо- и сбросо-сдвиговым и далее к взбросовым) реализуется в обстановке субмеридионального сжатия. Трансформации систем напряжений происходят главным образом путем

«опрокидывания» этих систем по отношению к горизонту таким образом, что оси сжатия изменяют угол падения, сохраняя свою ориентировку относительно сторон света. Неупорядоченная локализация взбросо- и сбросо-сдвиговых очагов землетрясений вдоль внешней (северо-восточной) части системы Загроса и в области ее сочленения с зонами Анатолийских разломов (см. рис. 3), а также высокая степень их сходства с очагами, формирующимися в условиях сдвиговых деформационных режимов (см. рис. 2), позволяет считать их результатом относительно слабых локальных трансформаций сдвигового поля напряжений (см. рис. 13, а). В то же время латеральная упорядоченность в распределении очагов землетрясений 4-го (взбросового) типа сейсмогенеза в виде компактных, косопоперечных по отношению к системе Загроса зон субширотной ориентировки (см. рис. 9) может свидетельствовать о регионально-избирательном характере взбросового поля. При этом взбросо-надвиговые разрывы в очагах данного типа можно отнести к разряду компенсационных структур, которые образуются в зоне динамического влияния сдвигового (1-го) типа в обстановках, когда возможности релаксации напряжений путем пластических деформаций и перемещений вдоль сдвигов полностью исчерпаны. Для реализации взбросо- и надвигообразования система должна претерпеть трансформацию таким образом, чтобы субвертикальное положение заняла ось минимального сжатия, т. е. напряжения,

обусловленные литостатическим давлением и трением горных пород, действующим вдоль плоскости формирующегося надвига, должны стать меньше горизонтальных составляющих системы напряжений. Процесс облегчается наличием свободной (земной) поверхности, в сторону которой в условиях избыточных горизонтальных напряжений может происходить выдавливание горных пород. Косвенным подтверждением подобной взаимосвязи между проявлениями сейсмогенеза 1-го и 4-го типов является наиболее часто наблюдаемая последовательность реализации землетрясений этих типов непосредственно друг за другом (23 %). Кроме того, преимущественно землетрясения этих типов достигают магнитуд с $M=6,0\div 7,1$ (6 и 4 события соответственно), в то время как среди землетрясений 2-го и 3-го типов только два очага характеризуются величинами $M=6,0\div 6,1$ (по одному событию). Что касается региональных обстановок юго-западного—северо-восточного сжатия, обусловленных влиянием процессов дивергенции Красноморского рифта на изучаемую территорию, то они предопределили вполне устойчивый характер проявления взбросового тектогенеза 3-го типа на всем протяжении системы Загроса, кроме ее северо-восточного фланга и области сочленения с зонами Анатолийских разломов. Последнее обстоятельство отражает общее ослабление интенсивности поля напряжений данного типа с юго-востока на северо-запад, выражающееся также в уменьшении количества соответствующих очагов землетрясений в этом направлении.

Регионально-избирательное проявление сейсмогенеза 2-го типа является следствием перестройки основного (взбросового) поля напряжений юго-западного—северо-восточного сжатия путем преобразования взбросовых деформационных режимов в сдвиговые в одном из узлов концентрации землетрясений обоих типов (см. рис. 13, б). Завершающее звено в этой цепи изменений напряженно-деформированного состояния земной коры — вторичные трансформации, обусловившие возникновение малочисленных очагов, близких к сдвиговому типу — взбросо-сдвиговых, свидетельствующих о соответствующем локальном усложнении сдвигового деформационного режима.

Таким образом, на примере особенностей сейсмогенеза системы Загроса показано, что в пределах изучаемого сегмента тектоносферы в настоящее время имеются предпосылки

для реализации нескольких типов структурообразующих полей напряжений. Одни из них, обусловленные геодинамическим взаимодействием литосферных плит или их фрагментов, играют доминирующую роль в процессе формирования сейсмогенеза региона. Проявляясь в виде очагов землетрясений и сейсмогенных зон 1-го и 3-го типов, эти поля могут рассматриваться в качестве сейсмологических индикаторов напряженного состояния исследуемой геосистемы в тот или иной, мизерный с геохронологической точки зрения, отрезок времени. Другие поля напряжений являются производными от первых; они отражают особенности как региональных трансформаций доминирующих систем (в виде проявлений сейсмогенеза 2-го и 4-го типов), так и локальные изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в зонах динамического влияния основных сейсмогенных структур региона (см. рис. 13).

Полученные данные о соотношениях сейсмогенных зон, формирующихся в разных кинематических обстановках и отражающих различные деформационные режимы сейсмогенеза, дают основание для уточнения взглядов на морфоструктурные и тектонические особенности зон конвергенции литосферных плит. Оно заключается в том, что смежные разноориентированные фрагменты некоторых из этих зон, в том числе образующие вершину Аравийского Синтаксиса, представляют собой не «структурные дуги» [Баженов, Буртман, 1990], приведенные на рис. 1, а «угловые» сочленения (пересечения) зон активизированных разломов разных рангов (см. рис. 3, 11 и др.). Облик «структурных дуг» они обретают в результате более интенсивного проявления деструктивных процессов в вершинах тектонических углов, образуемых сочленяющимися разломами, что создает предпосылки для возникновения (активизации) складчато-разрывных структур иных направлений и типов, формирующихся в трансформированных полях тектонических напряжений (см. рис. 11).

Заключение. Основные положения и выводы, полученные в результате анализа механизмов очагов землетрясений и структурно-кинематической идентификации сейсмогенных зон системы Загроса, можно сформулировать следующим образом.

1. Инструментарий и методические наработки полевой тектонофизики, в частности, способ выделения структурно-кинематических

парагенезисов тектонических разрывов (смещений) и построения их стереографических моделей, вполне применимы для изучения сейсмотектоники и геодинамики сейсмоактивных регионов. Их использование при анализе механизмов очагов землетрясений системы Загроса позволило выполнить унификацию и реконструкцию сейсмогенерирующих полей напряжений для групп очагов, характеризующихся сходными деформационными режимами и общностью кинематических обстановок их формирования, построить стереографические модели основных типов сейсмогенеза и установить особенности пространственного распределения очагов землетрясений, составивших основу этих моделей. Проверка полученных результатов путем создания верификационных моделей соответствующих типов сейсмогенеза (по данным «контрольной» выборки) и сравнения их параметров с параметрами однотипных моделей (по данным «основного» каталога) показала высокую степень сходимости выполненных построений. Это же можно констатировать и в отношении пространственной приуроченности очагов «контрольной» выборки к выделенным зонам сейсмогенеза соответствующих типов.

2. Основные особенности разрывообразования в очагах землетрясений изучаемого региона аппроксимированы четырьмя стереографическими моделями, которые отражают доминирующие кинематические обстановки (субмеридионального и юго-западного—северо-восточного сжатия) и деформационные режимы (сдвиговый и взбросовый) сейсмогенеза в пределах системы Загроса. Основные обстановки современного разрывообразования в регионе предопределены особенностями его строения и геодинамического развития: первая из них отражает продолжающееся в настоящее время движение Аравийской плиты в северном направлении, вторая — влияние на изучаемую территорию процессов дивергенции в пределах Красноморского рифта. Разнообразие деформационных режимов является следствием трансформаций полей напряжений, происходящих как на региональном, так и на локальном уровнях в зонах динамического влияния основных сейсмогенных структур региона. Трансформации осуществляются посредством «опрокидывания» доминирующих систем без изменения ориентировки осей сжатия или путем взаимного замещения ориентировок нормальных и касательных напряжений. Попарное комби-

наторное сочетание доминирующих обстановок и режимов (например, сдвиговый режим при субмеридиональном сжатии и т. п.) обусловило формирование четырех типов сейсмогенеза, которые в основном и определяют сейсмотектонические условия региона. В меньшей мере, однако с достаточно уверенно определяемыми параметрами, проявлены еще два типа сейсмогенеза — сдвиговый и взбросовый, обусловленные обстановками юго-восточного—северо-западного сжатия. Параметры всех построенных моделей согласуются как с «мегарегionalными» особенностями сейсмогенерирующих полей напряжений, так и с обстановками новейшего тектонического разрывообразования, идентифицированными по тектонофизическим данным: все они характеризуются строго секторальным распределением ориентировок главных осей напряжений в пределах узких азимутальных интервалов.

3. Анализ пространственного распределения основных типов сейсмогенеза показал, что соответствующие этим типам очаги землетрясений локализованы в пределах зон разной ориентировки и протяженности, указывая на ячеисто-решетчатый характер сейсмичности в регионе. Очаги 1-го типа неравномерно распределены вдоль внешней части северо-восточного фланга Аравийского Синтаксиса в виде протяженной правосдвиговой зоны северо-западного простираения, а также в области сочленения системы Загроса с зонами Анатолийских разломов, где вероятно реализация сейсмогенных разрывов как общезагросского направления, так и отвечающих ориентировкам Анатолийской и Северо-Анатолийской зон. Пространственно-кинематические особенности проявлений сейсмогенеза 3-го типа, локализованных вдоль зоны палеосубдукции Аравийской плиты под Евразийский континент, свидетельствуют о периодически продолжающемся в настоящее время поддвиге первого из этих сегментов тектоносферы под другой. При этом сдвиговая зона Загроса (1-го типа) ограничивает область распространения взбросо-надвиговых очагов пределами внутреннего (по отношению к Аравии) северо-восточного края Аравийского Синтаксиса. Очаги 2-го и 4-го типов образуют несколько относительно узких непротяженных зон субширотной ориентировки, пространственно приуроченных к сейсмогенным зонам 1-го и 3-го типов и косопоперечных по отношению к ним. Вероятно, некоторые из них являются фрагментами зон разломов,

секущих систему Загроса; однако сейсмичность на их флангах проявлена относительно слабо, концентрируясь, главным образом, в пределах самой системы. С одной стороны, столь упорядоченный характер распределения землетрясений разных типов позволяет рассматривать полученные стереографические модели сейсмогенеза в качестве структурно-кинематических моделей соответствующих сейсмогенных или очаговых зон. С другой стороны, пространственно-временная дифференциация проявлений сейсмогенеза разных типов в виде дискретных событий (землетрясений того или иного типа) свидетельствует о том, что рассматриваемая геодинамическая система находится в состоянии неустойчивого равновесия, подвергаясь сжатию в двух направлениях. При этом ее современные деформации, в частности сейсмогенные разрывы, отражают не суммарное воздействие разноориентированных полей напряжений как некоего результирующего поля, а поочередное преобладание одного поля напряжений над другим.

4. Дискретный характер проявления разнообразных кинематических обстановок сейсмогенеза, отражающий существенные изменения напряженно-деформированного состояния земной коры в течение весьма короткого временного интервала, расширяет возможности и полевой тектонофизики. Во-первых, он подтверждает необходимость дифференцирования тектонофизических данных при реконструкции условий новейшего тектонического разрывообразования путем объединения в один структурно-кинематический парагенезис лишь тех из них, которые характеризуются наиболее близкими параметрами и соответствуют одному полю напряжений. Вследствие этого в одном пункте тектонофизических наблюдений при достаточном количестве замеров может быть идентифицировано несколько парагенезисов, характеризующих влияние разноориентированных полей напряжений. Во-вторых, такой подход дает возможность на региональном уровне проследить особен-

ности проявления доминирующих обстановок тектонического разрывообразования и обосновать последовательность трансформаций полей напряжений, отражающих изменения напряженно-деформированного состояния геологической среды.

5. Структурно-кинематические особенности сейсмогенеза разных типов позволяют уточнить конфигурацию современных конвергентных швов, образованных в результате взаимодействия литосферных плит. Есть основания полагать, что смежные разноориентированные фрагменты некоторых из этих швов зон, в том числе образующие вершину Аравийского Синтаксиса, представляют собой не «структурные дуги», а «угловые» сочленения (пересечения) зон активизированных разломов разных рангов. Облик «структурных дуг» они приобретают в результате более интенсивного проявления деструктивных процессов в вершинах тектонических углов, образуемых сочленяющимися или пересекающимися разломами.

6. Предварительный анализ деформационных режимов и кинематических обстановок сейсмогенеза в пределах всего западного фланга Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса (от Гибралтара до Каспийского моря и Оманского залива) показал, что полученные модели не исчерпывают всего многообразия условий формирования сейсмичности этого сегмента тектоносферы, характеризующегося более широким спектром геоструктур и их взаимодействий, чем система Загроса. Тем не менее эти модели являются вполне универсальными, системными элементами мегарегионального сейсмогенеза. Можно уверенно полагать, что методические приемы построения и анализа стереографических моделей сейсмогенеза разных типов дают алгоритм решения проблем сеймотектоники всего западного фланга Средиземноморско-Гималайского складчатого пояса и изучения влияния его геоструктур на особенности проявления сейсмичности в пределах смежных с ним территорий.

Список литературы

Авсюк Ю. А. Сопоставление эндогенных регионов материков в устойчивую геосинклинально-платформенную стадию со схемой приливной эволюции системы Земля—Луна // Стрoение и эволюция тектоносферы. — Москва: Изд-во ИФЗ АН СССР, 1987. — С. 193—216.

Аронов А. Г., Аронова Т. И. Сейсмологические наблюдения в Беларуси: Сейсмологический бюллетень Украины за 2006 год. — Севастополь: НПЦ «Экоси-Гидрофизика», 2008. — С. 75—97.

Баженов М. А., Буртман В. С. Структурные дуги

- альпийского пояса: Карпаты—Кавказ—Памир. — Москва: Наука, 1990. — 167 с.
- Борисенко Л. С., Пустовитенко Б. Г., Новик Н. Н., Вольфман Ю. М., Дублянский В. Н.* Некоторые методические аспекты сейсмического районирования областей новейшего горообразования и сопредельных территорий (на примере Крыма) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. — Вып. 2-3. — Москва: Изд-во ОИФЗ РАН, 1995. — С. 27—45.
- Введенская А. В.* Исследования напряжений и разрывов в очагах землетрясений при помощи теории дислокаций. — Москва: Наука, 1969. — 136 с.
- Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я.* Деформационные режимы Крымского региона и их влияние на процессы тектонического разрывообразования // Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: Матер. наук. конф.-семінару. — Львів: СПОЛОМ, 2012. — С. 29—32.
- Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я., Пустовитенко А. А.* Кинематические обстановки тектонического разрывообразования и сейсмичности в Крымском регионе // Сейсмологічні та геофізичні дослідження в сейсмоактивних регіонах: Матер. наук. конф.-семінару. — Львів: СПОЛОМ, 2012. — С. 33—36.
- Гзовский М. В.* Основы тектонофизики. — Москва: Наука, 1975. — 536 с.
- Гинтов О. Б.* Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. — Киев: Феникс, 2005. — 572 с.
- Гинтов О. Б., Исай В. М.* Тектонофизические исследования разломов консолидированной коры. — Киев: Наук. думка, 1988. — 228 с.
- Гинтов О. Б., Пустовитенко Б. Г., Вольфман Ю. М.* Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона и некоторые геотектонические выводы // Матер. V Севастопол. междунар. сем. «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий» «СТИХИЯ—2002». — Севастополь: СИНЕКО, 2002. — С. 71—76.
- Гущенко О. И.* Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии // Поля напряжений и деформаций в литосфере. — Москва: Наука, 1979. — С. 26—51.
- Гущенко О. И., Мострюков А. О., Петров В. А.* Структура поля современного регионального напряжения сейсмоактивных зон земной коры восточной части Средиземноморского активного пояса // Докл. АН СССР. — 1991. — **312**, № 4. — С. 830—835.
- Зоненшайн Л. П., Савостин Л. А.* Введение в геодинамику. — Москва: Недра, 1979. — 311 с.
- История океана Тетис* / Отв. ред. А. С. Монин, Л. П. Зоненштайн. — Москва: Изд. Ин-та океанологии АН СССР, 1987. — С. 104—115.
- Казьмин В. Г., Лобковский Л. И., Пустовитенко Б. Г.* Современная кинематика микроплит в Черноморско-Южно-Каспийском регионе // Океанология. — 2004. — **44**, № 4. — С. 600—610.
- Новик Н. Н., Вольфман Ю. М.* Эволюция планетарных полей напряжений в пределах сейсмоактивных регионов Украины, новейшие разрывы и разрывные смещения // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. — Симферополь, 1997. — С. 81—90.
- Полякова Т. П.* Сейсмичность центральной части Средиземноморского пояса. — Москва: Наука, 1985. — 160 с.
- Пустовитенко А. А.* Каталог механизмов (Крым) // Землетрясения Северной Евразии в 1996 году. — Москва: Наука, 2002. — С. 354.
- Пустовитенко Б. Г.* Механизм очагов ощутимых землетрясений Крымско-Черноморского региона на последних 20 лет // Сейсмологический бюллетень Украины за 2000 год. — Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2002. — С. 59—64.
- Пустовитенко Б. Г.* Тектонические напряжения в земной коре Крымского региона по данным об очагах слабых землетрясений // Геофиз. сб. АН УССР. — 1977. — Вып. 78. — С. 15—23.
- Реконструкция кинематических обстановок новейшего разрывообразования и сейсмичности Крымско-Черноморского региона с целью оценки параметров местной сейсмичности и уточнения сейсмической опасности: Отчет о НИР / Ю. М. Вольфман, Б. Г. Пустовитенко, А. А. Пустовитенко, Е. Я. Колесникова, А. М. Останин.* — Киев: Фонды Ин-та геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, 2011. — 95 с.
- Стоянов С. С.* Механизм формирования разрывных зон. — Москва: Недра, 1977. — 144 с.
- Хаин В. Е.* Тектоника континентов и океанов (год 2000). — Москва: Научный мир, 2001. — 606 с.
- Шерман С. И., Борняков С. А., Бугго В. Ю.* Области динамического влияния разломов (результаты моделирования). — Новосибирск: Наука, 1983. — 112 с.
- Шерман С. И., Гинтов О. Б., Борняков С. А., Исай В. М., Кобылянский В. Б.* Характер разломообразования в консолидированной коре и моделирование зон скальвания // Геофиз. журн. — 1988. — **10**, № 1. — С. 13—21.