

На правах рукописи



Вольфман Юрий Михайлович

**ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССОВ АЛЬПИЙСКОГО
ТЕКТОНИЧЕСКОГО РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ И
СЕЙСМОГЕНЕЗА КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА**

Специальность 25.00.03 – Геотектоника и геодинамика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора геолого-минералогических наук

Симферополь – 2021

Работа выполнена в Институте сейсмологии и геодинамики (структурное подразделение) Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского»

Официальные оппоненты: **Трифонов Владимир Георгиевич,**
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геологический институт Российской академии наук, главный научный сотрудник лаборатории неотектоники и современной геодинамики;

Макеев Владимир Михалович,
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук, главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией эндогенной геодинамики и неотектоники;

Семинский Константин Жанович,
доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт земной коры Сибирского отделения Российской академии наук, заместитель директора по научной работе.

Ведущая организация: **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики Российской академии наук.**

Защита диссертации состоится **22 апреля 2021 г. в 14:00 часов** на заседании диссертационного совета Д.002.001.01, созданном на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук, по адресу 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИФЗ РАН и на сайте института www.ifz.ru. Автореферат размещен на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при министерстве образования и науки Российской Федерации www.vak.minobrnauki.gov.ru и на сайте ИФЗ РАН.

Отзывы на автореферат, заверенные печатью, в двух экземплярах, просьба направлять по адресу: 123242, Москва, Большая Грузинская ул., д. 10, стр.1, ИФЗ РАН, ученому секретарю диссертационного совета Владимиру Анатольевичу Камзолкину.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат геолого-минералогических наук



В.А. Камзолкин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время взгляды исследователей на роль разрывных нарушений разных структурно-кинематических типов в строении и развитии Крымско-Черноморского региона существенно различаются. Это находит воплощение в прогностических моделях различного целевого назначения, что переводит теоретическую дискуссию в практическую плоскость, влияя как на выбор стратегии, так и на результаты прогнозных исследований. Трактовки строения Крыма с альтернативных позиций обусловили необходимость детального анализа факторов, определяющих его структурные особенности. Таковыми являются деформационные режимы и кинематические обстановки альпийского разрывообразования и сейсмогенеза, которые нашли отражение как в виде прямых признаков смещений горных массивов – в зеркалах скольжения на стенках разрывов (в Горном Крыму), так и в фокальных механизмах очагов землетрясений всего Крымско-Черноморского региона. Поскольку региональная выборка сейсмологических данных статистически малопредставительна, в основу сеймотектонического анализа были заложены закономерности проявления полей напряжений, установленные в близлежащих сейсмоактивных районах Средиземноморского пояса.

Степень разработанности проблемы. Тектонофизические исследования в Крыму охватывают более чем полувековой период. Они проводились с целью решения фундаментальных и прикладных задач, включая параметризацию и структурно-кинематическую идентификацию разрывных тектонических нарушений, реконструкцию обусловивших их формирование кинематических обстановок и полей напряжений, оценку влияния разрывов на катастрофическое развитие геосистем разных уровней и т.п. За это время были получены представительные данные, позволяющие выполнять реконструкции полей напряжений как с применением метода структурных парагенезисов, так и на основе кинематического анализа структур разрушения. Весомый вклад в решение этих задач внесли Л.С. Борисенко, О.Б. Гинтов, А.В. Муровская, Н.Н. Новик, В.В. Гончар, Л.М. Расцветаев, А. Сайнто, Ж. Анжелъе и многие другие, что нашло отражение в научных публикациях. Были исследованы тектонофизические аспекты динамики Крыма в мезо-кайнозой, выполнен сравнительный анализ тектонических движений в пределах Крыма и Карпат, описана роль инденторного механизма в геодинамике региона. Результаты этих исследований учитывались в процессе выполнения диссертационной работы.

Цели исследований.

1. Идентификация деформационных режимов и кинематических обстановок альпийского разрывообразования в пределах Горного Крыма с применением методов тектонофизического анализа данных о прямых признаках смещений горных массивов – зеркалах скольжения на стенках тектонических разрывов.

2. Реконструкция обстановок сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона по результатам решений фокальных механизмов очагов землетрясений; исследование сейсмогенерирующих полей напряжений и их трансформаций.

3. Сопоставительный анализ кинематических обстановок альпийского тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма и обстановок сейсмогенеза в пределах Крымско-Черноморского региона и других, детально изученных сейсмоопасных сегментов Средиземноморского пояса.

Задачи исследований. Для реализации первой из целей выполнялись:

1. Выделение структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений

(СКП) – совокупностей зеркал скольжения, элементы залегания и векторы смещений которых удовлетворяют одному полю напряжений; идентификация деформационных режимов и кинематических обстановок, обусловивших формирование разрывных структур и их парагенезисов.

2. Унификация значений основных параметров СКП, сформированных в условиях сходных деформационных режимов и кинематических обстановок; построение стереографических моделей, аппроксимирующих идентичные проявления регионального разрывообразования.

3. Анализ количественных соотношений тектонических разрывов разных структурно-кинематических типов и их парагенезисов; определение роли тех или иных типов разрывов в структуре Горного Крыма.

4. Исследование особенностей проявления структурообразующих полей напряжений и анализ распределения ориентировок осей главных напряжений в моделях тектогенеза разных типов.

5. Изучение геодинамических факторов, обусловивших инверсионный характер кинематических обстановок и основные особенности проявления альпийского разрывообразования в регионе.

Для обоснования корректности применяемых подходов и достоверности полученных выводов был расширен круг задач. Их целью являлось исследование особенностей современного разрывообразования в масштабе реального времени на основе данных по механизмам очагов землетрясений в пределах различающихся строением и геодинамической позицией регионов, для которых имеются представительные выборки по фокальным механизмам (Загрос, Вранча, Черноморско-Кавказский регион). Эти задачи включали: а) дифференциацию очагов по типам режимов и кинематических обстановок с построением стереографических моделей сейсмогенеза; б) структурно-кинематическую параметризацию сейсмогенных зон, аппроксимируемых этими моделями; в) анализ разноориентированных полей напряжений, обусловивших многообразие проявлений сейсмогенеза. В итоге предполагалось выполнить реконструкцию сейсмогенерирующих полей напряжений в Крымско-Черноморском регионе и исследовать особенности их трансформаций на основе закономерностей процессов тектосейсмогенеза, установленных как в Горном Крыму, так и в пределах сейсмоактивных сегментов Средиземноморского пояса.

Научная новизна работы:

1. Выводы об особенностях альпийского разрывообразования в Горном Крыму впервые основаны на результатах изучения прямых признаков смещений горных массивов – зеркал скольжения, количественные соотношения разных типов которых отражают роль соответствующих разрывов в структуре региона.

2. Поскольку тектонофизические реконструкции условий разрывообразования в горном массиве и решение механизма очага землетрясения характеризуют явление мгновенного хрупкого разрушения среды, были разработаны унифицированные – на единых принципах – способы построения стереографических моделей структурно-кинематических парагенезисов тектонических разрывов и стереографических моделей сейсмогенеза. Эти модели легли в основу анализа условий альпийского разрывообразования в Горном Крыму, а в пределах сейсмоактивных регионов обусловили возможность пространственной параметризации зон, аппроксимируемых моделями соответствующих типов.

3. Установлены закономерности, общие как для альпийского тектонического (в Горном Крыму), так и для современного (сейсмогенного, в пределах сейсмоактивных

регионов) разрывообразования – избирательность ориентировок полей напряжений, инверсионный характер кинематических обстановок и др., – которые проявляются повсеместно, несмотря на разнообразие геодинамических факторов, обусловивших тектоническую (и сейсмическую) активность исследуемых геоструктур.

4. Обосновано, что разрывные деформации, которые образуются в условиях периодически меняющихся полей напряжений, как правило, отражают не суммированное влияние разных геодинамических факторов, а кратковременное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными.

5. Впервые выполнен детальный тектонофизический анализ полей напряжений, обусловивших многообразие проявлений сейсмогенеза в Крымско-Черноморском регионе, и установлены закономерности трансформаций структурообразующих полей напряжений в условиях разных кинематических обстановок.

6. Выполнены идентификация и параметризация разрывных структур в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты; инверсионный (по типу продольного сжатия-растяжения) характер обстановок их формирования обоснован результатами историко-структурного анализа платформенных отложений Крыма и Северного Причерноморья, которые согласуются с палеогеодинамическими реконструкциями Средиземноморского пояса.

7. Выявлены закономерности активизации тектонических разрывов и их парагенезисов в пределах разных по уровню тектонической активности регионов; исследовано влияние новейших полей напряжений на процессы катастрофического развития природных и техно-природных геосистем.

Научно-практическая значимость работы заключается в получении новых знаний из области фундаментальной науки и в их применении при исследованиях, направленных на обеспечение безопасности возводимых и проектируемых объектов. Установленные закономерности проявлений тектосейсмогенеза могут составить основу прогностических моделей различного целевого назначения, учитывающих доминирующее влияние горизонтальных напряжений, многообразие режимов и обстановок разрывообразования, а также роль разрывов разных структурно-кинематических типов в строении региона. Некоторые теоретические положения диссертации имеют надрегиональный характер. Это предопределило возможность их применения при создании линеаментно-доменно-фокальных моделей Крымского и Карпатского регионов, положенных в основу карт общего сейсмического районирования, которые являются составной частью государственных нормативных документов как в Украине, так и в Российской Федерации. Разработанные автором методические приемы и способы структурно-кинематического анализа тектонических разрывов нашли применение при изысканиях по уточнению геолого-структурных условий территорий размещения особо важных и потенциально опасных объектов, при сейсмическом микрорайонировании городских агломераций. В комплексе с другими методами значимые результаты были получены при изучении причин возникновения локальных природных и техно-природных катастроф. Заключение по этим объектам получили высокую оценку экспертов – ученых, проектировщиков и специалистов в области сейсмостойкого строительства.

Методология и методы исследований. Обработка результатов полевых наблюдений осуществлялась с применением тектонофизических методов, отнесенных к категории методов структурного анализа, задачей которых является графическое определение ориентации осей главных напряжений. По своему алгоритму они близки анализу напряжений на основе совмещения разных подходов, так как содержат

элементы методов «квазиглавных» напряжений, тектонодинамического анализа, структурных парагенезисов и других. В процессе исследований апробированы и применены авторские методические разработки, позволившие расширить спектр решаемых задач (способ построения стереографических моделей структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений, способ построения стереографических моделей сейсмогенеза, метод выявления и параметризации разломных зон по стратоизогипсам куэстовых отложений, способ параметризации разломных зон в сложнодислоцированных слоистых отложениях и другие). В некоторых случаях осуществлялось комплексирование вышеперечисленных способов и методов.

Основные защищаемые положения:

1. Структурную основу Горного Крыма составляют разноранговые системы преимущественно сдвиговых и сбросовых разрывных нарушений диагональных и (в меньшей мере) ортогональных ориентировок, возникающие в условиях периодически проявляющихся обстановок продольного сжатия и растяжения; субширотно и диагонально ориентированные взбросо-надвиговые разрывы играют второстепенную роль, возникая, главным образом, в зонах динамического влияния нарушений сдвигового типа.

2. Установленные особенности проявления деформационных режимов альпийского тектогенеза в обстановках разнонаправленного сжатия и/или растяжения обуславливают формирование соответствующих парагенезисов субвертикальных сколовых разрывов, предопределяя избирательный характер ориентировок структурных элементов этих парагенезисов и возможность их структурно-кинематической идентификации даже при отсутствии зеркал скольжения, указывающих направление перемещения крыльев разрыва.

3. Основные закономерности проявления сейсмогенерирующих полей напряжений в пределах Крымско-Черноморского региона согласуются с таковыми для других сегментов Средиземноморского пояса, но многообразие обстановок сейсмогенеза, идентифицированных в очагах Южно-Крымской зоны, указывает на гетерогенный характер и сложное строение этой зоны, не позволяя отнести ее к какому-либо одному типу сейсмогенеза; при этом сколько-нибудь значимые признаки поддвига (квазисубдукции) или субдукции Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров в очагах землетрясений Южно-Крымской сейсмогенной зоны отсутствуют.

4. Изученные геосистемы центрального сегмента Средиземноморского пояса периодически подвергаются сжатию (реже – растяжению) в разных, закономерно ориентированных по отношению к оси вращения Земли, направлениях: субмеридиональном, субширотном и обоих диагональных; образующиеся при этом разрывы, как правило, отражают не суммированное влияние различных геодинамических факторов в виде некоего результирующего поля напряжений, а кратковременное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными, обуславливая дискретный характер проявления процессов сейсмогенеза в виде активизации разноориентированных зон с разными структурно-кинематическими параметрами.

5. На новейших стадиях тектогенеза под воздействием меняющихся кинематических обстановок возможны активизация и объединение в единые зоны тех фрагментов разновозрастных разломно-трещинных систем, параметры которых удовлетворяют ориентации новообразованных полей напряжений; это способствует

формированию фильтрационных окон в водоупорных горизонтах, перераспределению подземного стока и концентрации грунтовых потоков, создавая предпосылки для избыточного обводнения территорий и развития суффозионно-карстовых провалов, обвально-оползневых смещений и т.п., нередко являясь причиной катастрофического развития геосистем.

Степень достоверности и апробация результатов обеспечены статистически представительным фактическим материалом, единообразным подходом к его интерпретации и комплексированием методов исследований. Материалы диссертации доложены на: Международных конференциях «Проблемы региональной тектоники Северного Кавказа и прилегающих территорий» (Геленджик, 1996, 1997), научной конференции «Геодинамика Крымско-Черноморского региона» (Симферополь, 1997); научно-технической конференции «Проблемы техноприродных аварий и катастроф в связи с развитием опасных геологических процессов» (Киев, 1997); Международном научно-практическом семинаре «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий» (Киев, 1999); IV, VI Международных научно-практических конференциях «Строительство в сейсмических районах Украины» (Ялта, 1999, 2004); IV, V Международных семинарах «Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий» (Севастополь, 2001, 2002); V, IX Международных научных конференциях «Мониторинг опасных геологических процессов и экологического состояния среды» (Киев, 2004, 2009); Международной научной конференции «Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму)» (Ялта, 2007); научных конференциях «Новые геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды» (Львов, 2007, 2008); II Международной научно-практической конференции «Горная геология, геомеханика и маркшейдерия» (Донецк, 2009); Международной конференции «Геодинамика и сейсмическая опасность, сейсмостойкость сооружений» (Алушта, 2011); XVII Международной конференции «Проблемы сеймотектоники» (Москва, 2011); научной конференции-семинаре «Сейсмологические и геофизические исследования в сейсмоактивных регионах» (Львов, 2012); X Международной конференции «Крым-2012» (Ялта, 2012); V Международной научной конференции «Геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды» (Львов, 2013); XIX научно-практической конференции с международным участием «Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы» (Москва, 2014); XX Всероссийской конференции с международным участием «Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов» (Воронеж, 2016); IV тектонофизической конференции в ИФЗ РАН «Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле» (Москва, 2016.); XXI Научно-практической Шукинской конференции с международным участием «Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России» (Москва, 2018); VIII, IX и X Всероссийских конференциях «Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа» (Ессентуки, 2018, 2019; Грозный 2020).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 89 работ, включая разделы в 5-ти коллективных монографиях. Их них 16 статей опубликовано в изданиях, рекомендованных ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация объемом 371 страница состоит из

введения, шести глав, заключения и списка литературы из 522 наименований. Она содержит 152 рисунка и 9 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В **первой главе** работы рассмотрены тектонофизические методы, которые направлены на изучение пространственно-генетической связи деформационных структур с полями напряжений. Ю.Л. Ребецким эти методы разделены на две группы – структурного и квазипластического анализа. В задачу первых входит определение ориентировок главных осей тензора напряжений; методы квазипластического анализа помимо ориентации главных осей или приращений сеймотектонических деформаций предполагают расчет коэффициента Лоде-Надаи, определяющего вид этих тензоров.

Тектонофизические методы структурного анализа, основы которых были заложены в трудах Ж.Ф.Беккера, Е.М.Андерсона и М.В.Гзовского, получили дальнейшее развитие в работах О.Б.Гинтова, А.В.Лукьянова, А.Е.Михайлова, П.Н.Николаева, В.Д.Парфенова, Л.М.Расцветаева, К.Ж.Семинского, С.С.Стойнова, Л.А.Сим, С.И.Шермана, С.С.Шульца и многих других. В них положение сколового разрыва связывается с плоскостью касательных напряжений. К этой категории относятся методы: сопряженных сколов (М.В.Гзовский), статистического изучения трещин (П.Н.Николаев), тройственного парагенезиса трещин (К.Ж.Семинский), структурных парагенезисов (А.В.Лукьянов, С.С.Стойнов), реконструкции тензора напряжений в очагах землетрясений (Л.М.Балакина, А.В.Введенская), квазиглавных напряжений (В.Д.Парфенов), структурно-геоморфологический (С.С.Шульц, Л.А.Сим, Н.П.Костенко) и их разновидности. Некоторые приемы этих методов использованы автором диссертационной работы.

Методы квазипластического анализа нацелены на определение параметров напряженного состояния массива не только по ориентировкам сколов, но и по направлениям смещений, определяемых по зеркалам скольжения. Эта категория включает как численные методы реконструкции тензора напряжений на основе нахождения экстремума «функции однородности», так и графические приемы построения векторов в сферической системе координат с выделением областей «допустимых решений» ориентации главных осей с учетом ряда кинематических ограничений. В методах дислокационного анализа в основу реконструкции напряжений заложена теория дислокационной пластичности С.Б.Батдорфа, Б.Будянского о совпадении смещения на разрыве с направлением касательных напряжений. Во второй категории (методы О.И.Гущенко, Ж.Анжелье и др.) в теорию Батдорфа-Будянского привнесены положения О.И.Гущенко (например, о том, что преобразование упругих деформаций в необратимые осуществляется как за счет сдвигов по вновь образующимся поверхностям, так и за счет смещений по существующим разрывам, и др.). К группе квазипластического анализа отнесены методы: кинематический (О.И.Гущенко), right dihedral (Ж.Анжелье), расчета скорости сеймотектонических деформаций (Ю.В.Ризниченко, J.Brune), расчета тензора среднего механизма (С.Л.Юнга), расчета сеймотектонических деформаций в кумулятивной области (А.В.Ландер), парагенетического анализа дизъюнктивных структур (Л.М.Расцветаев), катакластического анализа разрывных смещений (Ю.Л.Ребецкий) и др., использующие как геологические, так и сейсмологические данные.

Применяемые в данной диссертации способы реконструкции и анализа условий

разрывообразования включают элементы некоторых из вышеперечисленных методов – кинематического, квазиглавных напряжений, тектонодинамического анализа и других. При обработке полевых данных использован принцип совместного анализа особенностей распределения (в изолиниях плотностей) на стереограмме как значений замеренных параметров зеркал скольжения (полюсов разрывов, векторов смещений), так и ориентировок «квазиглавных» осей напряжений, определяемых по методу В.Д. Парфенова. По сходству значений всех параметров, образующих на стереограмме обособленные скопления, выполнялось выделение структурно-кинематических парагенезисов разрывов и смещений (СКП), отвечающих тем или иным условиям разрывообразования (рис. 1).

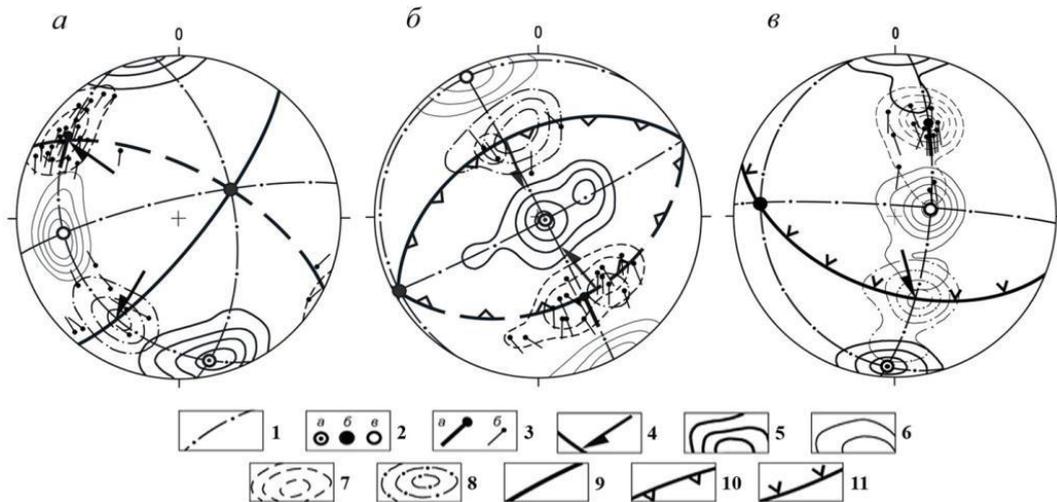


Рисунок 1. Примеры структурно-кинематических парагенезисов (СКП) разрывов и смещений сдвигового (а), сбросового (б) и взбросового (в) типов.

1 – плоскости размещения осей главных напряжений; 2 – оси главных напряжений (а – σ_1 , б – σ_2 , в – σ_3); 3 – полюса разрывов и направления смещения всякого крыла (а – по парагенезису, б – по отдельным зеркалам); 4 – усредненный вектор смещения; 5-8 – изолинии плотностей: «квазиглавных» осей σ_1 (5) и σ_3 (6), полюсов (7) и векторов смещений (8); 9-11 – проекции плоскостей разрывов (9 – сдвигов, 10 – сбросов, 11 – взбросов).

Обработка данных производилась вручную с привлечением программы «Stereo Nett»; направление смещения по разрыву определялось по правилу Гофера. Построения выполнялись на сетке В.Шмидта (по зеркалам скольжения – на верхней полусфере, по фокальным механизмам – на нижней). Тип деформационного режима устанавливался по классификации О.И.Гущенко, основанной на соотношении углов наклона γ^1 , γ^2 и γ^3 осей главных напряжений (соответственно, σ_1 , σ_2 и σ_3) к горизонту. Отметим, что в работе **сжатие принято положительным при $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$** . Все эти положения реализованы в виде способа построения стереографических моделей СКП разрывов и смещений по данным замеров параметров зеркал скольжения. Аналогичен описанному алгоритм выделения парагенезисов однотипных очагов и способ построения стереографических моделей сейсмогенеза по совокупности значений основных параметров (осей главных напряжений P , N , T и полюсов нодальных плоскостей) фокальных механизмов очагов землетрясений (рис. 2).

Основная идея *способа построения стереографических моделей СКП разрывов и смещений*: если нарушенный разрывами массив подвергается воздействию внешнего по отношению к нему поля напряжений, то деформации в массиве

реализуются через смещения по тем из существующих или вновь образованных разрывов, параметры которых удовлетворяют данному полю. Эти смещения, как правило, вторичны, так как происходят не синхронно с разрывообразованием, а в течение последующих фаз тектогенеза, о чем свидетельствуют зеркала скольжения по минеральным заполнителям на стенках трещин и случаи наличия зеркал двух и более генераций на одной поверхности.

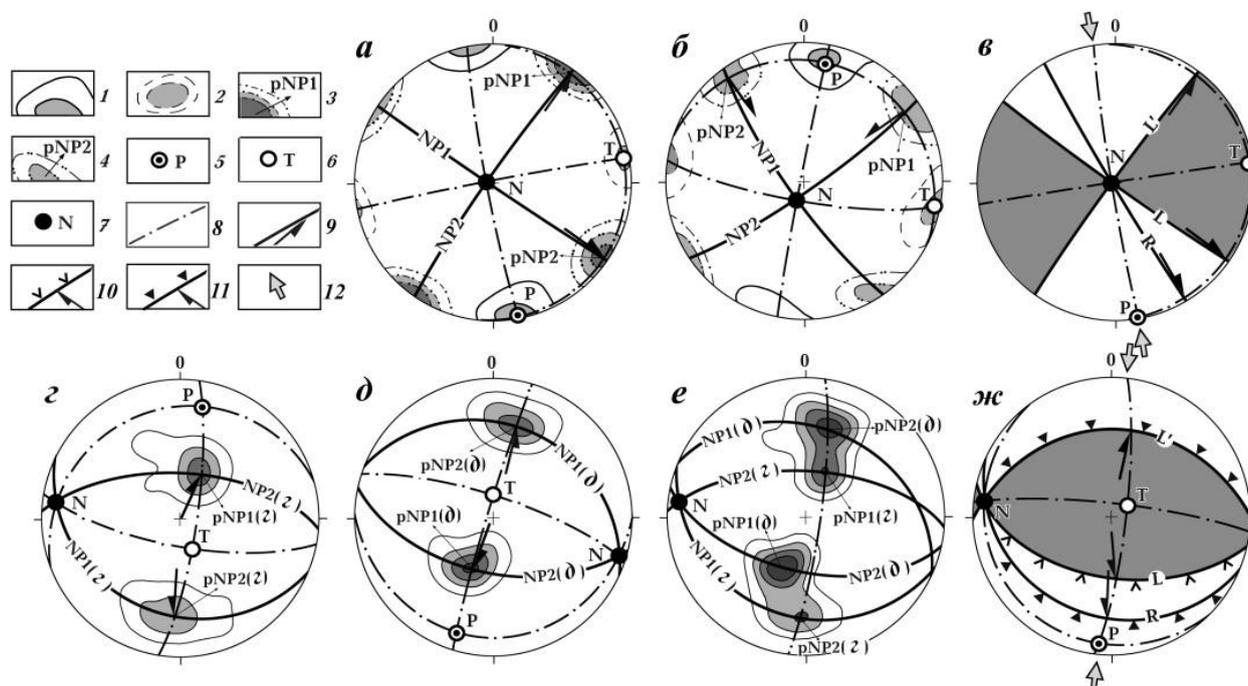


Рисунок 2. Парагенезисы и модели сейсмогенеза для обстановок меридионального сжатия (система Загрос): **а-в** – парagenезисы (**а, б**) и модель (**в**) сдвигового типа; **г-жс** – парagenезисы (**г-е**) и модель (**жс**) взбросового типа.

1-4 – плотности проекций осей сжатия (**1**) и растяжения (**2**), полюсов $NP1$ (**3**) и $NP2$ (**4**); **5-7** – оси напряжений (**5** – сжатия, **6** – растяжения, **7** – промежуточная); **8** – плоскости размещения главных осей; **9-11** – типы разрывов: сдвиги (**9**), взбросы (**10**), надвиги (**11**), стрелки – перемещения лежащего крыла; **12** – направление сжатия.

Параметры каждой из стереографических моделей СКП разрывов и смещений, аппроксимирующей данные по однородной совокупности зеркал скольжения, определяются по максимумам плотностей «квазиглавных» осей, полюсов разрывов и векторов смещений с соблюдением перпендикулярности осей полученного тензора напряжений (рис. 1). В итоге модель отражает элементы залегания и структурно-кинематический тип нарушения (нарушений), а также положение осей главных напряжений, характеризующее тип деформационного режима и кинематическую обстановку формирования данного парagenезиса. Способ позволяет анализировать условия разрывообразования в отдельных пунктах наблюдений и на всей территории путем построения региональных (сводных) моделей тектогенеза, оценивать роль разных систем разрывов в структуре региона, отследить особенности трансформаций полей напряжений. Алгоритм исследований (анализ количественных соотношений разрывов разных типов → идентификация СКП и сопоставление их параметров → реконструкция кинематических обстановок разрывообразования → построение сводных моделей деформационных режимов тектогенеза) отражает возрастание роли интерполяционной составляющей, поскольку в основу первого уровня положен только фактический материал, а завершающий этап характеризуется наиболее

высокой степенью обобщения данных.

Способ построения стереографических моделей сейсмогенеза также базируется на дифференциации очагов землетрясений и их совокупностей по типам деформационных режимов и кинематических обстановок. Поскольку в решении механизма очага нодальные плоскости взаимноперпендикулярны и совпадают с плоскостями действия главных касательных напряжений, решение априори предполагает, что разрывы в очаге представлены разрывами типа L - и L' -сколов. При этом не учитывается возможность формирования разрывов иных типов, в частности, по типу R - и R' -сколов, ориентированных под углом к направлению действия главных касательных напряжений, отклоняясь к оси максимального сжатия. Предложенный способ учитывает это обстоятельство, что достигается объединением в одну модель тех парагенезисов, которые могут удовлетворять единому полю напряжений при условии формирования разрыва не только в плоскости главных касательных напряжений, а и отклоняясь от нее на величину угла внутреннего трения (рис. 2). Полученные результаты рассматриваются в качестве стереографической модели соответствующего типа сейсмогенеза, а в случае закономерного пространственного расположения однотипных очагов – в качестве стереографической модели сейсмогенных зон.

Вторая глава содержит результаты изучения деформационных режимов и кинематических обстановок альпийского разрывообразования в Горном Крыму на основе анализа параметров зеркал скольжения, замеренных в процессе полевых исследований. Многообразие ранее установленных в Крыму типов тектонических деформаций позволило разным авторам предложить альтернативные модели его строения, в которых основная роль отводится нарушениям, отвечающим парадигме, которой придерживается тот или иной исследователь. Глава предваряется обзором этих моделей, отражающих, по В.В.Юдину, три основные концепции: фиксистскую (К.К.Фохт, А.А.Борисяк, Л.С.Борисенко, Г.А.Лычагин, А.С.Моисеев, М.В.Муратов и др.), структурно-мобилистскую (Ю.В.Казанцев, И.В.Попадюк, В.С.Милеев и др.) и сбалансированную геодинамическую (В.В.Юдин, М.Е.Герасимов). Согласно первой из них, Горный Крым – это сводовое поднятие, расчленённое крупными сдвиговыми разломами на блоки, смещённые относительно друг друга; в эту концепцию вписываются и надвиговые структуры. В структурно-мобилистской модели Крым состоит из разделенных надвигами пластин с перемещением мезозойских аллохтонов как в северном, так и в южном направлениях. Основу сбалансированной модели составляют палеомикроконтиненты и террейны, сочленяющиеся вдоль системы сутур, а в строении региона доминируют надвиги, ретронадвиги и полого падающие зоны меланжа. В этой парадигме современная структура региона формировалась в течение конвергентной стадии последнего цикла Вильсона в результате сближения Евразийской и Африканской плит.

Приведенная классификация содержит смешение понятий «напряжения» и «разрывные деформации». Вследствие этого крутопадающие разломы трактуются исключительно как результат действия вертикальных напряжений и движений земной коры, а отражением тангенциальных напряжений являются только пологопадающие структуры – надвиги, шарьяжи и т.п. При этом не учитывается, что в условиях горизонтального сжатия и растяжения формируются также субвертикальные разрывы сдвигового и сбросового типов. Так как доминирующее влияние тангенциальных систем напряжений в Крыму не подвергается сомнению (равно как и положения новой тектоники плит), объектом дискуссий в настоящее время является характер

преобладающих типов деформаций, обусловленных этими полями. На примере объектов, где установлены нормальные контакты разновозрастных толщ со специфическим набором приконтактных деформаций, показано, что некоторые из надвиговых зон не получили подтверждения и/или оказались разрывами иных структурно-кинематических типов.

Общие особенности регионального разрывообразования обоснованы как количественными соотношениями тектонических разрывов разных типов, так и ориентировками разрывов, векторов смещений и осей σ_1 и σ_3 . В целом по Горному Крыму в состав СКП, обусловленных сдвиговыми режимами, входит более 54% зеркал скольжения, а с учетом сбросо- и взбросо-сдвиговых режимов – 66%. СКП сбросового типа объединяют более 17%, взбросового – около 12%, взбросо-сбросового – 4% зеркал. Фактологическая наполняемость СКП разных типов (табл.) отражает роль соответствующих разрывов и деформационных режимов в процессе регионального разрывообразования.

Таблица. Фактологическое наполнение стереографических моделей

	Тип деформационного режима						Всего
	Сдв	Взб-Сдв	Сбр-Сдв	Сбр	Взб	Взб-Сбр	
<i>Птн</i>	56	22	12	34	22	9	155
<i>Pg</i>	136	24	14	68	46	16	304
<i>Zerk</i>	1276	213	67	409	280	102	2347

Примечания: количество пунктов наблюдений (*Птн*), структурно-кинематических парагенезисов (*Pg*) и зеркал скольжения в их составе (*Zerk*), образованных в условиях сдвигового (Сдв), взбросо-сдвигового (Взб-Сдв), сбросо-сдвигового (Сбр-Сдв), сбросового (Сбр), взбросового (Взб) и взбросо-сбросового (Взб-Сбр) режимов. В категории «Взб-Сбр» речь идет не о типе смещения, какового в природе не существует, а о типе деформационного режима: при углах наклона оси сжатия $30-45^\circ$ зеркала являются взбросами, а при таких же углах наклона оси растяжения – сбросами, характеризуя обстановки, соответственно, сжатия и растяжения.

Общий характер распределения параметров зеркал скольжения показывает, что большая часть смещений в Горном Крыму происходила по субвертикальным разрывам при горизонтальном положении плоскости σ_1 - σ_3 . В этих условиях формируются сдвиги, сбросо- и взбросо-сдвиги. При этом доминируют диагональные структуры, которым соответствуют максимумы 1 и 2 полюсов разрывов и векторов (рис. 3 *а, б*). Максимумы «квазиглавных» осей σ_1 и σ_3 (рис. 3 *в, г*) отражают влияние инверсионных обстановок сжатия-растяжения. Наклон полюсов разрывов (пунктир на рис. 3 *а*) согласуется с падением северного крыла мегантиклинория Горного Крыма, указывая на возникновение значительной части зеркал скольжения в период, соответствующий началу последнего этапа горообразования (поздний миоцен), когда залегание пород было близким к горизонтальному.

Особенности распределения значений основных параметров зеркал скольжения позволили аппроксимировать многообразие режимов и кинематических обстановок в регионе несколькими стереографическими моделями. Их основу составили сводные (для однотипных зеркал скольжения и их СКП), аналогичные приведенным на рис. 3, стереограммы полюсов разрывов, векторов смещений и «квазиглавных» осей σ_1 и σ_3 . Всего получено 24 модели разрывообразования, в том числе по типам режимов: по четыре – сдвиговых и взбросо-сдвиговых, две – сбросо-сдвиговых, по шесть –

сбросовых и взбросовых, две – взбросо-сбросовых. Каждая из моделей содержит данные о параметрах генерализованных разрывов и векторов смещений, секторы наиболее вероятного разрывообразования и реконструированное положение осей главных напряжений (примеры – на рис. 4, 6).

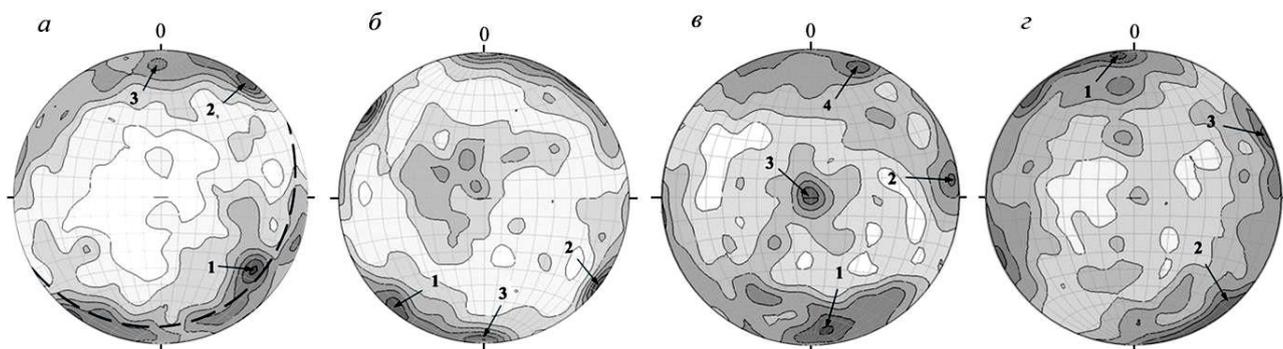


Рисунок 3. Сводные для Горного Крыма стереограммы полюсов разрывов (*а*), проекций векторов смещений (*б*) и «квазиглавных» осей напряжений σ_1 (*в*) и σ_3 (*г*).
Изолинии через 0,5%; пунктир – общий наклон полюсов разрывов.

Сдвиговые режимы в процессе альпийского тектогенеза играли основную роль. Их стереографические модели отражают воздействие горизонтальных напряжений меридионального, широтного (рис. 4 *а, б*) и обоих диагональных направлений (рис. 4 *в, г*). При этом и по масштабам распространения, и в количественном отношении преобладают диагонально ориентированные сдвиги, которые доминируют также во многих пунктах наблюдений и уверенно идентифицируются.

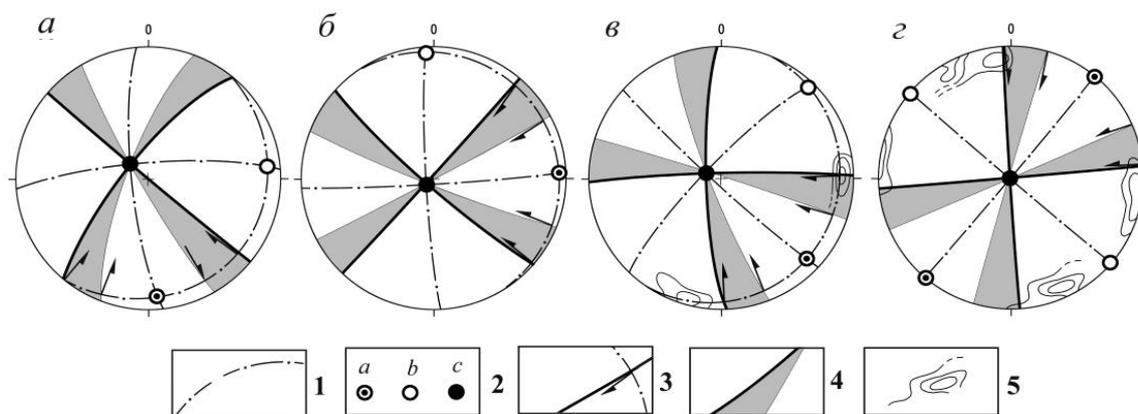


Рисунок 4. Стереографические модели **сдвиговых** деформационных режимов.
1-2 – плоскости размещения (1) и проекции осей (2) напряжений (*а* – σ_1 , *б* – σ_3 , *в* – σ_2);
3 – векторы смещений; 4 – сектора наиболее вероятного разрывообразования;
5 – некоторые соответствующие им максимумы в изолиниях полюсов разрывов.

Вторая по значимости система сдвиговых нарушений имеет ортогональную ориентировку; соответственно, простирание ее разрывов совпадает с направлениями осей сжатия и растяжения в полях напряжений первой (диагональной) системы. СКП ортогональных сдвиговых разрывов также легко идентифицируются, зачастую в количественном отношении не уступая диагональным. Модели обеих систем образуют пары, которые характеризуются взаимной переориентировкой осей σ_1 и σ_3 , отражающей инверсионный характер кинематических обстановок (рис. 4 *а-б, в-г*).

Сдвиговые зеркала распространены повсеместно в пределах Горного Крыма; многие из них имеют «свежий» облик и четко выраженные порожки отрыва, что позволяет отнести их возникновение к альпийскому или даже к новейшему времени.

Особенностью моделей *взбросо- и сбросо-сдвиговых деформационных режимов* является соответствие ориентировок их главных осей (σ_1 – в обстановках сжатия, σ_3 – растяжения) сдвиговым моделям, позволяя полагать, что формирование разрывных деформаций этих типов обусловлено локальными трансформациями сдвиговых систем напряжений. Субвертикальные взбросо- и сбросо-сдвиги имеют повсеместное распространение и вполне уверенно идентифицируются.

Формирующиеся в условиях сдвиговых, взбросо- и сбросо-сдвиговых режимов зоны диагональных разломов разных рангов (Салгино-Октябрьская, Бельбекская, Качинская, Демерджинская, Молбайская и др., а в акватории – Южнобережная, Одесско-Синопская), составляют основу структурного рисунка Крымского региона (рис. 5). Многие из них имеют четкое геоморфологическое выражение, что отражено на многих неотектонических картах. Поэтому сдвиговые и близкие к ним по типу системы нарушений, «утерянные» в покровно-надвиговых моделях, следует считать неотъемлемым элементом тектонических и геодинамических построений.

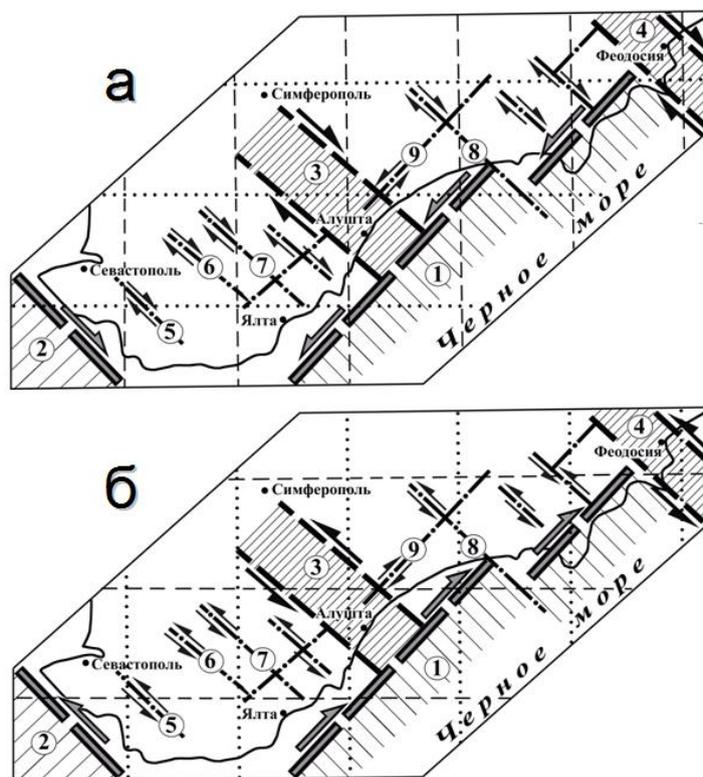


Рисунок 5. Схематические реконструкции полей напряжений для кинематических обстановок меридионального сжатия (а) и широтного сжатия или меридионального растяжения (б), обусловивших разнонаправленную активизацию зон сдвиговых разрывов. Пунктир – ориентировка осей σ_1 , точечные линии – ориентировка осей σ_3 ; стрелки – направления перемещений вдоль разрывов. Цифры в кружках – названия зон разломов разных рангов: 1-2 – краевые части зон динамического влияния Южно-Крымского или Южнобережного (1) и Одесско-Синопского (2) глубинных разломов; 3-4 – Салгино-Октябрьская (3) и Феодосийско-Бакальская (4) зоны региональных разломов; 5-9 – зоны локальных разломов – Чернореченского (5), Бельбекского (6), Качинского (7), Молбайского (8), Демерджинского (9).

Кинематические характеристики зон сдвиговых разломов не являются постоянными, изменяясь во времени в соответствии с переориентировкой осей главных напряжений. Поэтому в качестве моделей напряженно-деформированного состояния земной коры логичнее использовать реконструкции полей напряжений для определенных кинематических обстановок с идентификацией зон тектонических разрывов, соответствующих этим обстановкам. На рис. 5 приведены схематические примеры реконструкций для основных обстановок формирования сдвиговых и близких к ним (взбросо- и сбросо-сдвиговых) систем разрывов – меридионального сжатия и меридионального растяжения (или широтного сжатия). В первом случае дополнительно формируются субширотно ориентированные взбросы и надвиги, во втором – нарушения сбросовых типов.

Сбросовые режимы повсеместно установлены в Горном Крыму, уступая по количеству их проявлений лишь сдвиговым. Поскольку следы части сбросов на известняковых обрывах Крымских гор были уничтожены процессами выветривания, влияние сбросовых и сдвиговых режимов можно оценивать как равнозначное. Максимумы в распределении осей растяжения, характеризующие обстановки сбросовых режимов, сосредоточены по внешнему краю стереограммы или вдоль слабонаклонных дуг в секторах, ориентированных закономерно относительно сторон света. Это отражено в моделях сбросовых режимов, аппроксимирующих обстановки меридионального, субширотного и диагонального (в обоих направлениях) растяжения (примеры – на рис. 6).

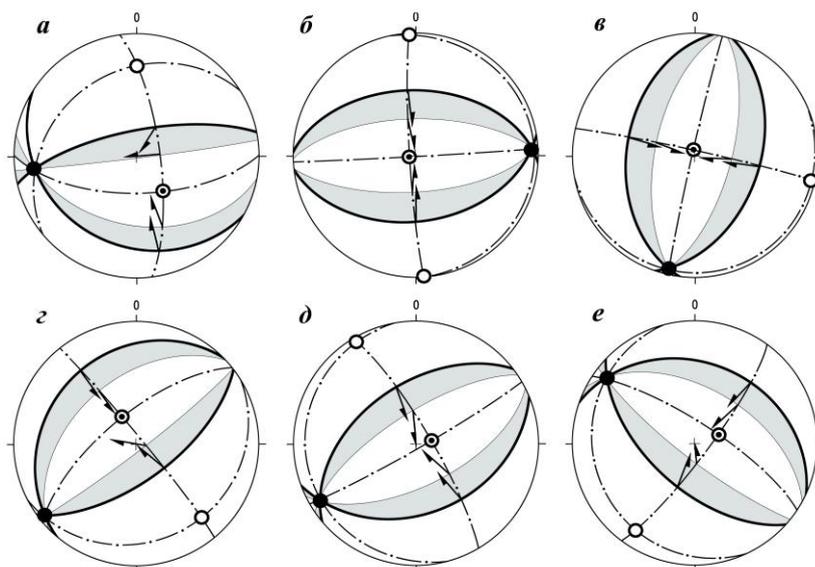


Рисунок 6. Стереографические модели **сбросовых** деформационных режимов для обстановок субмеридионального (**а**, **б**), субширотного (**в**), ЮВ-СЗ (**г**, **д**) и ЮЗ-СВ (**е**) растяжения. Условные обозначения см. на рис. 4.

При этом мы не сочли корректным усреднять параметры моделей с осями σ_3 , расположенными на одной линии под разными углами в противоположных секторах стереограмм (например, **а** и **б** на рис. 6), поскольку каждой из моделей соответствуют обособленные группы реально установленных сбросовых структур.

Сбросовые разрывы представлены тремя основными системами. Первая из них с падением в южных румбах параллельна континентальному склону Черноморской впадины, предопределяя морфоструктурные особенности южных обрывов Крымских гор. Вторая группа сбросов с падением в северных направлениях имеет меньшее, но

также повсеместное распространение, являясь структурными аналогами сбросов южного борта Северо-Крымского прогиба. Третья система сбросов обусловила формирование депрессионных структур – межгорных (Байдарской, Варнаутской) и предгорной (Салгирской) впадин Горного Крыма. Вопреки мнению о том, что эти депрессии являются эрозионно-тектоническими «окнами» (результатом локального размыва верхнеюрских пород, надвинутых на нижнемеловые), наличие сбросовых структур в бортовых частях меловых впадин и в непосредственной близости от них (при почти повсеместном отсутствии надвиговых перемещений), указывает на ведущую роль сбросовой тектоники в формировании депрессий Горного Крыма.

В условиях *взбросовых деформационных режимов* формировался широкий спектр разрывов (взбросов, сдвиго-взбросов, надвигов). При этом собственно надвиги составляют около 4% от общего количества зеркал скольжения, хотя в отдельных пунктах наблюдений они являются доминирующими.

Обстановки проявления взбросовых режимов определены по ориентации осей сжатия, образующих три пары максимумов, что послужило основой для построения шести (3-х пар) моделей, которые отражают обстановки субмеридионального и диагонального сжатия (рис. 7). Соответственно, большая часть взбросо-надвиговых структур имеет субширотные, в меньшем количестве – СЗ и СВ ориентировки.

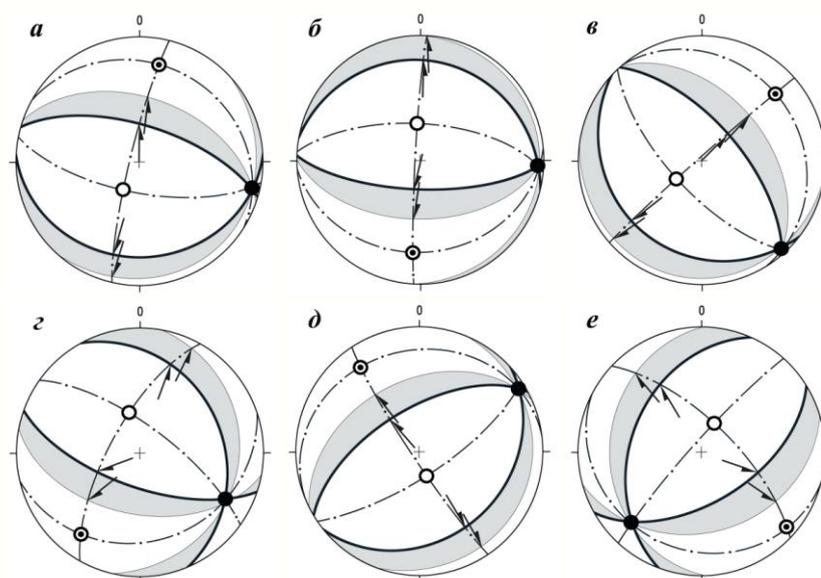


Рисунок 7. *Стереографические модели взбросовых деформационных режимов для обстановок субмеридионального (а, б), ЮЗ-СВ (в, г) и ЮВ-СЗ (д, е) сжатия.*

Условные обозначения см. на рис. 4.

Хотя зеркала скольжения собственно надвигового типа малочисленны, надвиги (Карадагский, Балаклавский и др.) не являются элементами, «чужеродными» для Крыма, занимая в нем определенную структурную нишу. Их наличие устанавливается как прямыми наблюдениями на стенках крупных разрывов, так и по совокупности разрозненных надвиговых зеркал с близкими параметрами в условиях отсутствия видимой поверхности основного нарушения (например, Западно-Сухореченский надвиг), поскольку при значительных надвиговых перемещениях признаки их фиксируются в широком диапазоне разреза. Ограниченное развитие надвиговых структур в Крыму свидетельствует о меньшей (по сравнению с некоторыми покровно-складчатými системами, например, Карпатами) тектонической

напряженности в течение альпийского этапа. Интенсивно надвигообразование в Горном Крыму проявилось в киммерийскую эпоху на границе ранней и средней юры, когда произошло деформирование флишевых комплексов таврической серии (T_2-J_1). При этом в работах (В.Т.Фролов, Н.С.Фролова, А.В.Спиридонов и др.) показано, что опрокинутое залегание отложений таврической серии обусловлено не только процессами надвигообразования, но и смятием осадков в результате подводных обвалов (слампинга) на стадиях, предшествующих диагенезу.

Взбросо-сбросовые деформационные режимы характеризуют не тип смещения «взбросо-сброс», а специфические условия разрывообразования (см. примечание к табл.). Значения параметров зеркал скольжения в составе *СКП*, обусловленных этими режимами, образуют две взаимозаменяемые (по положению на стереограмме) пары максимумов осей сжатия и растяжения. Это позволило обосновать две модели – меридионального сжатия и растяжения, которые являются полными антиподами друг друга, отражая инверсию трансформированных полей напряжений с точностью до первых градусов.

Слабопроявленные деформационные режимы – октаэдрический и одноосного растяжения и сжатия – реализовались в виде единичных зеркал и их *СКП*, что не позволило обосновать статистически представительные модели. Ограниченное распространение указанных *СКП* означает, что обусловившие их режимы проявлялись локально, и с ними не связаны образование или активизация скользко-нибудь крупных разломных зон.

В процессе анализа полученных стереографических моделей обоснованы: 1) избирательность ориентировок полей тектонических напряжений; 2) инверсионный характер проявления кинематических обстановок; 3) наличие трансформаций систем напряжений и, соответственно, деформационных режимов; 4) роль тектонических разрывов разных структурно-кинематических типов в структуре региона. Эти аспекты подобно рассмотрены в данном разделе диссертации.

Так, установлено, что однотипные режимы характеризуются широким спектром ориентировок осей главных напряжений, отражая меняющиеся условия напряженного состояния среды – сжатие или растяжение в разных направлениях. В то же время в моделях режимов разных типов проявляется сходство ориентировок осей сжатия и растяжения, которые сосредоточены в пределах диаметрально противоположных секторов стереограммы, имеющих субмеридиональное, субширотное и диагональные направления (рис. 8). Избирательность ориентировок осей сжатия и растяжения по отношению к сторонам света отмечена и в процессах сейсмогенеза (см. гл. 3, 4), позволяя полагать, что эта особенность структурообразующих полей напряжений обусловлена общепланетарными причинами, наиболее вероятными из которых являются лунно-солнечные приливные деформации в тектоносфере и/или изменения ротационного режима Земли. Также отметим, что в сдвиговых моделях ориентировки осей ортогональных напряжений совпадают с направлениями разрывов в моделях диагонального сжатия, и наоборот (рис. 4), указывая на взаимообусловленность этих систем напряжений, одна из которых (вероятно, ортогональная, как наиболее проявленная) трансформируется во вторую (диагональную) в процессе релаксации напряжений.

Изменения кинематических обстановок и режимов разрывообразования обусловили формирование разрывов разных структурно-кинематических типов, роль которых в строении региона обосновывается количественными соотношениями этих нарушений и их *СКП*. Согласно этим соотношениям, структурную основу Горного

Крыма составляют (в порядке значимости): а) субвертикальные сдвиги, сбросо- и взбросо-сдвиги диагональных направлений, сформированные в обстановках субмеридионального сжатия или растяжения; б) сбросовые и сдвиго-сбросовые нарушения, образовавшиеся в условиях субгоризонтального меридионального или диагонального растяжения; в) сдвиговые, сбросо- и взбросо-сдвиговые разрывы меридионального или широтного простираний, обусловленные диагонально ориентированными системами напряжений; г) картину дополняют взбросы, сдвиго-взбросы и надвиги, образовавшиеся в условиях субгоризонтального меридионального или диагонального сжатия.

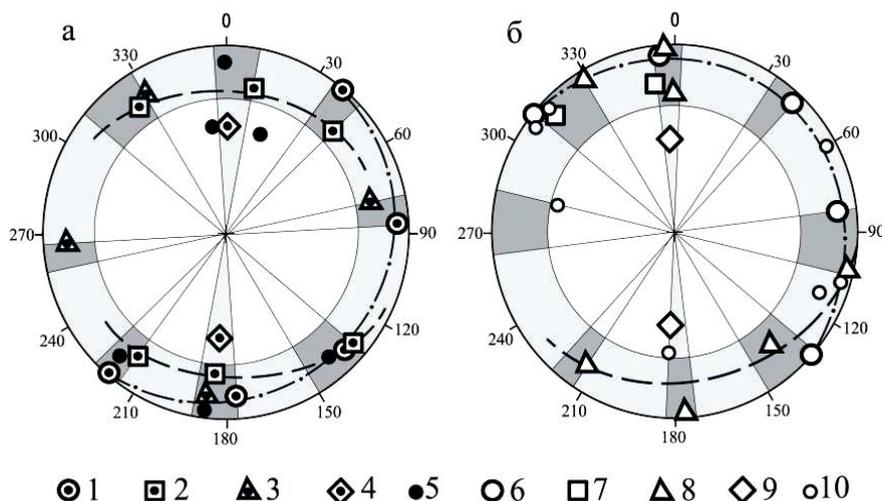


Рисунок 8. Распределение осей σ_1 в моделях деформационных режимов сжатия (а) и осей σ_3 – в моделях режимов растяжения (б).

1-5 – проекции осей σ_1 сдвиговых (1), взбросовых (2), взбросо-сдвиговых (3), взбросо-сбросовых (4) и одноосного сжатия (5) режимов; 6-10 – проекции осей σ_3 сдвиговых (6), сбросо-сдвиговых (7), сбросовых (8), взбросо-сбросовых (9) и одноосного растяжения (10) режимов.

На основе указанных закономерностей обоснованы критерии идентификации структурных парагенезисов новейших тектонических разрывов (при наличии их массовых замеров), не несущих следов смещений. Сравнительный анализ трещиноватости в породах неогена и палеогена (соответственно, 514 и 2018 замеров, по 100-200 в каждом пункте наблюдений) показал высокую сходимость ориентировок образуемых этими совокупностями максимумов. Это свидетельствует либо о том, что трещины формировались в сходных обстановках, либо о позднемиоцен-плиоценовом времени возникновения трещинных структур, в том числе, локализованных в отложениях палеогена. Сопоставление данных с моделями деформационных режимов позволило выделить структурные парагенезисы субвертикальных сколовых разрывов (L -, L' -, R - и R' -сколы и/или их комбинации), сформированных в обстановках ортогонального (меридионального, широтного) и диагонального (обоих направлений) сжатия или растяжения. Это предопределило возможность применения разных тектонофизических методов (кинематического и структурных парагенезисов) при геолого-структурном изучении территорий размещения проектируемых и возводимых объектов (см. главу б).

Вариативный характер кинематических обстановок и деформационных режимов тектогенеза обусловил необходимость апробации применяемых методов на

сейсмологических данных путем анализа обстановок современного (сейсмогенного) разрывообразования, отслеживаемых в масштабе реального времени (главы 3, 4).

В третьей главе по данным решений механизмов очагов землетрясений исследованы поля напряжений в нескольких сейсмоопасных регионах (Загрос, Вранча, Черноморско-Кавказский), различающихся строением и особенностями геодинамического развития (рис. 9). Фактологической основой послужили фокальные механизмы из каталогов, размещенных на сайтах Гарвардского университета, ФИЦ «Единая геофизическая служба РАН», Средиземноморского сейсмологического центра, Виртуальной лаборатории по тектонофизическому анализу современных и палеонапряжений. Также были использованы данные, опубликованные А.В.Друмя, Н.Я.Степаненко, И.П.Габсатаровой, Е.А.Бабковой, А.А. и Б.Г.Пустовитенко и др. авторами. Анализируемые выборки содержат: по Загросу – 122 очага, по Вранча – 93, по Черноморско-Кавказскому региону – более 250 очагов с $M \geq 3.5$.

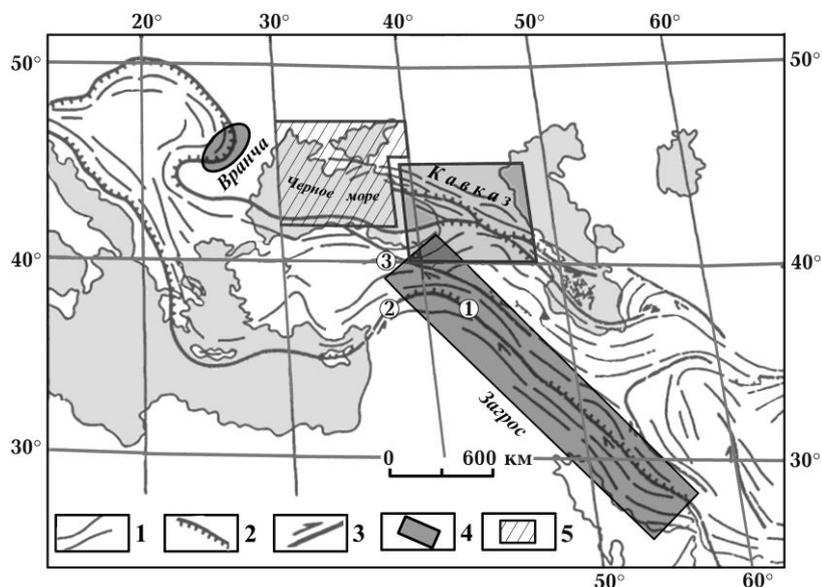


Рисунок 9. Положение исследуемых объектов в системе Средиземноморского пояса (структурная основа по [Баженов, Буртман, 1990.] с упрощениями).

1 – простираение складок; 2 – надвиги, фронт шарьяжей; 3 – сдвиги; 4 – исследуемые объекты; 5 – Крымско-Черноморский регион. Цифры в кружках – зоны региональных разломов: 1 – Загроса, 2 – Анатолийского, 3 – Северо-Анатолийского.

Система Загрос является структурным отражением процессов конвергенции Аравийской плиты и Евразии. Ее двойственная геодинамическая природа – взбросо-надвиговая (палеосубдукционная) и правосдвиговая, а также сложная структура обусловили разнообразие механизмов очагов, локализованных на глубинах 20–40 км. Большинство фокальных механизмов отражает 4 типа сейсмогенеза: два сдвиговых, сформированных в условиях меридионального (1-й тип) и ЮЗ-СВ (4-й тип) сжатия, и два взбросовых – также меридионального (2-й тип) и ЮЗ-СВ (3-й тип) сжатия (примеры на рис. 2). Остальные очаги характеризуют слабо проявленные обстановки или локальные трансформации основных систем напряжений, не позволяя обосновать статистически представительные модели соответствующих им типов сейсмогенеза.

Очаги 1-го типа локализованы вдоль СВ фланга Аравийского Синтаксиса, образуя протяженную (~ 2000 км) правосдвиговую зону СЗ простираения с разрывами аналогичной ориентировки (на рис. 10 а модель сейсмогенеза и направления разрывов показаны красным). В области сочленения Загроса с системой Анатолийских

разломов возможна реализация разрывов как общезагросского, так и СВ простирания, соответствующего направлению зоны Анатолийского разлома. Каталог содержит наибольшее количество (шесть) катастрофических землетрясений этого типа с $M \geq 6.0$, вызвавших разрушения и повлекших человеческие жертвы.

Взбросовые землетрясения 2-го типа образуют несколько зон субширотной ориентировки, косопоперечных по отношению к сдвиговой зоне Загроса (на рис. 10 а модель сейсмогенеза и разрывы показаны синим). Сейсмогенные разрывы в их очагах отнесены к разряду компенсационных, возникающих в зоне динамического влияния основной (сдвиговой) структуры, когда возможности релаксации напряжений путем пластических деформаций и перемещений вдоль сдвигов уже исчерпаны. Тем не менее, четыре землетрясения этого типа с $M > 6.0$ имели катастрофический характер.

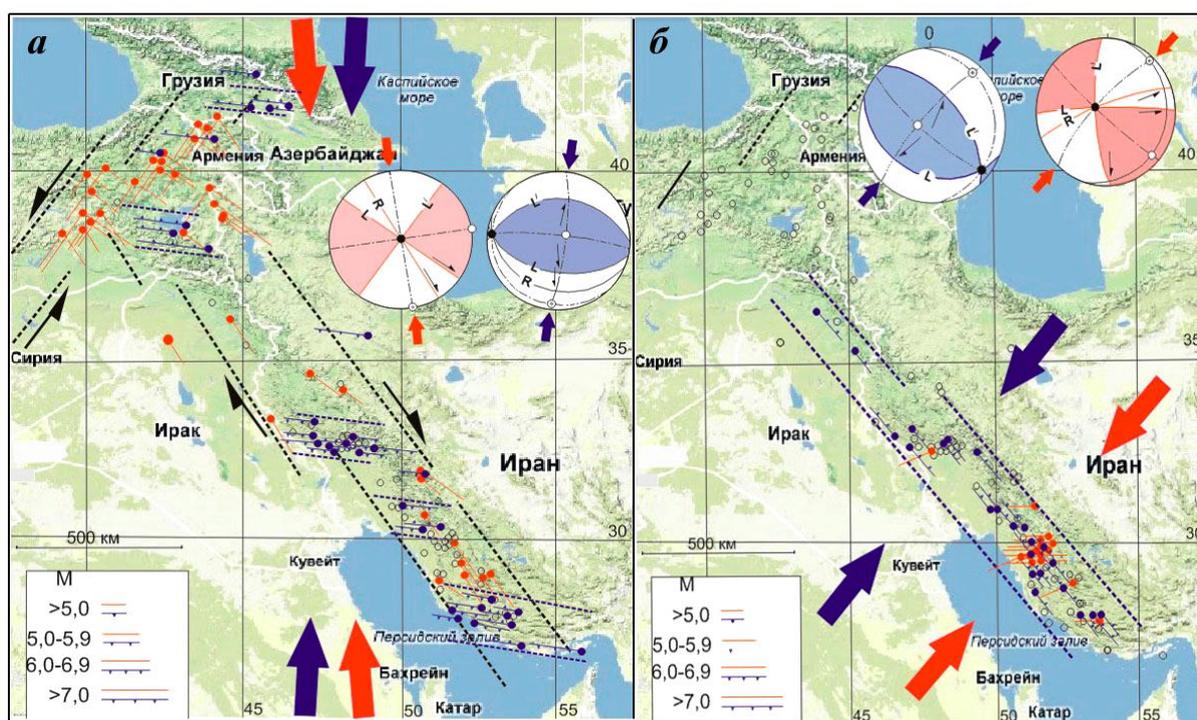


Рисунок 10. Сейсмогенные зоны Загроса, сформировавшиеся в обстановках субмеридионального (а) и ЮЗ-СВ (б) сжатия, и их стереографические модели. На врезках: магнитуда землетрясения и структурно-кинематическая идентификация разрывов в очаге (красные – сдвиги, синие – взбросы и надвиги); жирные стрелки – направления регионального сжатия.

Взбросовые очаги 3-го типа локализованы на южном фланге и в центре системы Загрос, образуя зону СЗ простирания, совмещенную с областью развития правосдвиговых деформаций (на рис. 10 б модель сейсмогенеза и разрывы показаны синим). Более вероятной является реализация в очагах разрывов СВ падения, которые согласуются с направлением палеосубдукции Аравийской плиты под Евразию. Только одно землетрясение этого типа имеет магнитуду $M=6.0$.

Очаги 4-го типа (на рис. 10 б модель и разрывы показаны красным) сосредоточены в узкой зоне широтного простирания на южном фланге системы Загрос. Разрывы этого направления реализуются по левому сдвигу, что отличает их от правосдвиговых деформаций в очагах субширотной Северо-Анатолийской зоны, обусловленных ЮВ-СЗ сжатием. Только одно событие этого типа имеет магнитуду

более 6.0 ($M=6.1$).

Слабопроявленные типы сейсмогенеза, очаги которых имеют ограниченное распространение, сформировались в обстановках, не поддающихся унификации ввиду незначительного количества данных. Тем не менее, близость значений параметров некоторых однотипных очагов позволила аппроксимировать условия ЮВ-СЗ сжатия моделями (хоть и статистически малообеспеченными) сейсмогенеза *5-го* и *6-го* типов, характеризуемых сдвиговым и взбросовым деформационными режимами.

Таким образом, большинство очагов Загроса сведено в 4 модели, отражающие основные периодически проявляющиеся обстановки регионального сейсмогенеза: а) меридионального сжатия, обусловленного движением Аравийской плиты на север; б) ЮЗ-СВ сжатия, вызванного процессами дивергенции в зоне Красноморского рифта, вследствие чего Аравия «напирает» на Евразию в СВ направлении. Соотношение количества очагов (58% и 29%), отвечающих этим обстановкам, свидетельствует о преобладающем влиянии первого из указанных факторов.

Область Вранча – эллипсовидное в плане, вытянутое в СВ направлении скопление землетрясений – расположена в зоне сочленения Восточных и Южных Карпат. Каталог, основанный на данных сейсмологов Молдовы (Н.Я.Степаненко, А.В.Друмя), включает 100 событий с $M \geq 3.5$. Анализируемые очаги локализованы в мантии, в основном, на глубинах 130-160 км. Большая их часть относится к взбросовым и формировалась в обстановках горизонтального сжатия, периодически действовавшего в меридиональном, диагональных и широтном направлениях. Зоны землетрясений, обусловленных тремя первыми обстановками, уверенно выделяются и в плане, и в разрезе (рис. 11). Геометризация скоплений очагов, возникших в условиях широтного сжатия, является проблематичным ввиду малого их количества. Иные режимы (в т.ч., сбросовый) проявились еще более ограниченно.

Глубинные неоднородности, к которым приурочены очаги Вранча, имеют не петрологическую природу в виде слэба океанической или континентальной плиты. Сейсмогенная область представляет собой сегмент тектоносферы, подверженный всестороннему сжатию, которое обусловлено взаимодействием литосферных плит, в том числе, вклиниванием микроплиты Тиссия-Дакия между Скифской и Мизийской плитами.

В условиях *меридионального сжатия* сформировано 26 взбросовых очагов, аппроксимируемых моделью, аналогичной *2-му типу* Загроса, и образующих зоны широтного простирания с разнонаправленным падением (на рис. 11 – стереограмма, зоны на схеме и разрез с индексом *а*). Они примыкают к крупной зоне СВ простирания, которая является наиболее опасной сейсмогенерирующей структурой Вранча (рис. 11, с индексом *в*). Очаги локализованы на глубинах 110-160 км; их магнитуды составляют $M=4-5$, поэтому макросейсмические эффекты от них в Крыму и в Причерноморье проявились относительно слабо (3-4 балла). Очаги этого типа отражают особенности геодинамического взаимодействия микроплиты Тиссия-Дакия с Мизийской плитой: коллизия происходит вдоль глубинных разломов субширотной ориентировки, которые устанавливаются по данным сейсмотомографии.

Модель сейсмогенеза *ЮЗ-СВ сжатия* (аналог модели *3-го типа* в Загросе) аппроксимирует параметры механизмов 19-ти очагов взбросового типа (рис. 11, с индексом *б*), сосредоточенных в центральной части Вранча в пределах зоны СЗ простирания с падением на юго-запад. Зона неоднородна по своему строению: очаги локализованы, в основном, в интервалах глубин 80-110 и 125-155 км. Сильные землетрясения (с $M=5.9$, $M=5.6$) приурочены к верхней ее части. Зона является

проявлением границы Тейссеера-Торнквиста: по данным сейсмотомографии, вдоль нее установлены скоростные градиенты в мантии, которые прослеживаются на глубину до 400 км с наклоном в ЮЗ направлении, что согласуется как с параметрами сейсмогенной зоны (соответствующей положению плоскости $NP1$ стереограммы на рис. 11 б), так и с особенностями строения сооружения Восточных Карпат.

Модель ЮВ-СЗ сжатия построена по данным 19-ти фокальных механизмов очагов, образующих две зоны СВ простирания с падением на северо-запад (рис. 11, с индексом в). Данная выборка (в отличие от Загроса, где аналогичный – б-й тип сейсмогенеза проявлен слабо) включает большую часть сильных землетрясений (22.10.1940 г., $M=6.2$; 04.03.1977 г., $M=7.2$; 30.08.1986 г., $M=6.3$; 30.05.1990 г., $M=6.7$), в том числе, самое катастрофическое из известных – 10.11.1940 г. с $M=7.4$. Изосейсты этих землетрясений вытянуты в СВ направлении, поэтому при общем сейсмическом районировании область Вранча выделена как единый сейсмолинеамент аналогичного простирания с $M_{max}=8.0$. Ранее в трудах В.Б.Соллогуба, А.В. Чекунова описано наличие

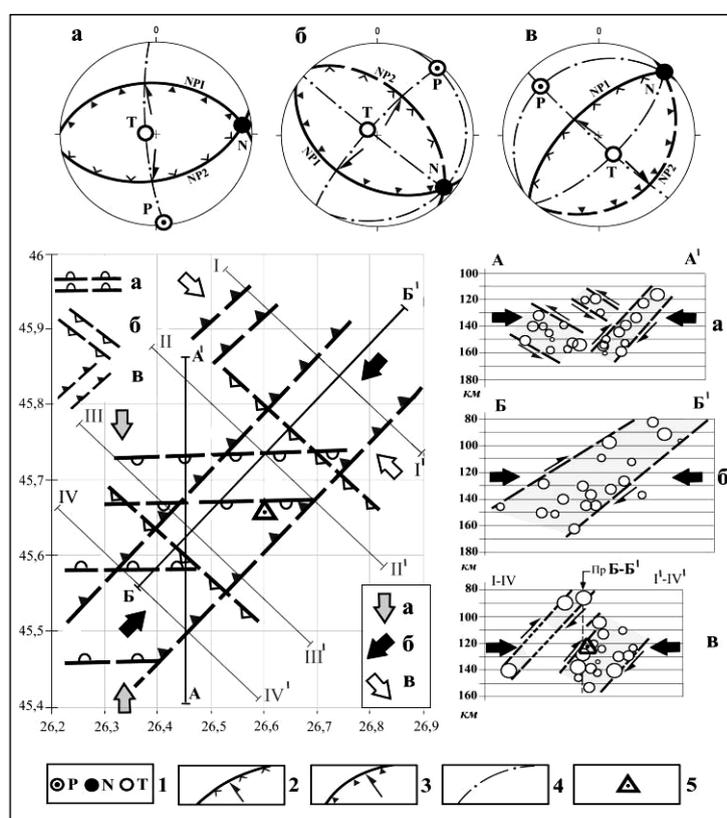


Рисунок 11. Модели сейсмогенеза области Вранча (вверху), сейсмогенные зоны на срезе 140 км (слева) и на разрезах (справа).

1 – оси главных напряжений; 2-3 – нодальные плоскости (2 – взбросы, 3 – надвиги) и векторы смещения лежащего крыла; 4 – плоскости размещения осей P-T; 5 – один из верификационных очагов; стрелки – направления сжатия.

соответствующей мантийной неоднородности, вдоль которой происходит погружение поверхности астеносферы. Ограничением этой неоднородности является мантийный разлом (трассируемый от о-ва Сицилия до Урала), с которым авторы связывали сейсмичность Вранча. Результаты глубинных исследований по профилю ВРАНЧА-2001 показали, что сейсмичность совпадает и с глубинным (вплоть до Мохо) разломом в палеозойском фундаменте, перекрытом Карпатским орогеном.

Черноморско-Кавказский регион – область, в пределах которой нашли отражение как коллизионные, так и дивергентные обстановки. Здесь установлены все типы деформационных режимов сейсмогенеза – от взбросового и сдвигового до октаэдрического, и различные кинематические обстановки, обусловленные ортогонально и диагонально ориентированными системами напряжений. Модели сейсмогенеза основных (субмеридионального и ЮЗ-СВ сжатия) обстановок базируются на репрезентативном материале (249 событий); они во многом идентичны моделям для Загроса и Вранча. Однако очаги взбросо-сбросового типа здесь играют более значимую роль, чем на других объектах. Полученные для каждой обстановки пары моделей взбросо-сбросового типа являются симметричными антиподами друг друга, отражая особенности трансформаций первичного поля напряжений и/или его инверсию с разворотом относительно промежуточной оси. Подобные трансформации и/или инверсии полей напряжений отмечалось и в очагах системы Загрос, а также (по зеркалам скольжения) в пределах Горного Крыма.

Анализ моделей сейсмогенеза всех исследуемых регионов показал, что одним из основных свойств полей напряжений является избирательный (относительно сторон света и дневной поверхности) характер распределения ориентировок осей сжатия и растяжения (рис. 12). Первое обосновывается концентрацией осей в пределах противоположных узких секторов стереограммы меридиональной, широтной и диагональных ориентировок. Поясное распределение выражается в субгоризонтальном положении осей сжатия и растяжения в моделях сдвигового, сбросового и взбросового типов, и в приуроченности этих осей к поясу $35-55^\circ$ в моделях, отражающих влияние трансформированных систем напряжений.

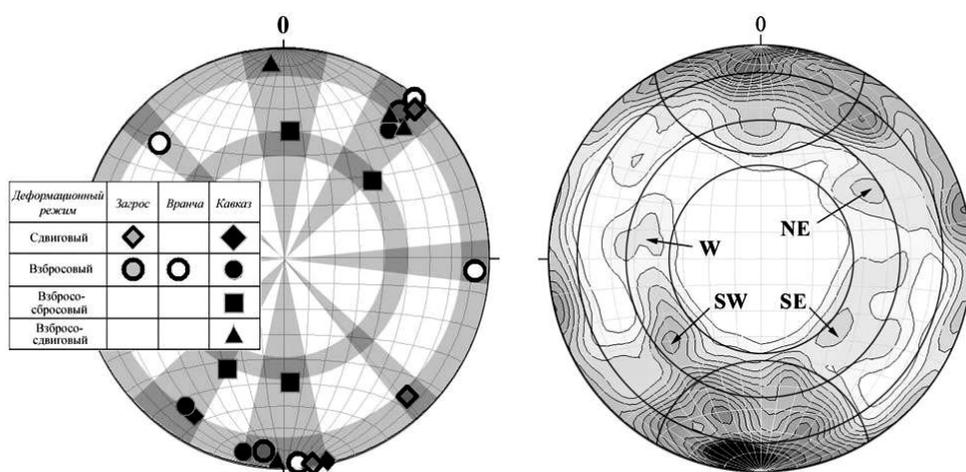


Рисунок 12. Ориентировки осей сжатия в моделях сейсмогенеза Средиземноморского пояса (слева) и распределение осей сжатия в очагах Черноморско-Кавказского региона для обстановок сжатия (справа); изолинии – через $0,25\%$.

Четвертая глава содержит результаты анализа полей напряжений в очагах Крымско-Черноморского региона, который включает Крым, акватории Черного и Азовского морей и сопредельные районы Таманского п-ова. Основные сейсмогенные зоны трассируются континентальным склоном Черноморской впадины, протягиваясь параллельно берегам Крыма и Кавказа; сейсмическими процессами охвачена также глубоководная часть Черного моря. Особенности распределения сейсмичности в регионе: а) зонально-линейный – в основном, диагональной ориентировки – характер локализации очагов землетрясений; б) общее погружение очагов Южно-Крымской

зоны в сечении, перпендикулярном берегу Крыма, с СЗ на ЮВ; в) обратная тенденция на фланге, примыкающем к Кавказскому побережью, где погружение очагов происходит с ЮЗ на СВ, под сооружения Большого Кавказа.

В обработке задействовано 35 фокальных механизмов (по Б.Г.Пустовитенко, А.А.Пустовитенко, И.П.Габсатаровой и др.), среди которых преобладают взбросовые (17) и взбросо-сдвиговые (6) очаги, сформированные в обстановках сжатия. Условиям растяжения отвечают 4 очага сбросового и 5 – взбросо-сбросового типов. Три фокальных механизма характеризуются сдвиговым деформационным режимом. Распределение очагов разных типов указывает, с одной стороны, на повсеместное разнообразие обстановок сейсмогенеза в регионе, и с другой – на отсутствие приуроченности очагов с однотипными механизмами к определенным геоструктурам. Это обусловлено, по-видимому, неравновесным состоянием изучаемой геосистемы и недостаточной представительностью фактических данных. Поэтому в основу анализа регионального сейсмогенеза были заложены закономерности проявления полей напряжений, установленные в других регионах (Загрос, Вранча, Кавказ), а сама методология построения моделей сейсмогенеза претерпела некоторые изменения, поскольку результаты этих построений, ввиду их недостаточной обеспеченности, обозначены нами как «субмодели» или «квазимодели» (примеры – на рис. 13).

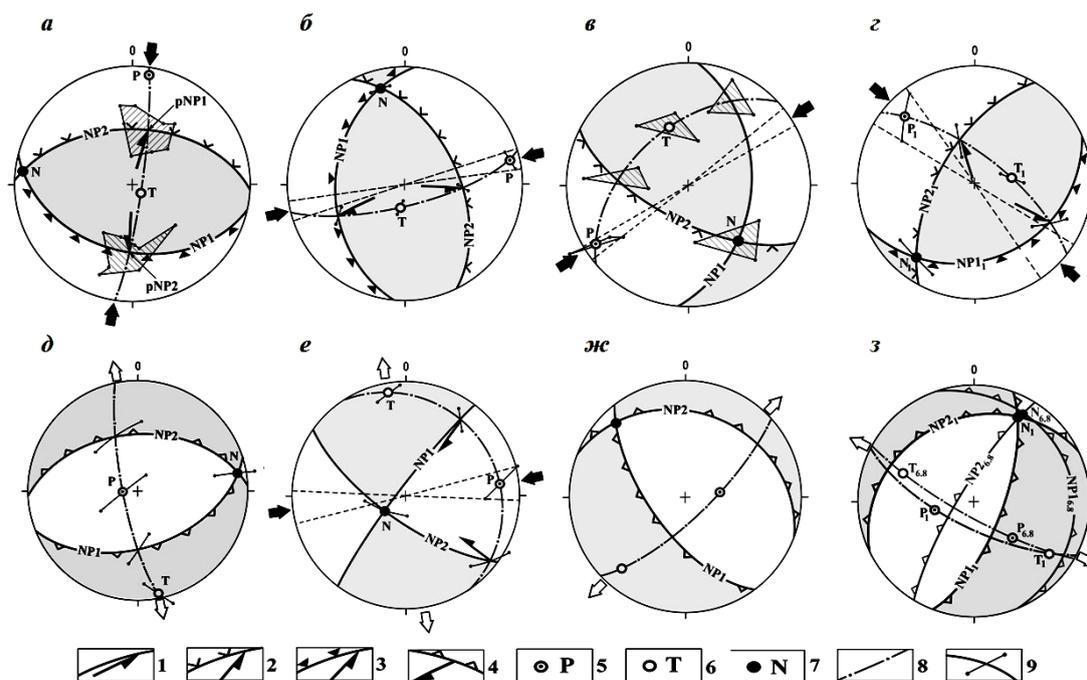


Рисунок 13. Квазимодели сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона для обстановок разнонаправленного сжатия (а-г) и растяжения (д-ж).

1-4 – нодальные плоскости: сдвиги, взбросо- и сбросо-сдвиги (1), взбросы, сдвиго-взбросы (2), надвиги (3), сбросы, сдвиго-сбросы (4) и направления перемещения лежащего крыла; 5-8 – оси напряжений (5 – сжатия, 6 – растяжения, 7 – промежуточная) и плоскости их размещения (8); 9 – разброс значений параметров. Стрелки по периметру и пунктирные сектора – направления сжатия (черные) и растяжения (белые).

В регионе доминируют очаги взбросового типа, сформированные в обстановке субмеридионального сжатия. Нодальные плоскости полученной квазимодели (рис. 13 а) идентифицированы как надвиг (азимут/угол падения – 194/40°) и взброс (3/50°), а поле напряжений характеризуется параметрами главных осей: $P=8/06^\circ$, $N=277/08^\circ$ и

$T=135/82^\circ$. Построенные аналогичным образом остальные квазимодели сейсмогенеза отражают многообразие кинематических обстановок и деформационных режимов в регионе (примеры – рис. 13). Особенности распределения значений их основных параметров позволили обосновать определенные их соотношения в качестве индикаторов инверсий кинематических обстановок (когда оси P и T меняются местами) и/или трансформаций поля напряжений (когда меняются местами плоскости максимальных касательных и нормальных напряжений или отмечается отклонение фокального механизма очага от параметров соответствующих квазимodelей).

Установлено, что в процессе регионального сейсмогенеза, как и в пределах Загроса, Вранча и Кавказа, проявился избирательный характер полей напряжений, который выражается в закономерном распределении ориентировок осей сжатия и растяжения в квазимodelях разных типов. Обосновано разделение деформационных режимов и соответствующих им систем напряжений и на первичные (сдвиговые, взбросовые и сбросовые), в которых две оси ориентированы горизонтально, и трансформированные, выраженные их комбинаторными сочетаниями – сбросо-, взбросо-сдвиговые и взбросо-сбросовые. Это разделение отражено и в соотношении энергетических характеристик очагов, возникших в одинаковых кинематических обстановках, но в условиях разных режимов: предельные значения магнитуд землетрясений сдвиговых, взбросовых и сбросовых типов существенно выше, чем для событий иных типов (рис. 14, слева).

Отмечая близкое к горизонтальному положение осей P и T в первичных полях напряжений, установлено, что при диагональном сжатии и растяжении углы наклона этих осей все же больше, чем в ортогонально ориентированных системах (рис. 14, справа), что также просматривается в моделях тектосейсмогенеза Горного Крыма и Средиземноморского пояса. Это позволяет отнести поля напряжений ортогонального сжатия/растяжения к системам более высокого иерархического уровня по сравнению с таковыми диагональной ориентировки, так как последние несут следы некоторых трансформаций, выраженных большими отклонениями осей главных напряжений от горизонтального положения.

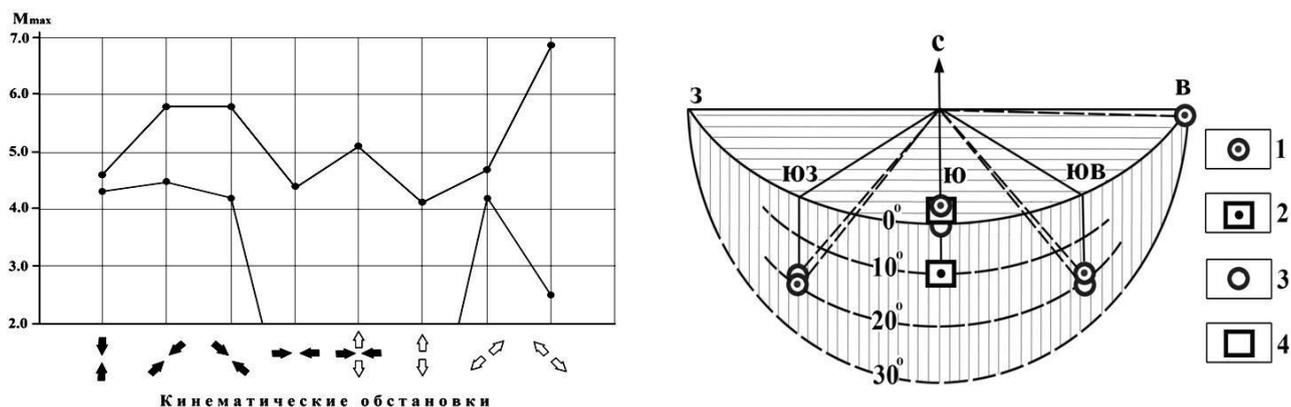


Рисунок. 14. Слева – предельные магнитуды очагов, обусловленных основными (верхняя кривая) и трансформированными (нижняя кривая) полями в условиях разных кинематических обстановок; справа – углы наклона осей главных напряжений: P – в квазимodelях взбросового (1) и сдвигового (2) режимов; T – в квазимodelях сбросового (3) и сдвигового (4) режимов.

Инверсионный характер полей напряжений проявляется в чередовании обстановок сжатия и растяжения, попеременно действующих в одном и том же направлении (когда оси P и T меняются местами и/или обстановки сжатия сменяются

растяжением и наоборот). При этом в условиях и взбросовых, и сбросовых режимов наиболее предпочтительными для возникновения разрывов являются одни и те же сегменты разреза, соответствующие направлению максимальных касательных напряжений. Развивающиеся вдоль них сейсмогенные деформации в обстановках сжатия формируются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 15). В эту же картину вписываются и результаты трансформаций первичных полей в случаях, когда направления действия нормальных и касательных напряжений меняются местами, свидетельствуя о развороте тензора напряжений на $\sim 45^\circ$ относительно промежуточной оси (рис. 15, б, ж).

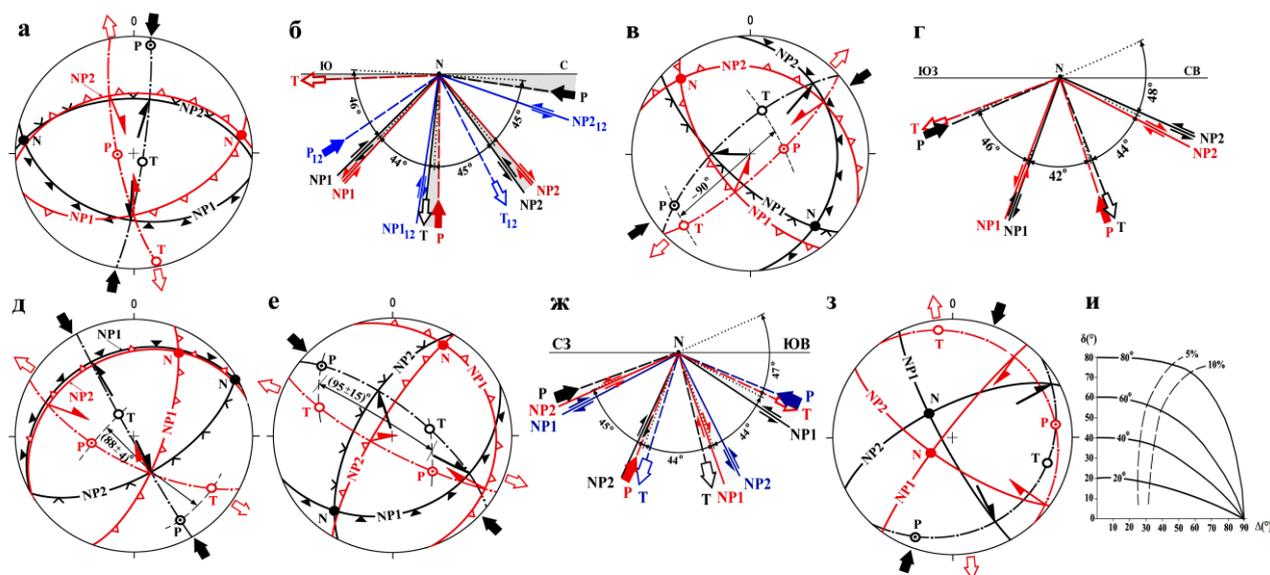


Рисунок 15. Соотношение (на стереограммах и сводных разрезах) проекций основных осей (P, T) и нодальных плоскостей в проявлениях сейсмогенеза взбросового и сбросового типов, отражающих наличие инверсии кинематических обстановок сжатия (показаны черным) и растяжения (показаны красным) в направлениях: а, б – субмеридиональном; в, з – ЮЗ-СВ; д-ж – ЮВ-СЗ; з – проявления сдвигового типа для обстановок ортогонального сжатия и растяжения; и – номограмма изменения наклонов проекций для плоскостей с разными углами падения (δ) при различных их отклонениях (β) от положения, перпендикулярного к линии разреза. Условные обозначения – на рис. 13.

Многообразие обстановок, реконструированных в очагах Южно-Крымской сейсмогенной зоны, указывает на ее гетерогенный характер и сложное строение, не позволяя обосновать принадлежность этой зоны к какому-либо одному типу сейсмогенеза. В ее пределах проявлялись обстановки как разнонаправленного сжатия, так и ориентированного в разных направлениях растяжения; при этом очаги Южно-Крымской зоны формировались в широком диапазоне деформационных режимов (рис. 16). Учитывая структурно-кинематические характеристики и параметры нодальных плоскостей, рассматриваемых в качестве возможных сейсмогенных разрывов, представляется маловероятным, чтобы доминирующим фактором, предопределившим особенности строения и современной геодинамики Крыма, являлись процессы поддвига, субдукции или квазисубдукции Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров.

В пятой главе проанализированы пространственно-временные аспекты тектосейсмогенеза Крыма и его обрамления в системе альпийской геодинамики региона. В дополнение к выводам предыдущих разделов, исследования учитывали: а)

результаты идентификации основных разрывных структур в зоне сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты, полученные в процессе интерпретации скоростной модели по профилю ГСЗ DOBRE-5; б) данные историко-структурного анализа платформенных комплексов Скифской плиты и Северного Причерноморья, выполненного на основе 32-х повременных карт; в) результаты геодинамических реконструкций, в которых Черноморская впадина рассматривается как задуговой бассейн, образовавшийся вследствие деструкции континентальной коры кратона в тылу Понтийской островной дуги.

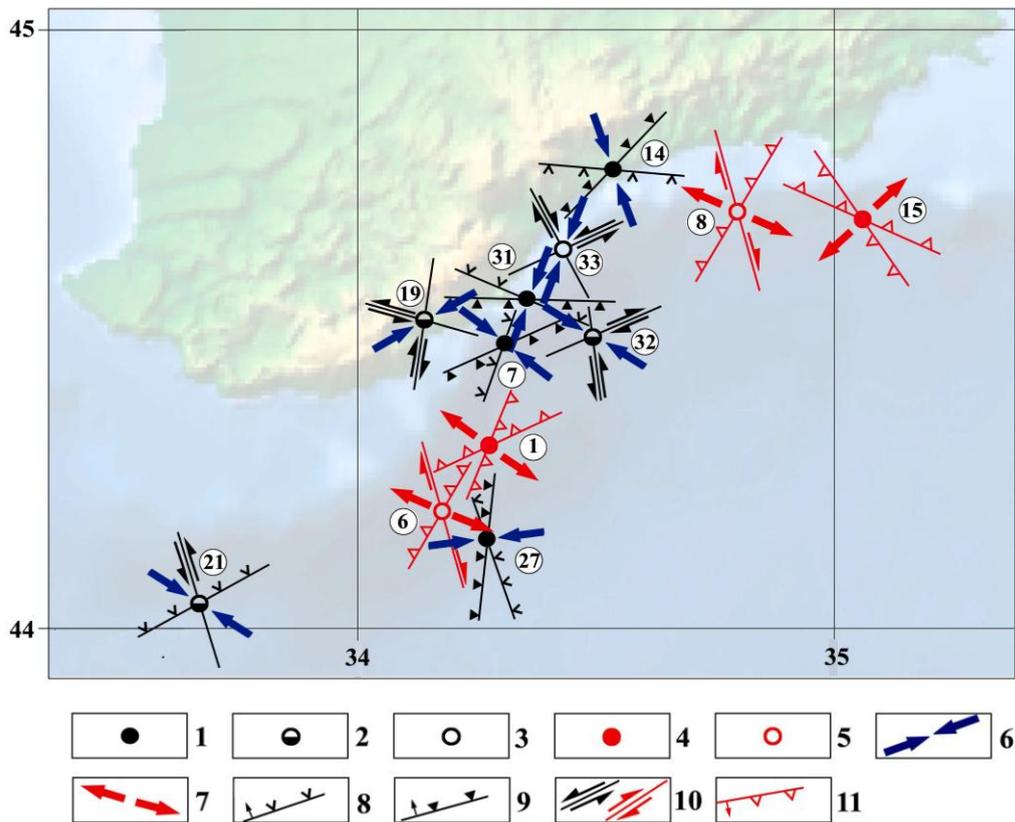


Рисунок 16. Гетерогенный характер Южно-Крымской зоны.

1-5 – эпицентры очагов взбросового (**1**), взбросо-сдвигового (**2**), сдвигового (**3**), сбросового (**4**) и взбросо-сбросового (**5**) типов и их номера в каталоге; **6-7** – направления сжатия (**6**) и растяжения (**7**) в момент землетрясения; **8-11** – проекции нодальных плоскостей на поверхность и их структурно-кинематические характеристики (**8** – взбросы, **9** – надвиги, **10** – сдвиги и направления перемещения вдоль них, **11** – сбросы). Примечание: а) цифры в кружках – номера очагов в каталоге; б) бергитрихи – со стороны висячего крыла разрыва.

Профиль DOBRE-5 ориентирован в широтном направлении и имеет длину более 600 км (от г. Рени, Украина, до г. Керчь, Крым). Скоростная модель дает представление о строении региона до глубин 50-70 км. В ней выделен ряд субслоистых геологических тел, разделенных преломляющими или отражающими сейсмическими границами. В разрезе идентифицированы: 1) осадочный чехол (скорости продольных волн $V_p=1,90-5,70$ км/с); 2) основание Скифской плиты ($V_p=5,72-6,05$ км/с); 3) верхний ($V_p=6,2-6,4$ км/с), средний ($V_p=6,50-6,70$ км/с) и нижний ($V_p=6,80-7,20$ км/с) слои коры; 4) раздел Мохо ($V_p=8,15-8,20$ км/с), а также высокоскоростной слой (HVLC) с $V_p=7,16$ км/с – часть коры, измененная процессами магматического или структурного андерплейтинга (рис. 17). По В.Б.Соллогу, б

А.В.Чекунову и др., выделившим в 80-е годы подобный сегмент по геотраверсу V, имеющему аналогичное местоположение, слой представляет собой «коро-мантийную смесь», возникшую при раздвигании земной коры вдоль шва сочленения разновозрастных платформ с образованием Одесско-Джанкойского палеорифта, называемого впоследствии другими исследователями региона Каркинитским рифтом.

Характер скоростных разделов на профиле DOBRE-5 позволил установить зоны крупных разрывных нарушений (рис. 17). Зона 1 выделяется по изгибу границ со смещением комплексов коры и поверхности Мохо по типу сброса. Основанием для выделения зон 2 и 3 послужил факт «утроения» разреза путем переслаивания высокоскоростных фрагментов, характерных для дорифейского гранитно-гнейсового субстрата, и низкоскоростных, отвечающих варисским комплексам Скифской плиты. Зона 2 также разграничивает отложения чехла таким образом, что высокоскоростной слой залегает на образованиях с низкими скоростями. Эти соотношения фрагментов скоростного разреза позволяют идентифицировать зоны 2 и 3 как взбросы или надвиги, рассматривая их в системе «автохтон-паравтохтон-аллохтон».

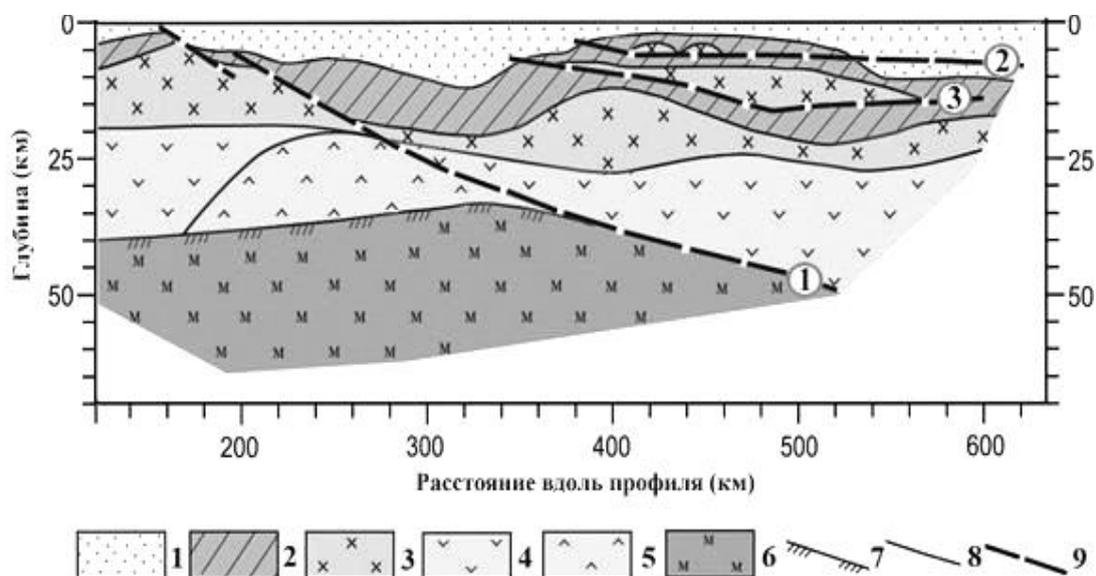


Рисунок 17. Строение коры и верхней мантии вдоль профиля ГСЗ DOBRE-5.

1 – чехол, 2 – основание Скифской плиты; 3 – верхняя кора, 4 – нижняя и средняя кора кратона; 5 – слой HVLC; 6 – верхняя мантия; 7 – Мохо; 8 – основные скоростные границы; 9 – разрывные нарушения (цифры в кружках: 1 – зона сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты, 2-3 – Верхний и Нижний Центрально-Крымские надвиги).

Пространственно-кинематическая идентификация выделенных нарушений выполнялась методами анализа на стереографических сетках с учетом особенностей строения региона. В качестве исходных данных использованы ориентировка профиля (274°) и осредненные углы наклонов проекций нарушений (8° – для зоны 1; 3° – для зон 2, 3). Рассмотрены возможные варианты их положений с углами наклонов 10° , 20° , ... 80° в северных и южных румбах. Для каждого из вариантов определено положение вектора смещения (по падению плоскости или отклоняющегося в обе стороны на 15°), и реконструированы ориентировки осей максимального растяжения и сжатия с учетом допусков на величину $\pm 15^\circ$.

Анализ результатов этих построений показал следующее:

1. Параметры зоны 1 соответствуют рангу надрегиональных структур:

горизонтальная амплитуда смещения достигает 60 км, вертикальная – 12-15 км; ширина зоны ее динамического влияния составляет 60 км; протяженность – 400 км. Она является шовной зоной сочленения Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты с элементами залегания $160/17^\circ$, сформировавшейся в обстановках меридионального или ЮЮВ-ССЗ ($340 \leftrightarrow 160^\circ$) растяжения. Имея вверху более крутое (до 30°) падение, зона с глубиной выполаживается (рис. 17), вследствие чего обретает облик листрического сброса.

2. Протяженность зоны 2 составляет более 250 км, глубина залегания – 5-8 км, вертикальная амплитуда смещения – более 4 км. Зона 3 (на глубинах 7-15 км) слабо изогнута и весьма протяженна (не менее 260 км); вертикальная амплитуда смещения вдоль нее составляет 4-15 км. Согласно построениям, с вероятностью 70% зоны 2 и 3 имеют субширотное простирание с падением от 15° и более в северных или в южных румбах, а их формирование обусловлено обстановками субмеридионального сжатия. На возможность северного падения зон 2 и 3 указывает наличие Березовского и Сарыбашского надвигов в платформенном чехле, установленных бурением вблизи профиля DOBRE-5. Также возможно, что зоны 2 и 3 имеют южное падение. В этом случае Березовская и Сарыбашская структуры – это ретронадвиги более низкого ранга с обратным падением по отношению к основной системе. Независимо от того, какому из вариантов интерпретации залегания зон 2 и 3 отдается предпочтение, они обозначены как Верхний (зона 2) и Нижний (зона 3) Центрально-Крымские надвиги.

Выделенные нарушения сформированы в противоположных условиях: ЮЮВ-ССЗ или меридионального растяжения (зона 1) и субмеридионального сжатия (зоны 2 и 3). Последовательность проявления инверсионных обстановок и периоды, в течение которых та или иная из них являлась доминирующей, обоснованы полихронной цикличностью движений коры по типу продольного сжатия-растяжения, которая получила отражение в составе и особенностях распространения платформенных отложений Равнинного Крыма и Причерноморья. Длиннопериодная составляющая цикличности указывает на то, что альпийский этап подразделяется на ранне-, средне- и позднеальпийский подэтапы, в каждом из которых проявляются трансгрессивные и регрессивные тенденции осадконакопления (трансгрессивная и регрессивная стадии – *t*, *r*) и периоды максимального (инундационная – *i*) и минимального (эмерсивная стадия – *e*) распространения морского бассейна (рис. 18), отражающие обстановки, соответственно, растяжения и сжатия. Сопоставление этих данных с результатами палеогеодинамических реконструкций показывает, что ранне- и среднеальпийский подэтапы отражают эволюцию бассейнов, формирующихся на южной окраине Евразии перед фронтом зон субдукции Неотетиса, расположенных на разном удалении от Крыма, а время, соответствующее изменению положения субдукционных зон (конец палеоцена–начало эоцена), совпадает с границей между этими подэтапами. Начало позднеальпийского подэтапа (граница раннего и среднего миоцена) соответствует периоду закрытия Неотетиса и образования внутреннего Сарматского моря. В диссертации детально проанализированы обстановки в регионе в течение каждой стадии всех 3-х подэтапов с акцентом на периоды возникновения и активизации нарушений, выделенных на профиле ГСЗ DOBRE-5.

Особенности латерального распределения разрывов разных типов зависят не только от вариаций обстановок, но и от мощности и строения земной коры. Так, в условиях сжатия в пределах континентальной коры большой мощности (Горный Крым, значительная часть Скифской плиты и Причерноморский склон древней платформы – см. рис. 19) превалировали сдвиговый и взбросо-сдвиговый режимы.

Области глубоководных впадин с редуцированной субокеанической и океанической корой, зона континентального склона, а также permanently подвергающаяся деструкции зона сочленения разновозрастных платформ были благоприятны для проявления взбросового и сдвиго-взбросового деформационных режимов. Изменение характера деформационных режимов и, соответственно, типов разрывов отражает наличие зональности условий разрывообразования в направлении от склона древней платформы и Крымского полуострова к центру Черноморской впадины. Обратная тенденция наблюдается по направлению к основным сейсмогенным структурам континентальной коры турецкого побережья Черного моря, где сдвиговый характер деформаций в очагах землетрясений является весьма распространенным.

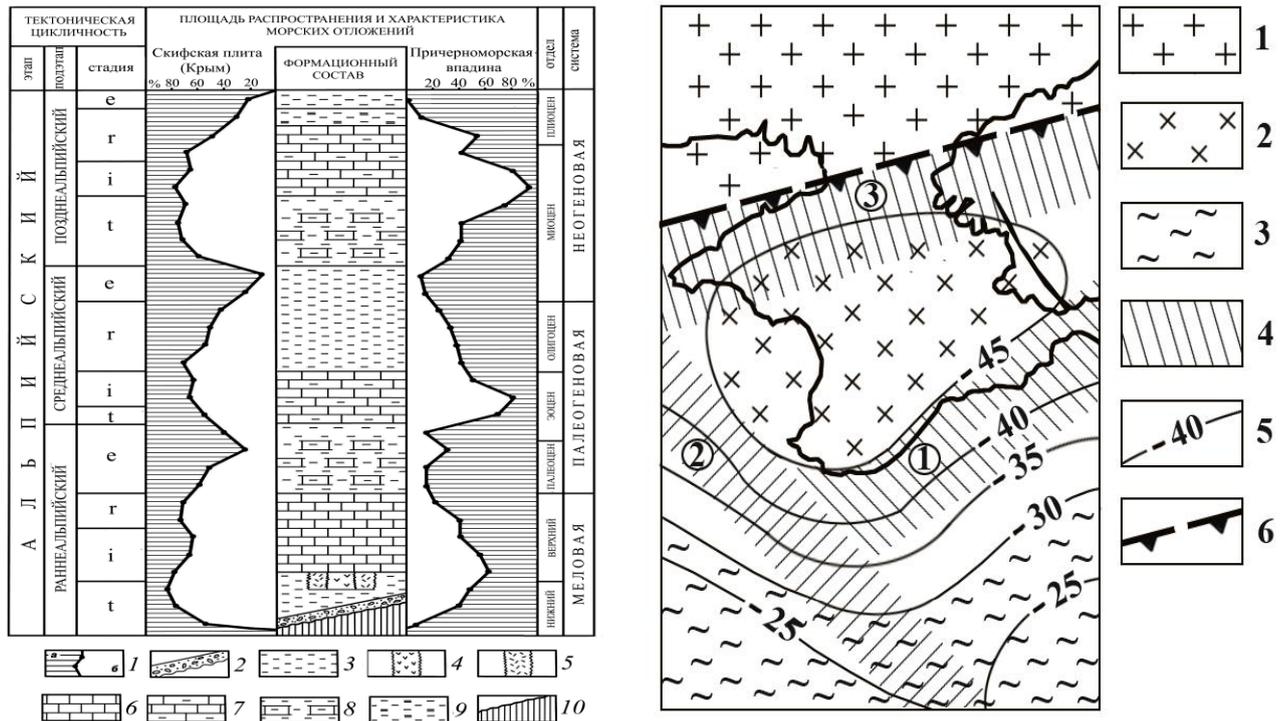


Рисунок 18 (слева). Цикличность колебательных движений земной коры Северного Причерноморья по типу продольного сжатия-растяжения в течение альпийского этапа. 1 – соотношение площади суши (а) и морских отложений (б); 2-8 – геологические формации чехла: 2 – терригенная базальная, 3 – терригенная, 4 – вулканогенная андезитовая, 5 – вулканогенно-терригенная, 6 – карбонатная, 7 – терригенно-карбонатная, 8 – карбонатно-терригенная, 9 – терригенная лимонитсодержащая; 10 – складчатое основание.

Рисунок 19 (справа). Особенности строения земной коры региона, обусловившие различие проявлений тектосейсмогенеза в обстановках регионального сжатия. 1-2 – области развития мощной континентальной коры с преимущественными проявлениями тектосейсмогенеза сдвигового и взбросо-сдвигового типов (1 – Причерноморский склон Восточно-Европейской платформы, 2 – Скифская плита и Горный Крым); 3-4 – области субокеанической, океанической (3 – глубоководные впадины), редуцированной континентальной коры и зоны глубинных разломов (4) с преимущественными проявлениями тектосейсмогенеза взбросового и сдвиго-взбросового типов (цифры в кружках: 1 – Южнобережная, 2 – Одесско-Синопская, 3 – Северо-Крымская); 5 – изолинии глубин поверхности Мохо; 6 – граница Восточно-Европейской платформы и Скифской плиты.

В шестой главе рассмотрены результаты применения тектонофизических методов и их комплексирования с другими видами исследований при изучении

причин и прогнозе катастрофического развития природных и природно-техногенных геосистем. Не являясь картировочными, тектонофизические методы также позволяют осветить некоторые спорные аспекты интерпретации «ключевых» объектов в составе региональных тектонических построений. Это показано на примере структур, каждая из которых является важным элементом в моделях, трактующих строение Крыма с альтернативных позиций. Таковыми являются дилеммы: а) Соколинский меланж или Бельбекский разлом сдвигового типа в ЮЗ части Качинского поднятия Крыма; б) балка Мраморная у м. Фиолент (р-н Севастополя), вдоль которой проходит разлом, альтернативно трактуемый как Георгиевский сброс либо Мраморный ретронадвиг Предгорной сутуры. Первая дилемма решалась с применением морфоструктурного (выявление разломных зон по стратоизогипсам куэстовых отложений) и тектонофизического (структурных парагенезисов) методов. В работе показано, что Бельбекский и параллельный ему Качинский разломы представляют собой левые сдвиги СЗ простирания (310°) с горизонтальной амплитудой до 3-х км; ширина зон их присдвиговых деформаций составляет 3-5 км. Левосдвиговый парагенезис трещинных структур – *R*- и *L*-сколов (290° и 310°), замеренных в обрывах куэст, отражает обстановки горизонтального меридионального растяжения или широтного сжатия. Параметры зеркал скольжения показывают, что микро- и мезоструктуры, соответствующие зоне Соколинского меланжа, в исследуемом районе отсутствуют. Бельбекский разлом прослежен и к югу от куэстовой гряды в породах таврической серии (верхний триас–нижняя юра), где он представлен мощной зоной дробления, вертикальное падение и СЗ ($305-310^\circ$) простирание которой обосновано способом параметризации разломных зон в сложнодислоцированных слоистых отложениях.

Второй «ключевой» объект по-своему уникален, поскольку это единственный тектонический контакт верхнеюрских и миоценовых образований в Крыму. Сторонники разломно-блоковой тектоники интерпретируют его как Георгиевский сброс, являющийся фрагментом глубинного Крымско-Кавказского разлома. С позиций актуалистической геодинамики эта структура является ретронадвигом Предгорной сутуры. Однако аккреционные и коренные зеркала скольжения в основании верхнеюрских известняков указывают на сдвиговую природу этого нарушения: большая их часть является правыми сдвигами субмеридионального простирания. При этом сбросовые подвижки не играли здесь той роли, которая им отводилась ранее, а признаков взбросо-надвиговых структур вообще не установлено.

Уточнение геолого-структурных условий территорий населенных пунктов и участков размещения важных или потенциально опасных объектов выполняется при сейсмическом микрорайонировании (*СМР*). Выделение зон активных разломов при этом является обязательным, поскольку, согласно нормативам, эти зоны исключаются из застройки. В процессе этих исследований установлено, что в катастрофическом развитии локальных геосистем определяющую роль играют элементы разломной тектоники и особенности их формирования и/или активизации. В условиях слабой геологической обнаженности большое значение обретают общие закономерности тектонического разрывообразования, которые служат основой для идентификации разрывов, активизирующихся в современных полях напряжений. Влияние разломных зон на уровень сейсмичности или на развитие опасных экзогенных процессов исследованы в процессе работ по *СМР* на территории размещения гидротехнических сооружений Днепровской ГЭС (г. Запорожье, Украина) и в населенных пунктах Крыма – в г. Симферополь (центральная часть), г. Керчь (Солдатская Слободка). Результаты исследования новейшей тектоники учтены при составлении карт *СМР*

этих объектов, где они выделены как зоны, неблагоприятные для застройки. Также исследовано влияние тектоники на формирование обвально-оползневых структур м. Фиолент (г. Севастополь), поскольку строительство в пределах береговых склонов, подверженных воздействию эрозионно-абразионных процессов, сопряжено с риском активизации обвально-оползневых явлений. Обследование показало, что одной из основных причин, обусловивших возможность активизации этих явлений, служит наличие тектонических нарушений, которые при денудации склона играют роль трещин бокового отпора. Спровоцировать эти явления могут экзогенные (морская абразия, эрозия склона) и эндогенные факторы (землетрясения), а также техногенные воздействия в виде чрезмерного статического или динамического нагружения присклоновых территорий.

Приведены результаты тектонофизической интерпретации разрывов и показана их роль в подготовке локальных природных и природно-техногенных катастроф на примере оползня 06.06.1997 г. (рис. 20) в микрорайоне Тополь-1 г. Днепропетровска (Украина) и оползня 18-19.04.1997 г. на 18-м км трассы Севастополь-Ялта (Крым).

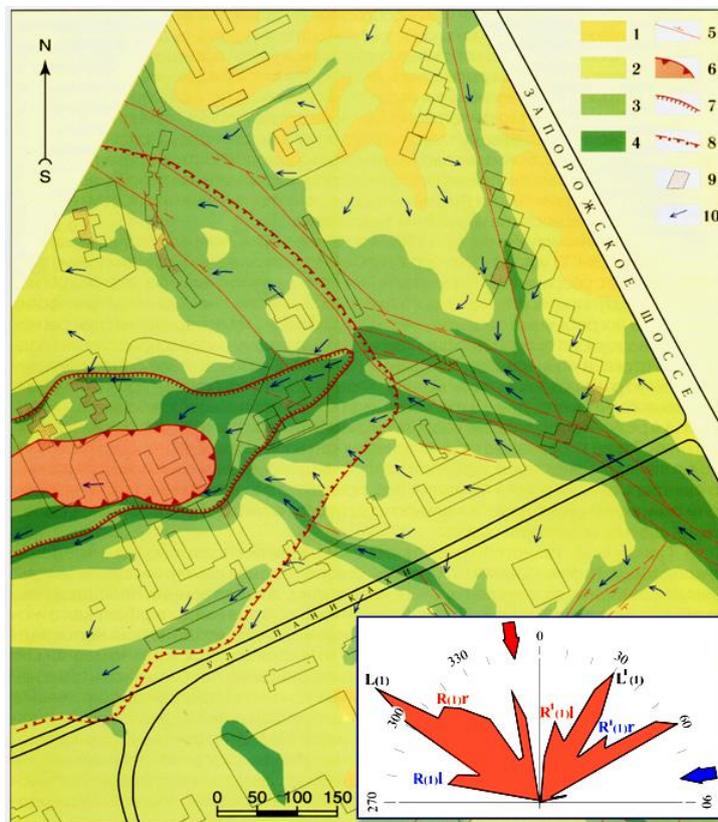


Рисунок 20. Карта зон геолого-экологической опасности в микрорайоне Тополь-1 г.

Днепропетровска и парагенезисы новейших тектонических структур (на врезке), активизированных в обстановках субмеридионального (красные стрелки и индексы) и субширотного (синие) сжатия; L-сколы активизируются в обоих случаях.

1-4 – зоны с разным уровнем геолого-экологической опасности; 5 – установленные и предполагаемые разрывные нарушения; 6 – граница оползня-потока 06.06.1997 г.; 7 – граница деструктивного поля в водонасыщенных грунтах с возможным расширением оползня; 8 – граница оползнеопасной зоны, активизация которой возможна в случае непринятия мер по уменьшению антропогенной нагрузки на природную систему; 9 – инженерные сооружения с видимыми деформациями; 10 – направление потоков подземных вод.

Первая из этих катастроф произошла в пределах древней платформы в зоне развития пород лессовой формации, вторая – в пределах горно-складчатой области с активной тектоникой и сложным строением. Также установлены причины, обусловившие аварийное состояние всемирно известного памятника архитектуры – здания Одесского театра оперы и балета (г. Одесса, Украина). В пределах всех этих объектов катастрофические явления, как способ разрядки напряжений, происходили в самом слабом звене геосистемы, где сконцентрировалось влияние нескольких факторов. Однако возникновение катастрофы приписывалось воздействию только того из них, который сыграл роль триггера в момент, когда геосистема уже находилась в состоянии, близком к критическому: подтоплению, чрезмерному обводнению и другим. Исследования показали, что основную роль в подготовке катастроф играли особенности современной активизации разломно-трещинных структур, которые изначально являлись разновозрастными и по своим параметрам не отвечали парагенезисам разрывов, образовавшимся в одном поле тектонических напряжений. Однако в результате изменения обстановок происходило объединение в единые зоны тех фрагментов существующих или новообразованных разрывов, параметры которых удовлетворяли соответствующих этим обстановкам полям напряжений, обусловив проникновение разломно-трещинных структур в водоупорные горизонты с формированием фильтрационных окон в разрезе. Это способствовало перераспределению подземного стока и концентрации грунтовых потоков, создавая предпосылки для избыточного обводнения территорий, для возникновения суффозионно-карстовых провалов, обвально-оползневых смещений и т.п., которые, в конечном итоге, и предопределили катастрофические сценарии развития вышеуказанных геосистем.

Анализ показал, что основные особенности активизации разломно-трещинных структур как в пределах сейсмически активных регионов, так и в асейсмичных областях, обусловлены влиянием ортогонально ориентированных полей напряжений; в меньшей степени проявились диагональные системы. Изменения (в том числе – инверсионные) ориентировок полей напряжений происходили в течение коротких временных интервалов, свидетельством чего являются фокальные механизмы очагов землетрясений взбросо-сдвигового типа, произошедших в последние годы в центре Украинского щита в обстановках субширотного (25.12.2007 г.) и субмеридионального (23.06.2013 г.) сжатия. Таким образом, особенности влияния тектонических разрывов на состояние грунтовых массивов, равно, как и их роль в активизации негативных процессов, необходимо учитывать при массовой или специализированной застройке территорий с проработкой прогнозных сценариев развития опасных процессов и явлений в техногенно-измененных условиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выводы, полученные в процессе исследований, отражают как общие для всех изучаемых объектов закономерности тектосейсмогенеза, так и специфические черты их проявления в той или иной обстановке.

1. Процессы разрывообразования в пределах изученных объектов обусловлены влиянием разноориентированных полей напряжений, которые отражают изменения и многообразие региональных кинематических обстановок сжатия и/или растяжения и предопределяют тип деформационных режимов разрывообразования. Особенностью всех систем напряжений является избирательность ориентировок их главных осей по

отношению к сторонам света в субмеридиональном, субширотном и диагональных направлениях, которая проявляется как в моделях тектосейсмогенеза основных (сдвигового, сбросового, взбросового) типов, так и в моделях, отражающих наличие локальных трансформаций структурообразующих полей напряжений.

2. В пределах геосистем, подверженных влиянию нескольких геодинамических факторов, характер сейсмогенных деформаций в очагах землетрясений, как правило, отражает не суммированное их воздействие в виде некоего результирующего поля напряжений, а временное преобладание воздействий какого-либо одного фактора над остальными. Этим обусловлен периодически проявляющийся как правосдвиговой, так и поддвиговой характер современной активизации системы Загрос, а в пределах Вранча сейсмичность проявилась в виде нескольких сейсмогенных зон с различными пространственно-кинематическими параметрами, вследствие чего ее предложено обозначать не как «сейсмическая зона», а как «сейсмическая область» Вранча.

3. В пределах Горного Крыма периодические изменения кинематических обстановок альпийского разрывообразования обусловили многообразие проявлений деформационных режимов и широкий спектр тектонических разрывов, роль и место которых в регионе отражают количественные соотношения этих разрывов и их парагенезисов. Согласно этим соотношениям, структурную основу Горного Крыма (в порядке значимости) составляют: 1) сдвиги, сбросо- и взбросо-сдвиги, которые формируются в обстановках ортогонального сжатия или растяжения, образуя доминирующую систему разноранговых диагонально ориентированных нарушений; 2) сбросы и сдвиго-сбросы, образовавшиеся в обстановках меридионального или диагонального растяжения; 3) сдвиги, сбросо- и взбросо-сдвиги меридионального и широтного простираций, обусловленные системами напряжений диагональных ориентировок; 4) структурный рисунок дополняют взбросы, сдвиго-взбросы и пологие надвиги, образовавшиеся в обстановках меридионального или диагонального сжатия, которые в строении Горного Крыма занимают хоть и не столь существенное, как отмечается в некоторых работах, но вполне определенное место.

4. В процессе регионального сейсмогенеза, в отличие от разрывообразования в пределах Горного Крыма, доминирующую роль играют взбросовые деформационные режимы, тогда как очаги сдвигового типа имеют ограниченное распространение. Эти различия проявлений тектосейсмогенеза обусловлены изменениями толщины земной коры и особенностями ее строения. В обстановках регионального сжатия в пределах континентальной коры большой мощности реализуются преимущественно разрывные сдвиговые и взбросо-сдвиговые деформации, тогда как глубоководные впадины с редуцированной корой субокеанического и океанического типов благоприятны для формирования разрывов взбросового и сдвиго-взбросового типов. Обратная тенденция наблюдается по мере приближения к побережью Турции, где сдвиговой характер деформаций в континентальной коре является весьма распространенным.

5. Инверсионные изменения кинематических обстановок разрывообразования в Крымско-Черноморском регионе на протяжении альпийского этапа обусловлены длиннопериодной цикличностью колебательных движений земной коры по типу продольного сжатия-растяжения. Эта цикличность предопределена особенностями геодинамического развития Средиземноморского пояса – эволюцией его задуговых бассейнов, формирующихся на южной окраине Евразии в тылу зон субдукции Неотетиса, функционировавших в различные периоды альпийского этапа на разном удалении от Крыма. Эффект инверсии кинематических обстановок проявляется как в пределах тектонически (и сейсмически) активных регионов, так и в относительно

асейсмичных районах. На фоне длиннопериодной цикличности происходят и кратковременные изменения обстановок, обуславливавшие многообразие проявлений новейшего и современного (сейсмогенного) разрывообразования.

6. В процессе сейсмогенеза в пределах Крымско-Черноморского региона под влиянием периодически действующих в одинаковых направлениях сжимающих и растягивающих (инверсионных) напряжений наиболее предпочтительными для разрывообразования являются сегменты (сектора) в разрезе коры, отвечающие положению плоскостей максимальных касательных напряжений. Вследствие этого в обоих случаях (и сжатия, и растяжения) формируются (активизируются) одни и те же системы разрывов, но в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, а при наличии растяжения – как сбросовые нарушения.

7. Многообразие типов фокальных механизмов в очагах Южно-Крымской сейсмогенной зоны указывает на ее гетерогенный характер и сложное строение, что не позволяет обосновать ее принадлежность к какому-либо одному типу сейсмогенеза, поскольку здесь проявлялись обстановки как разнонаправленного сжатия, так и ориентированного в разных направлениях растяжения. Учитывая структурно-кинематические и пространственные параметры нодальных плоскостей, рассматриваемых в качестве возможных сейсмогенных разрывов, маловероятно, чтобы основным фактором современной геодинамики региона являлись процессы поддвига или субдукции Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров.

8. Установленные закономерности проявления структурообразующих полей напряжений расширили спектр решаемых задач прикладного характера. В частности, было установлено, что разломные зоны, обусловившие катастрофическое развитие геосистем, изначально являлись разновозрастными, не отвечающими единому полю напряжений. Однако на новейших (в том числе, современных) стадиях тектогенеза происходила активизация тех их фрагментов, параметры которых удовлетворяют измененным полям напряжений, и объединение этих фрагментов в единую систему водопроницаемых разломных зон, создавая предпосылки для развития негативных процессов и явлений (избыточного обводнения, карстовых провалов, оползней и т.п.), которые нередко имели катастрофический характер.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в периодических изданиях, рекомендованных ВАК:

1. **Вольфман Ю.М.**, Гинтов О.Б., Останин А.М., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. О роли структурно-кинематической идентификации тектонических разрывных нарушений в формировании представлений о структуре и геодинамике Крымского региона // Геофизический журнал, 2008. – Т.30, №1. – С. 49-61.

2. **Вольфман Ю.М.** О влиянии кинематических обстановок на цикличность геологических процессов в пределах Крыма и Северного Причерноморья в течение альпийского этапа // Геофизический журнал, 2008. – Т.30, №5. – С. 101-114.

3. **Вольфман Ю.М.**, Скляр А.М., Верховцев В.Г., Королев В.А., Колесникова Е.Я., Останин А.М. Детальные геолого-структурные исследования для уточнения уровня сейсмической опасности гидротехнических сооружений (на примере Днепровской ГЭС) // Геофизический журнал, 2011. – Т.33, №5. – С. 100-114.

4. Кендзера А.В., Старовойт О.Е., Омельченко В.Д., Надежка Л.И., **Вольфман Ю.М.**, Габсатарова И.П., Пивоваров С.П., Лесовой Ю.В. Криворожское землетрясение 25 декабря 2007 г. Инструментальные данные // Геофизический

журнал, 2012. – Т.34, №2. – С. 60-71.

5. **Вольфман Ю.М.** Структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон системы Загроса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Геофизический журнал, 2013. – Т.35, №2. – С. 38-64.

6. Собисевич А.Л., Старостенко В.И., Собисевич Л.Е., Кендзера А.В., Шуман В.Н., **Вольфман Ю.М.**, Потемка Э.П., Канониди К.Х., Гарифулин В.А. Черноморские землетрясения конца декабря 2012 года и их проявления в геомагнитном поле // Геофизический журнал, 2013. – Т.35, №6. – С. 54-70.

7. **Вольфман Ю.М.** Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. 1 // Геофизический журнал, 2014. – Т.36, №6. – С. 93-112.

8. **Вольфман Ю.М.**, Гинтов О.Б., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. Тектонофизическая интерпретация механизмов очагов землетрясений системы Загрос // Геодинамика и тектонофизика. – 2014, 5(1). – С. 305-319.

9. **Вольфман Ю.М.** Деформационные режимы и кинематические обстановки новейшего тектонического разрывообразования в пределах Горного Крыма. 2 // Геофизический журнал, 2015. – Т.37, №1. – С. 100-120.

10. Гинтов О.Б., Муровская А.В., Егорова Т.П., **Вольфман Ю.М.**, Цветкова Т.А., Бугаенко И.В., Колесникова Е.Я., Островной А.Н., Бубняк И.Н., Фарфуляк Л.В., Амашукели Т.А. Глубинная сейсмогенная зона Вранча как индикатор геодинамического процесса // Геофизический журнал, 2015. – Т.37, №3. – С. 22-49.

11. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H., Artemieva I., Sosson M., **Volfman Y.**, Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. Seismic model of the crust and upper mantle in the Scythian platform: the DOBRE-5 profile across the north western Black Sea and Crimean peninsula // Geophysical Journal International, 2015. – 201 (2015). – P. 406-428.

12. Миллюков В.К., Виноградов М.П., Лагуткина А.В., Миронов А.П., Мясников А.В., Пустовитенко Б.Г., Боборыкина О.В., **Вольфман Ю.М.**, Насонкин В.А. Наблюдение собственных колебаний Земли лазерными интерферометрами-деформографами // Измерительная техника, 2015. – № 12. – С. 25-30.

13. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я., Пустовитенко Б.Г., Миллюков В.К. Избирательный характер проявления сейсмогенерирующих полей напряжений в пределах Средиземноморского пояса (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Вулканология и сейсмология. – 2017. – №6. – С. 64-79.

14. Hippolyte J.-C., Murovskaya A., **Volfman Y.**, Yegorova T., Gintov O., Kaumaksi N., Sangu E. Age and geodynamic evolution of the Black Sea Basin: Tectonic evidences of rifting in Crimea // Marine and Petroleum Geology, 2018. – Vol. 93. – P. 298-314.

15. **Вольфман Ю.М.**, Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. Обстановки сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона (по данным решений механизмов очагов землетрясений) // Ученые записки Крымского федерального университета имени В.И. Вернадского. География. Геология. – Т.4 (70), №4. – Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского. Симферополь, 2018. – С. 206-250.

16. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я. Разрывные структуры зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и Крымского сегмента Скифской плиты в сечении профиля ГСЗ DOBRE-5 // Геотектоника, 2020. – №6. – С. 39-58.

Коллективные монографии:

17. Геодинамическая карта Украины. Масштаб 1:1 000 000 / В.Г. Пастухов, Н.А. Астахов, М.К. Багинян, И.Р. Белоус, **Ю.М. Вольфман** и др. – Киев: Гос. Комитет Украины по геологии и использованию недр., Гос. Геол. предприятие «Геопрогноз», 1993. – 213 с.

18. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том VIII / Под ред. И.А.Керимова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2018. – 547 с.

19. Очерки геодинамики Украины / Под ред. В.И. Старостенко, О.Б. Гинтова. – Киев: Тов. «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ», 2018. – 465 стр.

20. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том IX / Под ред. И.А.Керимова, В.Б. Заалишвили, В.И. Черкашина. – М.: ИИЕТ РАН, 2019. – 727 с.

21. Современные проблемы геологии, геофизики и геоэкологии Северного Кавказа. Том X (в 2-х частях). Часть 2 / Науч. редакторы: академик РАН А.О. Глико, д.ф.-м.н., профессор И.А. Керимов. . – М.: ИИЕТ РАН, 2020. – 732 с.

Основные публикации в других изданиях:

22. **Вольфман Ю.М.**, Ермаков Ю.Г. Особенности строения области перехода континентальной коры к субокеанической коре Черноморской впадины в пределах Северного Причерноморья / 27-й Международный геол. Конгресс. – Тезисы. Вып. III, секции 06, 07. – М.: Недра, 1984. – С. 452-453.

23. Ермаков Ю.Г., Кирикилица С.И., **Вольфман Ю.М.**, Щербакова Л.Н. Структурные формы венд-раннемезозойской тектонической активизации Приднестровской части Русской плиты // Геологический журнал, 1985.– №4. – С. 117-127.

24. Ермаков Ю.Г., **Вольфман Ю.М.** Тафрогенез и его роль в формировании платформенных структур форланда поднятий Добруджи и Горного Крыма // Доклады АН УССР. Сер. Б. – 1986. – №4. – С. 9-12.

25. **Вольфман Ю.М.** Тектоническая карта структурных ярусов Крымского полуострова / Тектоносфера Украины: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1989. – С. 163-169.

26. Ермаков Ю.Г., Кирикилица С.И., **Вольфман Ю.М.** Некоторые результаты историко-геологического районирования Украинского щита и его складчатого обрамления при составлении карты глубинного строения Украины и Молдавии / Тектоносфера Украины: Сб. науч. тр. – К.: Наук. думка, 1989. – С. 101-105.

27. 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.– М.: ОИФЗ РАН, 1995. – С. 27- 45.

28. Новик Н.Н., **Вольфман Ю.М.** Эволюция планетарных полей напряжений в пределах сейсмоактивных регионов Украины, новейшие разрывы и разрывные смещения // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. – Сб. мат. конф. – Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. –1997.– С. 81-90.

29. Новик Н.Н., **Вольфман Ю.М.**, Останин А.М. Отражение геодинамики в новейших структурах сейсмоактивных регионов Украины // Геодинамика Крымско-

Черноморского региона. – Сб. мат. конф. – Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. – 1997. – С. 91-102.

30. **Вольфман Ю.М.**, Новик Н.Н. Использование результатов геодинамических реконструкций при оценке предельных параметров сейсмичности // Геодинамика Крымско-Черноморского региона. – Сб. мат. конф. – Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. – 1997. – С. 103-111.

31. Чекунов А.В., Харитонов О.М., Борисенко Л.С., **Вольфман Ю.М.**, Кендзера А.В., Пустовитенко Б.Г., Скляр А.М. Детальное сейсмическое районирование сейсмоактивных регионов Украины // Геофизический журнал, 1998. – Т.20, №1. – С. 3-13.

32. **Вольфман Ю.М.**, Новик Н.Н. Тектонические и геодинамические предпосылки геологических природных и техноприродных катастроф // Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий. Ч.II. – Мат. междунар. научно-практич. семинара. – К.: 1999. – С. 52-64.

33. **Вольфман Ю.М.**, Останин А.М., Колесникова Е.Я. Влияние новейшей тектоники на формирование обвальнo-оползневых структур мыса Фиолент (на примере площадки размещения Георгиевского монастыря, г. Севастополь) // Фундаментальные и прикладные проблемы мониторинга и прогноза стихийных бедствий. – Мат. IV Междунар. семинара «СТИХИЯ–2001». – Севастополь, 2001. – С. 172-179.

34. Пустовитенко Б.Г., Кульчицкий В.Е., **Вольфман Ю.М.**, Пустовитенко А.А., Сафронов О.Н. Сейсмическая опасность юго-западной части Украины // Міжнар. наук.-техніч. збірн. «Будівельні конструкції». – Вип.60, «Будівництво в сейсмічних районах України». – К.: НДІБК, 2004. – С. 114-119.

35. **Вольфман Ю.М.**, Новик Н.Н., Останин А.М. Тектонические предпосылки катастрофического развития природных и техноприродных геосистем // Геополитика и экогеодинамика регионов. – Т.1, вып.1. – Симферополь: Крымский науч. центр НАНУ и МО Украины, Таврический нац. ун-т. – 2005. – С. 47-55.

36. **Вольфман Ю.М.**, Гинтов О.Б., Колесникова Е.Я., Лазаренко О.Е., Останин А.М. Структурные и тектонофизические аспекты решения некоторых спорных вопросов геодинамики Горного Крыма // Геофизический журнал, 2006. – Т.28, №2. – С. 23-38.

37. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я., Останин А.М. Некоторые методические приемы картирования и идентификации тектонических нарушений (на примере юго-западной части Горного Крыма) // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. – С. 172-178.

38. **Вольфман Ю.М.** Способ построения стереографических моделей структурно-кинематических парагенезисов вторичных смещений вдоль тектонических разрывов // Сейсмологический бюллетень Украины за 2005 г. – Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2007. – С. 179-184.

39. **Вольфман Ю.М.** Реконструкция полей тектонических напряжений как основа комплексного изучения тектонического разрывообразования и сейсмичности Крымско-Черноморского региона // Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму). – Сб. мат. междунар. науч. конф. – Ялта-Симферополь: Институт геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет, 2007. – С. 168-170.

40. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я., Останин А.М. Значение структурно-кинематической идентификации тектонических разрывных нарушений в

формировании представлений о строении Крымского региона (на примере Георгиевского разлома) // Уроки и следствия сильных землетрясений (к 80-летию разрушительных землетрясений в Крыму). – Сб. мат. междунар. науч. конф. – Ялта-Симферополь: Институт геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет, 2007. – С. 171-173.

41. **Вольфман Ю.М.** К проблеме комплексного изучения разрывообразования и сейсмичности Крымско-Черноморского региона // Нові геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища (Новые геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды). – Мат. науч. конф. – Львов, 2007. – С.15-17.

42. **Вольфман Ю.М.,** Гинтов О.Б., Останин А.М., Колесникова Е.Я. Геодинамические аспекты проблемы происхождения межгорных впадин и предгорной депрессии Горного Крыма // Геофізичні технології прогнозування та моніторингу геологічного середовища (Геофизические технологии прогнозирования и мониторинга геологической среды). – Мат. науч. конф. – Львов, 2008. – С. 24-25.

43. **Вольфман Ю.М.,** Скляр А.М., Королев В.А., Колесникова Е.Я., Останин А.М., Верховцев В.Г. Результаты детальных геолого-структурных исследований для уточнения сейсмической опасности Днепровской ГЭС // Строительство и техногенная безопасность. Сб. науч. трудов. – Вып. 35. – Нац. академия природоохранного и курортного строительства. – Симферополь, 2011. – С. 66-74.

44. **Вольфман Ю.М.,** Гинтов О.Б., Пустовитенко А.А., Колесникова Е.Я., Муровская А.В. Использование результатов тектонофизических исследований при изучении сейсмоструктуры Крымского региона // Проблемы сейсмоструктуры. – Мат. XVII Междунар. конф. / Под ред. А.О. Глико, Е.А. Рогожина, Ю.К. Щукина, Л.И. Надежка. – М.: ИФЗ РАН, 2011. – С. 157-162.

45. **Вольфман Ю.М.,** Колесникова Е.Я., Останин А.М. Результаты тектонофизического изучения новейшего тектонического разрывообразования в пределах Крымско-Черноморского региона и их значение для геодинамических реконструкций // Азово-Черноморский полигон изучения геодинамики и флюидодинамики формирования месторождений нефти и газа / Сб. докл. X Междунар. конф. «Крым-2012». – Симферополь, 2012. – С. 101-116.

46. **Вольфман Ю.М.** Отражение разноранговых систем напряжений и их трансформаций в процессах сейсмоструктурообразования // Геодинаміка. Научн. журн.– Львов, 2013. – №2(15).– С. 31-33.

47. Муровская А., Ипполит Ж.-К., Шеремет Е., Егорова Т., **Вольфман Ю.,** Колесникова Е. Деформационные структуры и поля напряжений Юго-Западного Крыма в контексте эволюции Западно-Черноморского бассейна // Геодинаміка. Научн. журн. – Львов, 2014.–№1(17).– С. 53-68.

48. **Вольфман Ю.М.,** Колесникова Е.Я. Сейсмоструктура очаговой области Вранча // Активные разломы и их значение для оценки сейсмической опасности: современное состояние проблемы – М-лы XIX науч.-практич. конф. с международным участием / под ред. Е.А. Рогожина, Л.И. Надежка. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2014. – С. 85-89.

49. Hippolite J.-C., Murovskaya A., Muller C., **Volfman Yu.,** Yegorova T., Gintov O., Sosson M., Sheremet (Korniyenko) Ye. Preliminary study of Cretaceous normal faulting in Western Crimea. – Special Darius publication of final symposium December 8-9, 2014. – P. 66-67.

50. Starostenko V., Janik T., Yegorova T., Farfuliak L., Czuba W., Środa P., Thybo H.,

Artemieva I., Sosson M., **Volfman Y.**, Kolomiyets K., Lysynchuk D., Omelchenko V., Gryn D., Guterch A., Komminaho K., Legostaeva O., Tiira T., Tolkunov A. The crust and upper mantle in the Scythian platform: seismic model along the DOBRE-5 profile (the northwestern Black Sea and the Crimean peninsula). – Special Darius publication of final symposium December 8-9, 2014. – P. 147-149.

51. **Вольфман Ю.М.**, Фарфуляк Л.В. Результаты идентификации и структурно-кинематической параметризации зоны сочленения Восточно-Европейской платформы и крымского сегмента Скифской плиты (по данным скоростной модели профиля ГСЗ DOBRE-5) // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов: мат. XX Всерос. конф. с международным участием / Ред. Н.М. Чернышев, Л.И. Надежка. – Воронеж: Изд.-полиграф. центр «Научная книга», 2016. – С. 102-107.

52. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я. Надвиговые структуры гетерогенного основания крымского сегмента Скифской плиты (по результатам интерпретации скоростной модели профиля ГСЗ DOBRE-5) // Глубинное строение, минерагения, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов: мат. XX Всерос. конф. с международным участием / Ред. Н.М. Чернышев, Л.И. Надежка. – Воронеж: Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2016. – С. 107-112.

53. **Вольфман Ю.М.**, Колесникова Е.Я. Стереографические модели сейсмогенеза и структурно-кинематическая идентификация сейсмогенных зон в пределах некоторых сегментов Средиземноморского пояса // Четвертая тектонофизическая конференция в ИФЗ РАН. Тектонофизика и актуальные вопросы наук о Земле: Мат. докл. всероссийской конф. в 2-х томах / отв. ред. Ю.Л. Ребецкий – Т.1. М.: ИФЗ РАН, 2016 – С. 375-382.

54. **Вольфман Ю.М.**, Пустовитенко Б.Г., Колесникова Е.Я. К проблеме иерархического соотношения разноориентированных полей напряжений в процессе сейсмогенеза Крымско-Черноморского региона // Результаты комплексного изучения сильнейшего Алтайского (Чуйского) землетрясения 2003 г., его место в ряду важнейших сейсмических событий XXI века на территории России: мат. XXI Науч.-практич. Щукинской конф. с международным участием / Ред.: Е.А. Рогожин, Л.И. Надежка. – М.: ИФЗ РАН, 2018. – С. 87-91.

Всего 89 публикаций.

Подписано к печати 29.12.2020 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага офсетная. Печать ризография.
Усл. печ. л. – 2,0.
Тираж 100 экз. Заказ № НИ/41.

Отпечатано в Издательском доме
ФГАОУ ВО «КФУ им. В.И. Вернадского»
295007, г. Симферополь, бул. Ленина, 5/7
E-mail: print@cfuv.ru