

УДК 550.348.435

## ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

*Вольфман Ю. М., Колесникова Е. Я.*

*Институт сейсмологии и геодинамики ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет имени В. И. Вернадского», Симферополь, Республика Крым, Россия.  
E-mail: seism.volf@gmail.com*

Выполнен анализ изменения во времени кинематических обстановок в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон Крымско-Черноморского региона. На примерах отдельных очагов и групп землетрясений показаны кратковременные инверсионные изменения кинематических обстановок сейсмогенеза двух типов. В первом случае сжатие сменяется растяжением в том же направлении (и наоборот). Во втором случае одна из осей главных напряжений, которая определяет тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет свое направление на перпендикулярное к ее первоначальному положению. Установлены пространственно-кинематические параметры сейсмических разрывов, а также общие закономерности их образования в условиях воздействия инверсионных полей напряжений.

**Ключевые слова:** инверсии полей напряжений, сейсмогенез, оси главных напряжений, фокальные механизмы землетрясений, кинематические обстановки.

### ВВЕДЕНИЕ

Возможность непосредственного и прямого изучения характера изменений структурообразующих полей напряжений в масштабе реального времени предоставляют сейсмологические материалы, а именно – решения механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах структурно выраженных или относительно компактных сейсмоактивных областей. Получаемые при этом данные о точном времени и пространственных координатах регистрируемых событий позволяют анализировать последовательность современных (то есть, весьма кратковременных в геохронологическом отношении) вариаций напряженно-деформированного состояния земной коры, устанавливаемых путем сопоставления параметров тензоров напряжений в очагах землетрясений.

В ряде работ неоднократно отмечалась высокая степень пространственно-временной изменчивости обстановок сейсмогенеза как для сейсмоактивных областей или поясов в целом, так и для рядов последовательных событий, локализованных в ограниченных сегментах земной коры [1–4 и мн. др.], что является свидетельством геодинамической неустойчивости регионов. Так, в результате анализа механизмов очагов землетрясений, локализованных в пределах Евразии и ее окраин, установлено, что из 330 событий 194 очага характеризуются субмеридиональным, 51 – субширотным и 85 – диагональным сжатием [1]. Одним

# ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

---

из достоверно установленных фактов вариативности сейсмогенерирующих полей напряжений в локальном объеме земной коры является рой Газлийских землетрясений 1976–1984 годов, в очагах которых происходила переориентировка тензора напряжений, отражающая изменение кинематических обстановок в очагах от юго-юго-западного (8.04.1976 г.) до северо-северо-западного (17.05.1976 г.) и восточно-юго-восточного (19.03.1984 г.) сжатия [5]. В качестве еще одного примера можно привести противоположный характер ориентировок тензора напряжений, который установлен в решениях механизмов очагов землетрясений, произошедших в центре древнейшего массива консолидированной земной коры – Украинского щита, в г. Кривой Рог (Украина). В последнее время здесь произошло три ощутимых землетрясения, для двух из которых (25.12.2007 г. и 23.06.2013 г.) получены решения механизмов очагов [6, 7]. Установлено, что оба очага реализовались в условиях взбросо-сдвигового режима, но в противоположных кинематических обстановках – субширотного (25.12.2007 г.) и субмеридионального (23.06.2013 г.) сжатия. Приведенные примеры далеко не исчерпывают всех проявлений геодинамической неустойчивости регионов, получивших отражение в изменениях параметров фокальных механизмов землетрясений.

Целью данной работы является исследование пространственно-временных особенностей изменения кинематических обстановок сейсмогенеза в пределах Южнобережной и Туапсинско-Анапской зон Крымско-Черноморского региона. Основу анализа составили данные о параметрах решений механизмов очагов землетрясений этих зон, приведенные в региональном каталоге механизмов очагов землетрясений [8].

## 1. ИНВЕРСИИ КИНЕМАТИЧЕСКИХ ОБСТАНОВОК СЕЙСМОГЕНЕЗА

Одним из проявлений геодинамической неустойчивости сейсмоактивных регионов являются *инверсии* сейсмогенерирующих полей напряжений (от лат. *inversio* – «переворачивание, перестановка»). Они находят отражение в решениях механизмов очагов землетрясений, сформировавшихся в противоположных кинематических обстановках в течение коротких временных интервалов как непосредственно друг за другом, так и безотносительно к хронологической последовательности их возникновения.

Наличие инверсий в Крымско-Черноморском регионе устанавливается в случаях, отражающих два вида специфических соотношений очаговых параметров (рис. 1):

- когда вследствие изменения кинематической обстановки на противоположную (например, сжатие сменяется растяжением в том же направлении) происходит замена взбросового режима на сбросовый: при этом положение оси  $P$ , определяющей направление сжатия, занимает ось  $T$ , указывая на растяжение в том же направлении (и наоборот); примеры пар фокальных механизмов, характеризующихся подобными соотношениями значений параметров, приведены на рисунке 1 (*a-b* и *в-г*);

- когда происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что та из осей главных напряжений, которая определяет тип

кинематической обстановки (сжатия или растяжения), меняет свое направление приблизительно под прямым углом к ее первоначальному положению (примеры подобных пар фокальных механизмов – на рисунке 1 (*д-е* и *жс-з*));

Частным случаем инверсий второго вида являются очаги сдвигового типа, в которых оси *P* и *T* взаимно меняются местами. В Крымско-Черноморском регионе данный вид инверсий не установлен, поскольку все сдвиговые очаги здесь формировались только в обстановках субширотного сжатия–субмеридионального растяжения [8]. Но результаты анализа фокальных механизмов землетрясений в пределах иных сегментов Средиземноморского пояса свидетельствуют о возможности и таких инверсионных превращений [9].

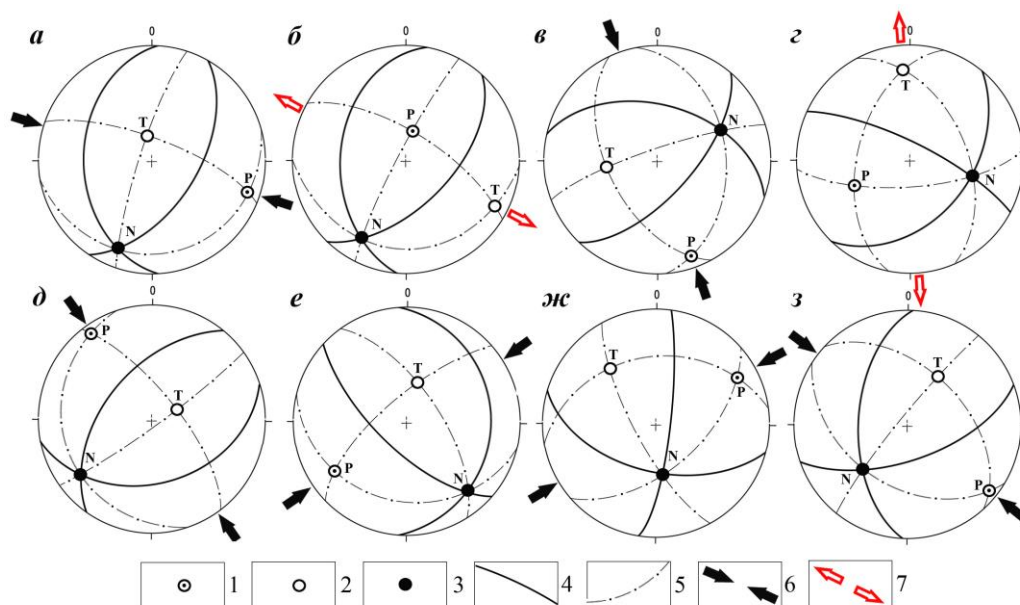


Рис. 1. Отражение инверсий кинематических обстановок в решениях механизмов очагов землетрясений: *a-г* – инверсий 1-го вида в парах очагов №39 (09.12.2013) (*a*) и №40 (02.03.2014) (*б*); №35 (30.01.2012) (*в*) и №36 (10.12.2012) (*г*); *д-з* – инверсий 2-го вида в парах очагов №2 (12.07.1966) (*д*) и №10 (03.09.1978) (*е*); №20 (22.11.1996) (*жс*) и №23 (02.06.1999) (*з*); номера очагов – по каталогу [8, табл. 1]. Условные обозначения: 1–3 – проекции осей главных напряжений: максимального сжатия – минимального растяжения (1), максимального растяжения – минимального сжатия (2), промежуточной (3); 4 – проекции нодальных плоскостей; 5 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений; 6 – направления сжатия; 7 – направления растяжения.

Особенности изменений во времени напряжённо-деформированного состояния земной коры и, соответственно, кинематических обстановок сейсмогенеза наглядно отражает сравнительная хронограмма ориентировок напряжений, обусловивших

## ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

формирование очагов землетрясений разных типов в пределах Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон (рис. 2). Она же позволяет отследить пары или группы близких (по времени их реализации) событий, в которых проявился инверсионный характер структурообразующих полей напряжений.

1. Наличие *инверсий I-го вида* отражают фокальные механизмы землетрясений, последовательно сформировавшиеся в противоположных обстановках и характеризующихся разными типами деформационного режима. Одна из таких пар представлена решениями механизмов очагов землетрясений №39 (09.12.2013)<sup>1</sup> и №40 (02.03.2014), соответственно, взбросового и сбросового типа, которые локализованы в пределах Южнобережной зоны (рис. 1 *a, б*, рис. 2). В течение 4-х месяцев, составивших временной интервал между этими событиями, произошла полная инверсия кинематической обстановки: восточно-юго-восточное сжатие сменилось растяжением практически в том же направлении (различие составляет 9°), вследствие чего оси *P* и *T* поменялись местами, а нодальные плоскости, имея близкие элементы залегания, в первом случае реализовались как взброс и надвиг, во втором – как сбросы.

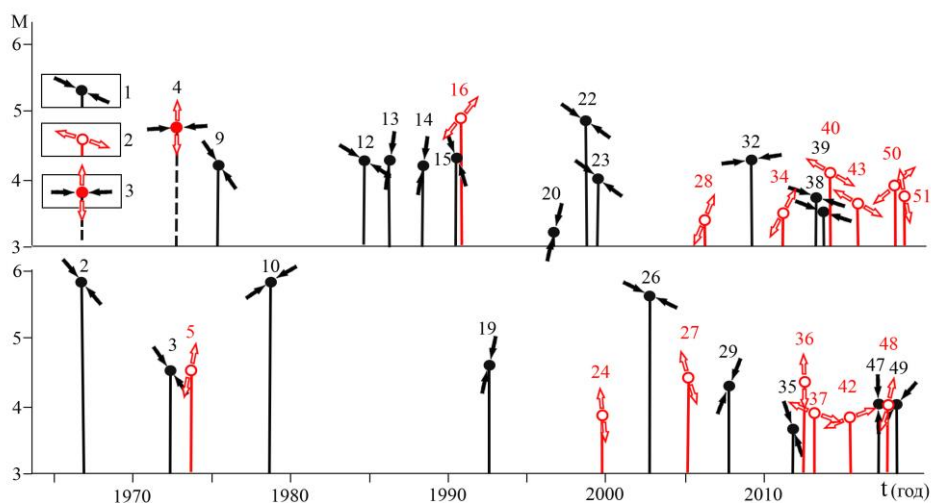


Рис. 2. Сравнительная хронограмма изменения кинематических обстановок сейсмогенеза в пределах Южнобережной (верхний ряд) и Туапсинско-Анапской (нижний ряд) зон. Условные обозначения: 1 – очаги, сформировавшиеся в обстановках сжатия; 2 – очаги, сформировавшиеся в обстановках растяжения; 3 – очаги сдвигового типа (обстановки субширотного сжатия–субмеридионального растяжения). Цифры – номера очагов сжатия (черные) и растяжения (красные) в каталоге (по [8]); стрелки – направления сжатия (черные) и растяжения (красные).

<sup>1</sup> Чтобы облегчить восприятие материала, здесь и далее приводятся номера очагов и в скобках – дата землетрясения (из регионального каталога механизмов очагов землетрясений Крымско-Черноморского региона [8]).

Отметим, что аналогичная №40 кинематическая обстановка (рис. 2) идентифицирована и в очаге землетрясения №43 (13.05.2016). А вот последующее событие – №50 (09.09.2018) в пределах Южнобережной зоны отражает инверсию 2-го вида, поскольку направление растяжения в очаге изменилось приблизительно на  $110^\circ$ , то есть стало почти перпендикулярным по отношению к предыдущему.

Сопоставление значений параметров фокальных механизмов второй пары землетрясений – №35 (30.01.2012) и №36 (10.12.2012), произошедших в Туапсинско-Анапской зоне, также отражает наличие инверсии 1-го вида: обстановка субмеридионального сжатия в течение нескольких месяцев (менее одного года) сменилась растяжением, действующим приблизительно в том же направлении. Первый из этих фокальных механизмов (рис. 1 в) характеризуется взбросовым деформационным режимом, обусловленным воздействием первичного поля напряжений, тогда как в условиях растяжения процесс разрывообразования реализовался в трансформированном поле, вследствие чего был сформирован очаг сбросо-сдвигового типа (рис. 1 г).

Эту последовательность инверсионных преобразований в той или иной мере могут продолжить последующие события, произошедшие в этом же районе (рис. 2). Так, к моменту возникновения землетрясений сбросового типа №37 (01.05.2013, то есть через полгода после №36, 10.12.2012) и №42 (16.08.2015) в результате инверсии 2-го вида обстановки растяжения изменили направление с субмеридионального на субширотное. Спустя еще два года в очаге №47 (22.07.2017) доминировало меридиональное сжатие, которое к моменту следующего события сменилось субмеридиональным растяжением, реализованном в фокальном механизме №48 (31.01.2018) сбросо-сдвигового типа. Таким образом, временной интервал между событиями, характеризующими близкие кинематические обстановки (с одной стороны, субмеридиональное сжатие в очагах №№35, 47, с другой – растяжение в том же направлении №№36, 48), составляет 5–6 лет. При этом инверсии кинематических обстановок сейсмогенеза проявляются как в первичных, так и во вторичных, трансформированных полях напряжений.

2. В результате *инверсии кинематических обстановок 2-го вида* в очагах землетрясений, произошедших последовательно в течение коротких временных интервалов, происходит разворот тензора напряжений поля таким образом, что направление сжатия меняется на перпендикулярное по отношению к его первоначальному положению. Это иллюстрируют фокальные механизмы землетрясений взбросового и взбросо-сдвигового типов №№2, 3, 10 в пределах Туапсинско-Анапской зоны и №№20, 22, 23 – в Южнобережной зоне (рис. 2).

В первом случае полный период инверсионных преобразований охватывает почти 12 лет – с момента землетрясения №2 (12.06.1966) с  $M_w=5.8$  (рис. 1 д) до события №10 (03.09.1978) также с  $M_w=5.8$  (рис. 1 е). Оба очага характеризуются взбросовым деформационным режимом, но первый из них формировался в обстановке юго-восточного–северо-западного сжатия (ориентировка оси  $P=325^\circ$ ), тогда как возникновение второго было обусловлено воздействием сжимающих напряжений юго-западного–северо-восточного направления ( $P=236^\circ$ ), то есть, почти под прямым углом ( $89^\circ$ ) к первоначальному положению тензора напряжений.

## ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

---

Период между этими событиями характеризуется существенными изменениями напряжённо-деформированного состояния земной коры (рис. 2). Так, в течение первых 6-ти лет (с августа 1966 г. по август 1972 г.) отмечается относительно слабая трансформация тензора напряжений (при неизменной ориентировке оси сжатия, равной  $325^\circ$ ), которая предопределила взбросо-сдвиговый тип фокального механизма землетрясения №3 (22.07.1972). В последующие полгода кинематическая ситуация претерпела кардинальные изменения, вследствие которых обстановка юго-восточного–северо-западного сжатия сменилась субмеридиональным растяжением, обусловившим формирование очага взбросо-сбросового типа №5 (20.02.1973). И только после этого перестройка структурного плана завершилась реализацией землетрясения №10 (03.09.1978), фокальный механизм которого отражает окончание инверсионного цикла преобразований кинематических обстановок. Следует отметить, что магнитуды землетрясений №2 (12.06.1966) и №10 (03.09.1978), знаменующих начало и окончание данного цикла и сформировавшихся под воздействием первичных полей напряжений, существенно выше ( $M_w=5.8$ ), чем магнитуды землетрясений №3 (22.07.1972) и №5 (20.02.1973), обусловленных трансформированными системами напряжений ( $M_w=4.5$ ).

Вполне явственно инверсия кинематических обстановок 2-го вида проявилась и в фокальных механизмах землетрясений №№20, 22 и 23 Южнобережной зоны, произошедших последовательно друг за другом в течение относительно короткого (менее 3-х лет) временного интервала (рис. 2). В данном случае кинематическая обстановка юго-западного–северо-восточного сжатия в очаге №20 (22.11.1996), где ориентировка оси составляет  $P=61^\circ$  (рис. 1 *ж*), в конечном итоге, в очагах №22 (22.11.1996) и 23 (02.06.1999) сменилась сжатием в юго-восточном–северо-западном направлении (рис. 1 *д*), отражая разворот тензора напряжений на  $63^\circ$ – $68^\circ$ . Тот факт, что инверсия здесь выражена не в полной мере (направления сжатия этих обстановок не являются строго перпендикулярными по отношению друг к другу) обусловлен тем обстоятельством, что все рассматриваемые очаги, во-первых, формировались в трансформированных полях напряжений, и, во-вторых, имеют относительно низкие магнитуды ( $M_w=3.2\div 4.9$ ).

Хронологическая последовательность изменения обстановок сейсмогенеза здесь определяется следующим образом: основная инверсия поля напряжений произошла в течение первых 2-х лет – в период между землетрясениями №20 (22.11.1996) и №22 (18.10.1998), поскольку именно тогда юго-западное–северо-восточное сжатие сменилось юго-восточным–северо-западным (рис. 2). Процесс довершает событие №23 (02.06.1999), параметры очага которого указывают на дальнейший разворот тензора напряжений как по отношению к сторонам света, так и относительно оси  $P$ .

Столь подробное описание кратковременных инверсионных изменений кинематических обстановок сейсмогенеза обусловлено тем обстоятельством, что данный аспект до сих пор практически не получил отражения в научной литературе с указанием конкретных примеров и их детальным анализом, основанном на прямых признаках этих изменений, каковыми являются фокальные механизмы землетрясений.

Таким образом, приведенная хронограмма ориентировок напряжений в очагах землетрясений Южнобережной и Туапсинско-Анапской зон (рис. 2) отражает многообразие и быструю сменяемость кинематических обстановок регионального сейсмогенеза, свидетельствуя о гетерогенном характере и сложном строении этих зон, что не позволяет обосновать их принадлежность к какому-либо одному типу сейсмогенеза. Хронограмма также указывает на несостоятельность геодинамического сценария [10-14 и др.], согласно которому основным фактором современного развития региона являются процессы поддвига Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров и под сооружения Большого Кавказа. Более того, из хронограммы следует, что в течение последнего времени в регионе доминировали обстановки не сжатия, а разнонаправленного растяжения, наиболее значимым проявлением которых является катастрофическое Крымское землетрясение 11 сентября 1927 года.

## 2. СИСТЕМНЫЙ ХАРАКТЕР СЕЙСМОГЕННОГО РАЗРЫВООБРАЗОВАНИЯ

Наиболее концентрированным отражением инверсий кинематических обстановок являются квазимодели регионального сейсмогенеза [8], характеризующие особенности сжимающих и растягивающих напряжений, попеременно действующих в одном направлении. Алгоритм данного анализа предполагает попарное совмещение на стереограммах и на разрезах (ориентированных вдоль направления действия осей сжатия и растяжения, то есть перпендикулярно к промежуточной оси  $N$ ), элементов квазимodelей взбросового и сбросового типов – проекций осей  $P$  и  $T$ , проекций нодальных плоскостей, аппроксимирующих противоположные обстановки (рис. 3).

Основные результаты этого анализа сводятся к следующему:

1. На стереограммах, где совмещены квазимодели взбросового и сбросового типов для противоположных обстановок, нодальные плоскости (идентифицируемые, соответственно, как взбросы или надвиги и сбросы) имеют близкие значения параметров, а проекции осей  $P$  и  $T$ , обусловивших условия сжатия или растяжения, меняются местами, располагаясь вблизи внешнего круга стереограмм (рис. 3 *а, в, д, ж*).

2. На разрезах проекции нодальных плоскостей, в структурно-кинематическом отношении являющихся антиподами (взбросами или надвигами, сформировавшимися в обстановках сжатия, и сбросами, обусловленными условиями растяжения), также весьма близки: разница в углах падения разрывов, имеющих наклон в одном направлении, составляет от  $1-3^\circ$  до  $12-14^\circ$  (рис. 3 *б, г, з*). Исключение составляет разрез, на котором сопоставляются параметры квазимodelей северо-западного-юго-восточного сжатия и растяжения, где угловая величина этих секторов увеличивается до  $16-18^\circ$  (рис. 3 *е*). При этом разница между биссектрисами секторов попарного размещения проекций осей  $P$  и  $T$  или нодальных плоскостей варьирует в пределах  $(45\pm 3)^\circ$ , лишь в одном случае (рис. 3 *г*) увеличиваясь до  $(45\pm 10)^\circ$ . Следует отметить, что на представленных разрезах положение нодальных плоскостей не является перпендикулярным к плоскости разреза, вследствие чего углы наклона их проекций на разрезах отличаются от

# ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

истинных в меньшую сторону; однако эта разница не превышает 5%.

3. Процессы регионального сейсмогенеза, в основном, обусловлены доминирующим влиянием тангенциальных полей главных напряжений, на что указывают незначительные углы наклона осей  $P$  и  $T$  в квазиמודелях сжатия и растяжения. Вследствие этого, в условиях инверсионных обстановок теоретически наиболее предпочтительными для возникновения сейсмогенных разрывов взбросового и сбросового типов являются одни и те же сегменты (сектора) разрезов в земной коре, имеющие наклоны под углами  $(45 \pm 10)^\circ$  к горизонтальной поверхности и отвечающие положению плоскостей максимальных касательных напряжений.

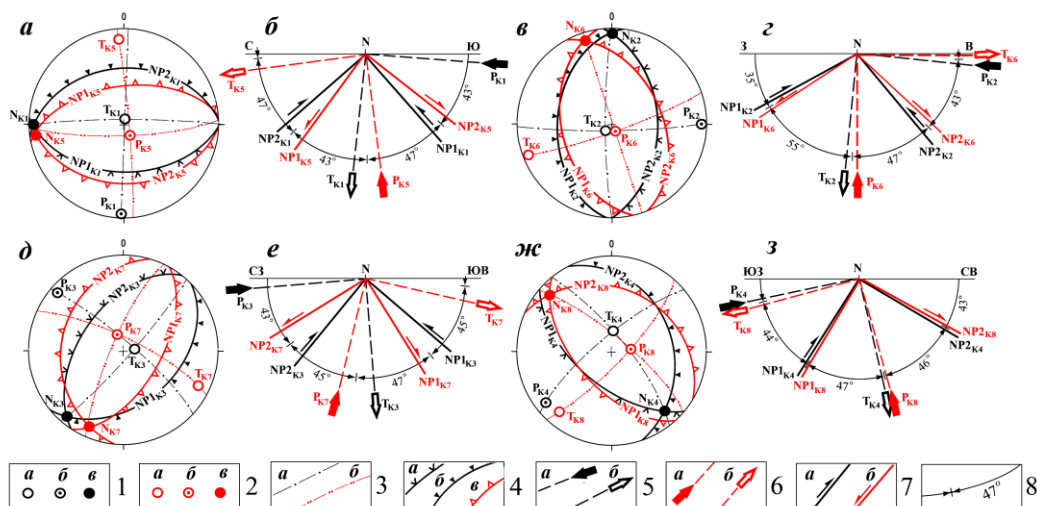


Рис. 3. Соотношение (на стереограммах и разрезах) проекций осей главных напряжений и нодальных плоскостей в квазиמודелях сейсмогенеза взбросового и сбросового типов, отражающих обстановки сжатия и растяжения в направлениях: **а**, **б** – субмеридиональном; **в**, **г** – субширотном; **д**, **е** – юго-восточном–северо-западном; **ж**, **з** – юго-западном–северо-восточном. *Условные обозначения.* На стереограммах: 1 – проекции осей главных напряжений в квазиמודелях обстановок сжатия (**а** – ось  $P$ , **б** – ось  $T$ , **в** – ось  $N$ ); 2 – то же самое – в квазиמודелях обстановок растяжения; 3 – проекции плоскостей размещения осей главных напряжений (**а** – в квазиמודелях сжатия, **б** – в квазиמודелях растяжения); 4 – проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика: взбросы (**а**), надвиги (**б**), сбросы (**в**). На разрезах: 5 – проекции осей напряжений в квазиמודелях сжатия (**а** – ось  $P$ , **б** – ось  $T$ ); 6 – то же самое – в квазиמודелях растяжения (**а** – ось  $P$ , **б** – ось  $T$ ); 7 – проекции нодальных плоскостей и их структурно-кинематическая характеристика: взбросы, надвиги (**а**), сбросы (**б**), стрелки указывают направления перемещения; 8 – величина угла между серединами секторов, образуемых сближенными проекциями осей напряжений и нодальных плоскостей.



Данное обстоятельство предопределяет основные особенности деформирования геологической среды в условиях горизонтального сжатия и растяжения, попеременно действующих в одном направлении: в обоих случаях образуются (активизируются) преимущественно плоскости одних и тех же систем разрывов, при этом в обстановках сжатия они проявляются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения (рис. 3). Реальная же картина разрывообразования в очагах землетрясений может выглядеть несколько сложнее. В работах [8, 9, 15] отмечено, что согласно теории прочности Ш. Кулона–А. Навье–О. Мора, образование сколовых разрывов зачастую происходит под углом, не равным  $45^\circ$  к направлению действия осей нормальных напряжений, а с отклонением их в сторону оси максимального сжатия. В результате сейсмогенные разрывы, обусловленные обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые падения (под углами  $\geq 45^\circ$  к земной поверхности), в то время как разрывы, образующиеся в обстановках сжатия, будут представлены преимущественно надвигами с углами падения  $\leq 45^\circ$ .

## ВЫВОДЫ

Инверсии полей напряжений, как одно из проявлений геодинамической нестабильности сейсмоактивных регионов, находят отражение в решениях механизмов очагов землетрясений. Последние вполне адекватно характеризуют кинематические обстановки, существовавшие в момент возникновения того или иного сейсмического события, что позволяет отнести их к прямым критериям при идентификации обстановок, обусловивших процессы сейсмогенеза. В пределах основных сейсмогенных зон Крымско-Черноморского региона – Южнобережной и Туапсинско-Анапской, по соотношениям параметров фокальных механизмов землетрясений, сформировавшихся в течение коротких временных интервалов в противоположных кинематических обстановках, обосновано два вида инверсий. Первый из них отражает процесс изменения кинематической обстановки на противоположную, например, когда сжатие сменяется растяжением в том же направлении с заменой взбросового деформационного режима сбросовым (и наоборот). Во втором случае происходит изменение ориентировки тензора напряжений таким образом, что ось главных напряжений, определяющая тип кинематической обстановки (например, сжатия), меняет свое направление на перпендикулярное к ее первоначальному положению. При этом инверсии полей напряжений в пределах Южнобережной и Туапсинско-Анапской сейсмогенных зон происходят не синхронно, различаются длительностью инверсионных циклов, что свидетельствует о локальном характере влияния геодинамических факторов, обусловивших эти процессы.

Инверсионный характер полей напряжений предопределил закономерности сейсмогенного разрывообразования в регионе, установленные по соотношению параметров квазимоделей сейсмогенеза, аппроксимирующих противоположные кинематические обстановки. В условиях воздействия инверсионных первичных полей напряжений теоретически наиболее предпочтительными для возникновения

## ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

---

сейсмогенных разрывов являются одни и те же сегменты (сектора) земной коры, соответствующие направлениям действия максимальных касательных напряжений. При этом в обстановках сжатия сейсмогенные разрывы реализуются в виде взбросов и надвигов, при наличии растяжения – как сбросовые нарушения. Однако с учетом наличия внутреннего трения в горном массиве, реальная картина разрывообразования в очагах может оказаться более сложной: разрывы, формирование которых обусловлено обстановками растяжения (сбросы), могут иметь более крутые углы падения, в то время как часть разрывов, образующиеся в обстановках сжатия, будет представлена относительно пологими надвигами.

Многообразие кинематических обстановок, идентифицированных в очагах Южнобережной и Туапсинско-Анапской зон, отражает гетерогенный характер этих зон, не позволяя обосновать их принадлежность к какому-либо одному типу сейсмогенеза. При этом обстановки сжатия не играли той доминирующей роли, которая им отводится в представлениях о перманентном поддвиге Восточно-Черноморской плиты под Крымский полуостров и сооружения Большого Кавказа. Более того, в регионе многократно проявлялись кинематические обстановки разнонаправленного растяжения, землетрясения которых ни в количественном, ни в энергетическом отношении не уступают таковым, обусловленным обстановками сжатия.

### Список литературы

1. Гущенко О. И. Реконструкция поля мегарегиональных тектонических напряжений сейсмоактивных областей Евразии. Поля напряжений и деформаций в литосфере. М.: Наука, 1979. С. 26–51.
2. Юнга С. Л. Сеймотектонические деформации и напряжения в складчатых поясах неотектонической активизации Северной Евразии // Физика Земли. 1996. № 12. С. 37–58.
3. Широкова Е. И. Общие закономерности в ориентации главных напряжений в очагах землетрясений Средиземноморско-Азиатского сейсмического пояса // Физика Земли. 1967. № 16. С. 22–36.
4. Степаненко Н. Я., Симонова Н. А., Карданец В. Ю. Пространственные вариации осей главных напряжений в очагах землетрясений области Вранча. Сейсмологический бюллетень Украины за 2012 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2013. С. 46–56.
5. Шебалин Н. В., Ибрагимов Р. Н., Чернов Ю. К. и др. Газлийские землетрясения 1976 и 1984 гг. /Ред. В. И. Уломов, И. В. Шебалин, С. С. Арэфьев, Г. Ю. Азимов, Р. П. Федина. Ташкент: Фан, 1986. 368 с.
6. Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Капитанова С. А. Процессы в очаговой зоне Криворожского землетрясения 25 декабря 2007 г. Сейсмологический бюллетень Украины за 2007 год. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2009. С. 17–22.
7. Пустовитенко Б. Г., Пустовитенко А. А., Мержей Е. А. Процессы в очаговой зоне Криворожского-III землетрясения 23 июня 2013 г. (Украина). Сейсмологический бюллетень Украины за 2013 г. Севастополь: НПЦ «ЭКОСИ-Гидрофизика», 2014. С. 54–60.
8. Вольфман Ю. М., Пустовитенко Б. Г., Колесникова Е. Я. Новые результаты тектонофизического анализа фокальных механизмов землетрясений Крымско-Черноморского региона // Ученые записки Крымского федерального университета имени В. И. Вернадского. География. Геология. 2022. Т. 8(74). №4. С. 162–206.
9. 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.

10. Борисенко Л. С., Плахотный Л. Г. Геодинамика Крымско-Черноморского региона как следствие многоуровневого тектогенеза. Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Симферополь: Институт геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. 1997. С. 54–64.
11. Казанцев Ю. В. Тектоника Крыма. М.: Наука. 1982. 112 с.
12. Юдин В. В. Геодинамика Крыма. Симферополь: Национальная академия природоохранного и курортного строительства, ДИАЙПИ, 2011. 336 с.
13. Юдин В. В., Герасимов М. Е. Геодинамическая модель Крымско-Черноморского и прилегающих регионов. Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. 1997. С. 16–23.
14. Дискуссия по концептуальным вопросам геодинамики Крымско-Черноморского района. Геодинамика Крымско-Черноморского региона. Симферополь: Ин-т геофизики НАНУ, Крымский экспертный совет. 1997. С. 135–148.
15. Гинтов О. Б. Полевая тектонофизика и ее применение при изучении деформаций земной коры Украины. Киев: «Феникс», 2005. 572 с.

### INVERSIONS OF SEISMOGENERATING STRESS FIELDS AS A MANIFESTATION OF GEODYNAMIC INSTABILITY OF THE CRIMEAN-BLACK SEA REGION

*Volfman Yu. M., Kolesnikova E. Ya.*

*Institute of seismology and geodynamics of the V.I. Vernadsky Crimean Federal University,  
Simferopol, Republic of Crimea, Russia. E-mail: seism.volf@gmail.com*

The analysis of changes in time of kinematic conditions in earthquake foci of the South-Coast and Tuapse-Anapa seismogenic zones of the Crimean-Black Sea region is carried out. Short-term inversion changes of kinematic conditions of two types of seismogenesis are shown using examples of individual foci and groups of earthquakes. In the first case, compression is replaced by stretching in the same direction (and vice versa). In the second case, one of the axes of the main stresses, which determines the type of kinematic situation (for example, compression), changes its direction to perpendicular to its original position. The spatial and kinematic parameters of seismic discontinuities, as well as the general patterns of their formation under the influence of inversion stress fields, are established.

**Key words:** inversions of stress fields, seismogenesis, axes of main stresses, focal mechanisms of earthquakes, kinematic situations.

### References

1. Gushchenko O. I. Rekonstrukciya polya megaregional'nyh tektonicheskikh napryazhenij sejsmoaktivnyh oblastej Evrazii. Polya napryazhenij i deformacij v litosfere (Reconstruction of the field of megaregional tectonic stresses in seismically active regions of Eurasia. Stress and strain fields in the lithosphere). Moscow: Nauka, 1979, pp. 26–51 (in Russian).
2. Yunga S. L. Sejsmotektonicheskie deformacii i napryazheniya v skladchatykh poyasakh neotektonicheskoy aktivizacii Severnoj Evrazii (Seismotectonic deformations and stresses in folded belts of neotectonic activation in Northern Eurasia). Fizika Zemli. 1996, no. 12, pp. 37–58 (in Russian).
3. Shirokova E. I. Obshchie zakonomernosti v orientacii glavnyh napryazhenij v ochagah zemletryasenij Sredizemnomorsko-Aziatskogo sejsmicheskogo poyasa (General Regularities in the Orientation of Principal Stresses in Earthquake Foci in the Mediterranean-Asian Seismic Belt). Fizika Zemli. 1967, no. 16, pp. 22–36 (in Russian).
4. Stepanenko N. YA., Simonova N. A., Kardanev V. YU. Prostranstvennye variacii osey glavnyh napryazhenij v ochagah zemletryasenij oblasti Vrancha. Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2012 g. (Spatial variations of the principal stress axes in earthquake sources in the Vrancea region. Seismological Bulletin of Ukraine for 2012) Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2013, pp. 46–56 (in Russian).

ИНВЕРСИИ СЕЙСМОГЕНЕРИРУЮЩИХ ПОЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЙ  
КАК ПРОЯВЛЕНИЕ ГЕОДИНАМИЧЕСКОЙ НЕСТАБИЛЬНОСТИ  
КРЫМСКО-ЧЕРНОМОРСКОГО РЕГИОНА

---

5. Shebalin N. V., Ibragimov R. N., Chernov YU. K. i dr. Gazlijskie zemletryaseniya 1976 i 1984 gg. /Red. V. I. Ulomov, I. V. Shebalin, S. S. Aref'ev, G. Yu. Azimov, R. P. Fedina (Ghazli earthquakes of 1976 and 1984 /Ed. V. I. Ulomov, I. V. Shebalin, S. S. Arefiev, G. Yu. Azimov, R. P. Fedina). Tashkent: Fan, 1986, pp. 368 (in Russian).
6. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Kapitanova S. A. Processy v ochagovoj zone Krivorozhskogo zemletryaseniya 25 dekabrya 2007 g. Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2007 god (Processes in the source zone of the Krivoy Rog earthquake on December 25, 2007. Seismological Bulletin of Ukraine for 2007). Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2009, pp. 17–22 (in Russian).
7. Pustovitenko B. G., Pustovitenko A. A., Merzhej E. A. Processy v ochagovoj zone Krivorozhskogo-III zemletryaseniya 23 iyunya 2013 g. (Ukraina). Sejsmologicheskij byulleten' Ukrainy za 2013 g. (Processes in the source zone of the Krivoy Rog-III earthquake on June 23, 2013 (Ukraine). Seismological Bulletin of Ukraine for 2013). Sevastopol': NPC «EKOSI-Gidrofizika», 2014, pp. 54–60 (in Russian).
8. Vol'fman Yu. M., Pustovitenko B. G., Kolesnikova E. YA. Novye rezul'taty tektonofizicheskogo analiza fokal'nyh mekhanizmov zemletryasenij Krymsko-CHernomorskogo regiona (New results of tectonophysical analysis of focal mechanisms of earthquakes in the Crimean-Black Sea region). Uchenye zapiski Krymskogo federal'nogo universiteta im. V. I. Vernadskogo. Geografiya. Geologiya. 2022, Vol. 8(74), no. 4, pp. 162–206 (in Russian).
9. Vol'fman Yu. M. Strukturno-kinematischeckaya identifikaciya sejsmogennyh zon sistemy Zagrosa (po dannym reshenij mekhanizmov ochagov zemletryasenij) (Structural-kinematic identification of seismogenic zones of the Zagros system (according to the solutions of earthquake source mechanisms)) Geofizicheskij zhurnal. 2013, V. 35, no. 2, pp. 38–64 (in Russian).
10. Borisenko L. S., Plahotnyj L. G. Geodinamika Krymsko-CHernomorskogo regiona kak sledstvie mnogourovnenogo tektogeneza. Geodinamika Krymsko-CHernomorskogo regiona (Geodynamics of the Crimean-Black Sea region as a result of multilevel tectogenesis. Geodynamics of the Crimean-Black Sea region). Simferopol': Institut geofiziki NANU, Krymskij ekspertnyj sovet. 1997, pp. 54–64 (in Russian).
11. Kazancev Yu. V. Tektonika Kryma (Tectonics of Crimea). Moscow: Nauka, 1982, 112 p. (in Russian).
12. Yudin V. V. Geodinamika Kryma (Geodynamics of Crimea). Simferopol': Nacional'naya akademiya prirodohrannogo i kurortnogo stroitel'stva, DIAJPI, 2011, 336 p.
13. Yudin V. V., Gerasimov M. E. Geodinamichesckaya model' Krymsko-CHernomorskogo i prilegayushchih regionov. Geodinamika Krymsko-CHernomorskogo regiona (Geodynamic model of the Crimean-Black Sea and adjacent regions. Geodynamics of the Crimean-Black Sea region). Simferopol': Institut geofiziki NANU, Krymskij ekspertnyj sovet. 1997, pp. 16–23 (in Russian).
14. Diskussiya po konceptual'nym voprosam geodinamiki Krymsko-CHernomorskogo rajona Geodinamika Krymsko-CHernomorskogo regiona (Discussion on conceptual issues of geodynamics of the Crimean-Black Sea region Geodynamics of the Crimean-Black Sea region). Simferopol': Institut geofiziki NANU, Krymskij ekspertnyj sovet. 1997, pp. 135–148 (in Russian).
15. Gintov O. B. Polevaya tektonofizika i ee primenenie pri izuchenii deformacij zemnoj kory Ukrainy (Field tectonophysics and its application in the study of deformations of the earth's crust of Ukraine). Kiev: «Feniks», 2005, 572 p. (in Russian).