

УДК 550.348(511.66)

ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ МЕХАНИЗМОВ ОЧАГОВ СЕЙСМОАКТИВНЫХ РЕГИОНОВ КАЗАХСТАНА

¹⁾Михайлова Н.Н., ²⁾Полешко Н.Н.

¹⁾*Институт геофизических исследований НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан*

²⁾*ГУ «Сейсмологическая опытно-методическая экспедиция» Министерства образования и науки РК, Алматы*

Проведено исследование изменений параметров механизмов очагов для сейсмоактивных территорий Казахстана и приграничных районов, выявлены особенности временного хода параметров, связанные с процессами формирования сильных землетрясений.

ВВЕДЕНИЕ

В последние десятилетия существенно увеличилось количество определений механизмов очагов землетрясений на территориях Казахстана и приграничных с ним государств. Повысилась точность определений в связи с вводом в действие новых цифровых сейсмических станций и переходом на компьютерную обработку данных. Но до последнего времени результатами анализа информации о механизмах очагов отдельных землетрясений и параметрах сейсмотектонической деформации являлись в основном характеристики напряженно-деформированного состояния, интерпретируемые с позиций тектоники района. В рассматриваемом районе Северного Тянь-Шаня практически отсутствуют детальные исследования временных изменений в параметрах механизмов, которые чрезвычайно важны для понимания геодинамических процессов в целом во всем регионе и, в частности, в зонах подготовки сильных землетрясений. Статья посвящена исследованию изменений параметров механизмов очагов для сейсмоактивных территорий Казахстана и приграничных районов за длительный период, выявлению особенностей временного хода, связанного с процессами формирования сильных землетрясений.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

В последнее десятилетие в связи с вводом в эксплуатацию новой цифровой сети станций Национального ядерного центра Республики Казахстан существенно расширились границы территории, для которой имеется возможность получения надежного решения фокальных механизмов произошедших землетрясений. Благодаря новым цифровым станциям, с 1995 г. накоплен богатый статистический материал о механизмах не только для территории Северного Тянь-Шаня, достаточно подробно изученной по данным Сейсмологической опытно-методической экспедиции МОН РК, но и для ранее неисследованных районов юга, запада и востока Казахстана.

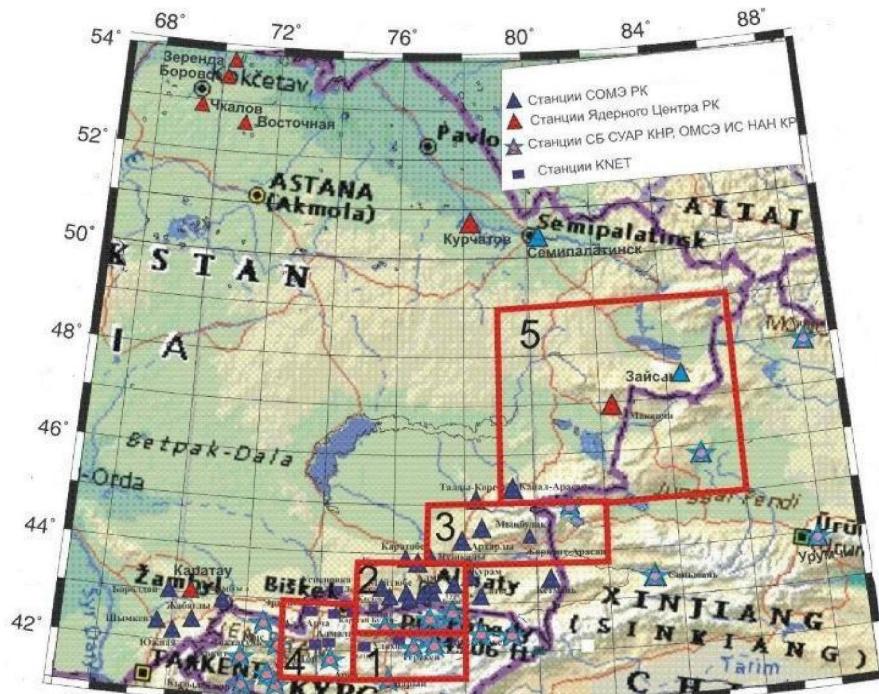
До 2000 г. в течение 30 лет все определения механизмов очагов землетрясений проводились путем ручных построений с использованием так называемой сетки Вульфа [1]. С 2000 г. решения получают машинным способом. Так, в СОМЭ МОН РК используется программа определения механизмов очага Масаки Накамуры [2], позволяющая, кроме ос-

новных параметров фокального механизма, оценивать точность вычисления параметров.

В настоящее время сводный каталог механизмов очагов содержит более 9000 событий энергетических классов диапазона 6 – 17, произошедших на значительной территории, ограниченной координатами 40° - 56° с. ш., 45° - 90° в.д. Охвачены события за период наблюдений с 1964 г. по 2005 г. Именно наличие столь большого объема данных позволяет провести анализ временных вариаций параметров сейсмотектонической деформации среды. Результаты анализа относятся к верхней части литосферы, а именно, к диапазону глубин 0 - 30 км, которому соответствуют глубины практически всех очагов землетрясений в рассмотренных районах.

В изученных зонах Тянь-Шаня (1-5), показанных на рисунке 1, наблюдается различная представительность данных о механизмах очагов, что обусловлено объективными причинами – конфигурацией и количеством сейсмических станций в наблюдательных сетях, а также самой сейсмической активностью в каждой зоне. Так, например, если в сейсмоактивных районах Северного Тянь-Шаня и Джунгарского Алатау механизмы очагов определены, начиная с седьмого энергетического класса (а в некоторых локальных зонах даже с шестого), то в Восточном Казахстане механизмы очагов определены с восьмого энергетического класса. Слабые землетрясения ($K < 9$) составляют 75% всего каталога, землетрясения средней силы ($K = 9 - 11$) – всего 22%, и только 3% всех событий имеют класс более 12. Известно, что данные по сильным землетрясениям несут наиболее надежную информацию в отношении действующей системы региональных напряжений. Однако по статистике слабых событий, как показали предыдущие исследования, можно также достаточно уверенно изучать основные закономерности картины напряженно-деформированного состояния.

Если считать представительным классом энергии землетрясений с определенными механизмами очагов тот минимальный, для которого механизмы определяются без пропуска, то в целом для исследуемого региона таким классом является $K_{min}=10$ (точнее, $K_{min}=9,6$). Поэтому в данных исследованиях проводилось сравнение результатов, полученных при статистическом анализе механизмов слабых толчков с расчетами по представительным событиям.



1 – хребет Терской Алатау; 2 – хребты Заилийский и Кунгей Алатау; 3 – хребты Джунгарского Алатау; 4 – хребты Восточного Казахстана; 5 – хребты западнее озера Иссык-Куль (условно - Карагатусская зона)

Рисунок 1. Генерализованное представление сейсмогенерирующих зон Казахстана

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

Для каждой зоны рассчитывались параметры сейсмотектонической деформации (СТД). Понятие СТД базируется на представлении о деформациях макроскопических объемов горных масс. Расчет проведен с использованием базы данных SEISMO, созданной в СОМЭ МОН РК. Для расчетов СТД использована программа Соболевой О.В., Вахидовой З.М. [3]. В результате расчетов построены графики временных вариаций для следующих параметров тензора сейсмотектонической деформации:

- коэффициент интенсивности СТД χ , отражающий соответствие среднего механизма совокупности индивидуальных. Коэффициент χ может принимать значения от 0 до 1;
- коэффициент Лоде-Надаи μ , характеризующий вид сейсмотектонической деформации (значения μ находятся в пределах от -1 до +1);
- азимут и угол выхода осей напряжений сжатия и растяжения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Вариации перечисленных выше параметров СТД рассмотрены отдельно для исследуемых сейсмотектонических зон на основе каталога фокальных механизмов с 1980 г. по 2005 г.

Изменения коэффициента интенсивности χ . Интенсивность СТД χ при значениях менее 0,2 означает, что надежность полученных решений низкая, анализ таких данных оказывается неэффективным. На рисунке 2 представлены графики временного хода значений χ за 25-летний период для пяти зон (рисунок 1) в трех энергетических диапазонах: 1 - $K \geq 9,6$; 2 - $K \leq 9,5$; 3 - $K \leq 7,5$. Там же по зонам показано измене-

ние количества сейсмических событий. За исключением небольших периодов времени рассчитанный коэффициент интенсивности имеет значения выше 0,2 для всех зон и во всех энергетических диапазонах. Из этого следует, что для анализа могут быть использованы данные каталога механизмов очагов не только сильных, но и слабых землетрясений.

Как видно из рисунка 2, значения коэффициента χ существенно меняются во времени, особенно в нижнем энергетическом диапазоне. Для событий с $K \geq 9,6$ уровень значений коэффициента выше, чем для слабых. Это может быть объяснено, с одной стороны, повышением упорядоченности процесса деформации при переходе к большим энергиям, а, с другой стороны, повышением точности определений механизмов землетрясений больших энергетических классов. Приведенные данные показывают, что существуют отличия в характере кривых для разных энергетических диапазонов. Для зон хр. Терской Алатау, Джунгарский Алатау, Карагатусской графики χ разных энергетических диапазонов смешены по фазе, в некоторые периоды времени находятся даже в противофазе. В зонах хр. Заилийский и Кунгей Алатау вариации параметра χ всегда синхронны как для слабых, так и для сильных землетрясений. Следует отметить, что в периоды наблюдаемого снижения значений коэффициента χ представительность исследуемых данных надежна, количество данных достаточное. В связи с этим, можно сделать вывод, что снижение значений χ вероятнее всего отражает реальную сейсмотектоническую ситуацию. Особенно четко это наблюдается для зон Карагатусской и Восточно-Казахстанской.

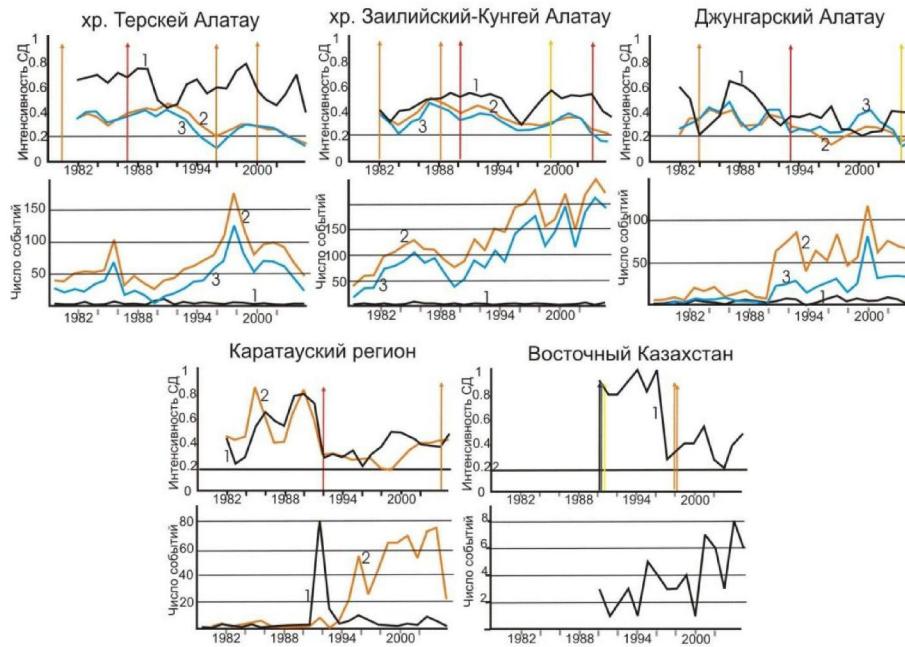


Рисунок 2. Графики временных изменений параметра χ и количества землетрясений для энергетических диапазонов: 1 – $K \geq 9,6$; 2 – $K \leq 9,5$; 3 – $K \leq 7,5$

Изменение коэффициента Лоде-Надаи μ . Коэффициент Лоде-Надаи μ анализируется совместно с коэффициентом интенсивности СТД χ . Существует определенная связь этих параметров: максимальное значение $\chi = 1$ возможно только при $\mu = 0$, что соответствует значению $\chi = 0,5$ при $\mu = \pm 1$. Для анализа все значения μ разбиты на три класса: 1 - $\mu \approx 0$ ($-0,3 \leq \mu \leq +0,3$); 2 - $\mu \approx +1$ ($\mu \geq 0,3$); 3 - $\mu \approx -1$ ($\mu \leq -0,3$). Первый класс соответствует деформированному состоянию сдвигового типа (в механическом смысле), второй – одноосному сжатию, третий – одноосному растяжению. На рисунке 3 представлены графики изменения значений коэффициента μ для исследуемых зон за период времени 1980 - 2005 гг.

Из рисунка 3 следует, что в разных энергетических диапазонах ход графиков μ неодинаков и вид деформированного состояния может существенно меняться. Для слабых землетрясений наблюдается четкая тенденция перехода от положительных значений μ к отрицательным в течение периода исследований. Тип СТД по слабым землетрясениям – преимущественно сдвиг. Для сильных землетрясений с $K \geq 9,6$ характерно преобладание одноосного сжатия ($\mu \geq \pm 0,3$) в зонах хр. Заилийского и Кунгей Алатау. Для зон Терской Алатау, Джунгарский Алатау и Карагандинской зоны значения μ находятся в области ($0 - 0,8$), что соответствует таким типам деформирования как сдвиг и одноосное сжатие.

В отдельные периоды времени графики разных энергетических диапазонов изменяются противофазно, как в зоне хр. Заилийский Кунгей- Алатау в период 1998 – 2004 гг. Для зоны Джунгарский Алатау характерны асинхронные изменения μ для слабых и сильных землетрясений в 1987 - 1991, 1995 - 1998,

1999 – 2004 гг. Обращает на себя внимание такая особенность: наиболее сильные землетрясения происходят в моменты между периодами асинхронности, когда графики μ для землетрясений разных энергетических классов сближаются и характеризуют тип деформирования как сдвиговый. В Карагандинской зоне противофазное изменение μ наблюдалось в 1993 - 1998 гг. после Суусамырского землетрясения с $M=7,4$. В момент реализации толчка отмечается сближение временных графиков μ разных энергий.

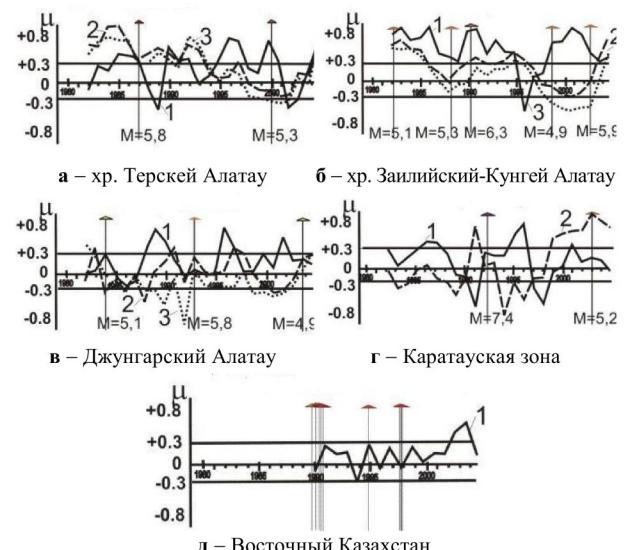


Рисунок 3. Графики временных изменений коэффициента Лоде-Надаи для энергетических диапазонов: 1 – $K \geq 9,6$; 2 – $K \leq 9,5$; 3 – $K \leq 7,5$

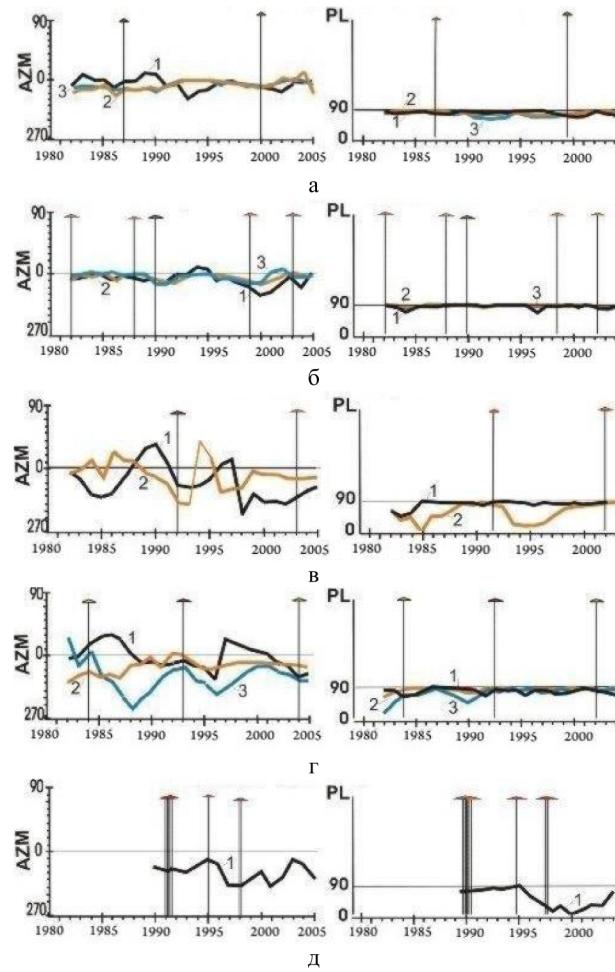
В настоящее время для зон хребтов Заилийский, Кунгей и Терской Алатау во всем энергетическом диапазоне событий тип деформированного состояния характеризуется как одноосное сжатие, а в Карагандинской зоне и зоне Джунгарского Алатау, где по землетрясениям с $K \geq 9,6$ отмечен переход к отрицательным значениям μ , отмечено различие деформированного состояния среды в соседних районах.

Совместный анализ поведения параметров χ и μ показал, что в зонах хр. Терской Алатау и Заилийский-Кунгей Алатау для нижнего энергетического диапазона событий для обоих параметров отмечен отрицательный тренд, сопровождаемый нарастанием общего количества землетрясений. То есть в общем ансамбле наблюдается тенденция к разупорядоченности индивидуальных механизмов. Сильные землетрясения происходят при наиболее высоких значениях μ и χ , после толчка тип деформирования изменяется. На графиках χ после сильнейших землетрясений отмечается понижение значений параметра для всех диапазонов энергии. Таким образом, на стадии подготовки сильного землетрясения происходит упорядочивание напряжений, действующих в разных очагах,

нарастает внутренняя согласованность индивидуальных механизмов. После толчка поле напряжений изменяется, по-разному реагируют на снятие напряжений разломы различных рангов, индивидуальные механизмы слабых и сильных толчков характеризуются низкой внутренней согласованностью.

В зоне Джунгарского Алатау изменения χ вызванные вариациями μ , упорядоченность индивидуальных механизмов очагов землетрясений не изменяется. Только в 1984 г. и 1993 г. снижение χ для событий с $K \geq 9,5$ сопровождалось синхронным снижением μ до значений 0 - 0,3, что указывает на нарастание хаотичности деформационного процесса. Именно в эти годы произошли наиболее сильные землетрясения с $M=5,1$ и $5,8$.

Оси главных напряжений. Анализ вариаций χ и μ показал, что поле региональных тектонических напряжений за исследованный период времени изменилось. Важно исследовать ориентацию главных осей напряжений, как важнейшего элемента для реконструкции СТД. На рисунке 4 приведены результаты таких исследований, проведенных для каждой из 5 изучаемых зон.



Обозначения (а – д) - на рисунке 3

Рисунок 4. Пространственно-временные вариации ориентации оси напряжения сжатия:
слева – азимутов, справа – углов выхода

Для оси сжатия во всех регионах, во всех энергетических и временных диапазонах преобладающим является близгоризонтальное и субмеридиональное с небольшим отклонением на запад положение оси напряжений сжатия. Однако и для этой устойчивой оси отмечаются вариации во времени, имеющие свои специфические особенности в разных зонах. В районах Северного Тянь-Шаня отклонения от субмеридионального направления осей незначительны во всех диапазонах энергии. В Восточном Казахстане наблюдается разворот направления оси, как к востоку, так и к западу от меридiana. В период 2000 - 2004 гг. наблюдаются также значительные вариации угла погружения оси сжатия - от близгоризонтального до близвертикального.

Ось растяжения не так устойчива как ось сжатия, особенно по углу выхода. В настоящее время углы погружения оси напряжения растяжения по сильным землетрясениям в зонах хр. Тянь-Шаня и Джунгарии (зоны 1, 2, 3 и 5) приближаются к горизонтальным. В Восточном Казахстане в период 2000 - 2004 гг. наблюдалось изменение угла погружения оси напряжения растяжения от близвертикальных до близгоризонтальных значений, то есть, происходил переход от режима сжатия к сдвигу.

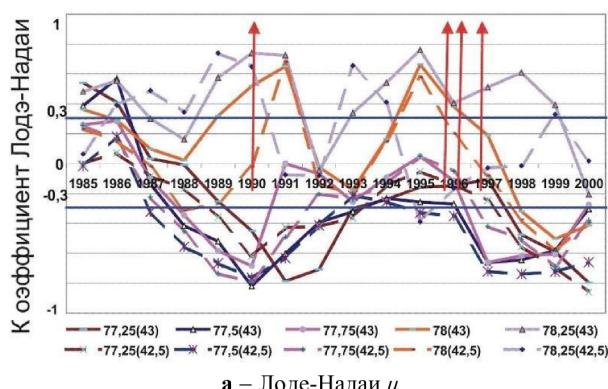
Для выявления локальных особенностей и зон несовместности сейсмотектонических деформаций в пределах хребтов Заилийский-Кунгей Алатау проведено исследование пространственно-временной дифференцированности процесса деформирования в элементарных ячейках размером $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ с шагом $0,25^\circ$. В сплошной среде компоненты скорости деформации соседних точек взаимосвязаны, несовместность сейсмотектонической деформации компенсируется дополнительными внутренними упругими деформациями и напряжениями. При склонности пород к разрушению, связанной с развитием ослабленных зон, неблагоприятная ориентация внутрен-

них напряжений может инициировать разрушение. О несовместности поля сейсмотектонических деформаций может свидетельствовать рассогласованность параметров средних механизмов очагов в соседних точках области. Проведенный анализ позволил выявить в зоне подготовки сильных событий с $M>5$ за 2 - 3 года до толчка ситуацию с различным ходом вариаций коэффициента μ в пограничных ячейках. В результате противофазных вариаций в пограничных ячейках формируется зона несовместности поля сейсмотектонических деформаций, как правило, приуроченная к глубинным разломам. Размер различно деформированных участков и перепад значений μ в них тем больше, чем выше магнитуда готовящегося события. Графики на рисунке 5 демонстрируют вариации значений μ и χ , а рисунок 6 - картину напряженно-деформированного состояния в очаговой области Байсорунского землетрясения 1990 г. в период его подготовки.

Из рисунка 5 видно, что аналогичный режим вариаций параметров СТД предшествовал серии землетрясений с $K=12$, произошедших в 1996 - 1997 гг. в этой же области. Факт возникновения сильных землетрясений в области высокого градиента поля СТД заставляет пересмотреть существующие представления об одинаковом типе деформирования во всей ближней области готовящегося землетрясения.

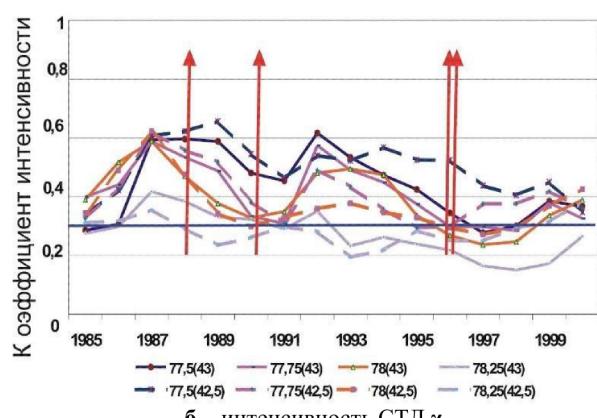
ИЗМЕНЕНИЕ ОТНОСИТЕЛЬНОГО КОЛИЧЕСТВА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ РАЗНЫХ ТИПОВ МЕХАНИЗМОВ

По результатам ряда экспериментальных работ с образцами пород, теоретических исследований и наблюдений за землетрясениями сделаны выводы о согласованном изменении динамических и кинематических характеристик сейсмических волн с параметрами механизмов очагов и характеристик напряженно-деформированного состояния в различных стадиях подготовки сильных землетрясений.



а – Лоде-Надаи μ

Цветная линия – график для элементарной ячейки; числа – координаты ячейки в градусах: (долгота, в скобках – широта).
Стрелка - момент землетрясения



б – интенсивность СТД χ

Рисунок 5. Очаговая зона Байсорунского землетрясения 1990 г.
Среднегодовые вариации коэффициентов сейсмотектонической деформации

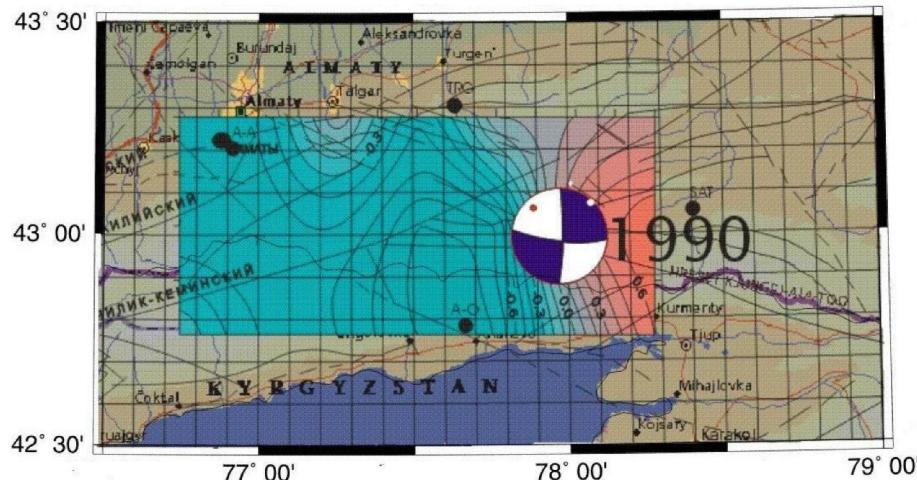
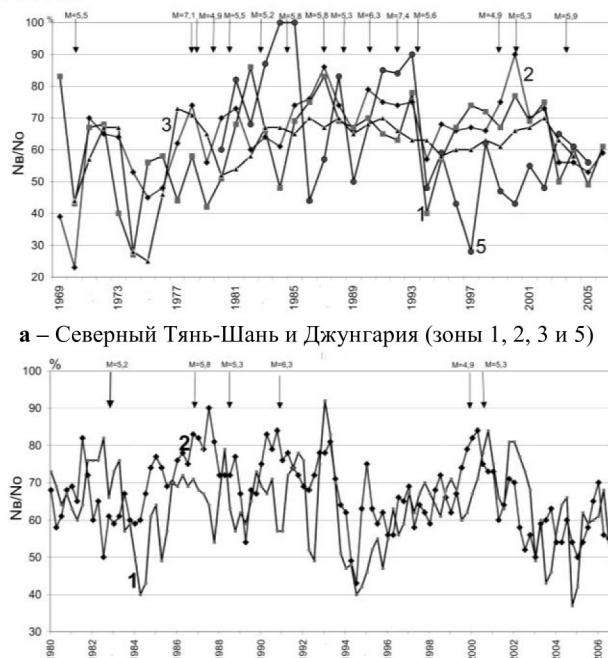


Рисунок 6. Очаговая зона Байсорунского землетрясения 1990 г. Картина деформированного состояния среды

Ранее авторами был исследован очень информативный параметр Nb/No , характеризующий относительное число землетрясений с положительной компонентой движения в очаге к общему числу землетрясений. В данном случае вариации этого параметра рассмотрены для 1, 2, 3 и 5 зоны Северного Тянь-Шаня и Джунгарии, а также в трех наиболее интересных подзонах Северного Тянь-Шаня. Использованы данные за 1969 - 2005 гг. На рисунке 7 показаны изменения среднегодовых значений параметра Nb/No .



а – Северный Тянь-Шань и Джунгария (зоны 1, 2, 3 и 5)

б – Северный Тянь-Шань (наиболее интересные подзоны)
Обозначения кривых: 1-2 - номера зон, стрелками показаны моменты сильных землетрясений региона

Рисунок 7. Изменение во времени относительного числа землетрясений с положительной компонентой движения в очаге к общему числу землетрясений

Несмотря на значительные вариации, можно выделить три основных периода за исследуемый 36 летний срок. Период 1970 - 1978 гг.: низкие значения параметра Nb/No (на уровне 50%) не сопровождаются сильными землетрясениями. Период 1978 – 1992 гг.: повышенные значения параметра Nb/No (на уровне 70%) сопровождаются высокой активностью сильных землетрясений. Период после 1993 г.: низкие значения параметра Nb/No для зоны 5 и для всех зон в конце периода, низкая сейсмическая активность сильных событий. Более детальный анализ показывает, что на общем высоком фоне значений Nb/No перед сильным землетрясением в очаговой области наблюдается рост этого параметра, а в пограничной с ней области – уменьшение его значений. Особенно хорошо это видно на графиках вариаций параметра Nb/No с окном осреднения шесть месяцев (рисунок 5б). Из рисунка хорошо видно, что значения Nb/No для хребта Терский Алатау и хребтов Заилийский и Кунгей Алатау изменяются противофазно. Создается впечатление, что имеет место прохождение деформационной волны в меридиональном направлении. Когда на юге от Иссык-Куля нарастают напряжения сжатия, на севере они, наоборот, уменьшаются. После сильных землетрясений тип подвижки обычно меняется.

В 2005 г. по данным механизмов очагов в рассматриваемых регионах имело место стабильное напряженно-деформированное состояние среды. Однако уже в 2006 г. в хр. Заилийского, Кунгей и Терской Алатау наблюдается тенденция к увеличению количества взбросовых типов подвижек. Эта же тенденция отмечается и в локальных подзонах Заилийского-Кунгей Алатау, где наблюдался спад значений параметра (от 80% в 1999 г. до 48% в 2004 г.). К западу от этой территории в зоне Киргизского хребта изменения другого характера: до 2004 г. отмечалось увеличение числа взбросовых типов подвижек в очагах землетрясений, а с 2005 г. – их уменьшение.

ВЫВОДЫ

Рассмотрение совокупности параметров СТД за протяженный период времени позволило выявить некоторые общие закономерности:

1. Для разных районов характерен свой тип напряженно-деформированного состояния, на фоне которого происходит главное событие. Так, в хребтах Заилийский, Кунгей, Терской Алатау сильные землетрясения происходят на фоне взбросовых и взбросо-сдвиговых деформаций среды. В Джунгарии и Карагандинской зоне – фоновыми являются сдвиговые деформации.

2. В период, предшествующий сильному событию, происходит упорядочивание системы напряжений на всех энергетических уровнях землетрясений, о чем свидетельствует рост значений коэффициента интенсивности СТД. После события наблюдается

перестройка системы напряжений, рассогласование индивидуальных механизмов, различный ход в графиках изменений параметров осей напряжений в разных энергетических диапазонах землетрясений.

3. Сильному землетрясению предшествует ситуация с различным ходом вариаций коэффициента μ в пограничных районах эпицентральной зоны. В окрестностях готовящегося землетрясения формируется зона несовместности поля сейсмотектонических деформаций приуроченная к глубинным разломам. Размер зоны, а также перепад значений μ в пограничных районах тем больше, чем выше магнитуда готовящегося события.

4. Анализ временных вариаций параметров механизмов очагов землетрясений показывает, что на Северном Тянь-Шане в настоящее время происходит перестройка системы напряжений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Садовский, М.А. Временные вариации механизмов очагов землетрясений / Отв. редактор М.А. Садовский / Прогноз землетрясений // Душанбе-Москва, 1983. – № 3. – С. 100 – 102.
2. Михайлова, Н.Н Поле сейсмотектонической деформации и параметры разрываобразования на Северном Тянь-Шане / Н.Н Михайлова., А.А. Власова // Изв. АН Каз. ССР, сер. геол., № 4. – 1991. – С. 87 – 92
3. Соболева, О.В. Расчет параметров сейсмотектонической деформации / О.В. Соболева, Д.Г. Бибарсова, З.Н. Вахидова // Деп. в ВИНТИ, № 5402-81, 1981.
4. Юнга, С.Л. Вопросы точности определения механизмов очагов коровых землетрясений и сейсмотектонические деформации Средней Азии и Казахстана / Землетрясения Средней Азии и Казахстана в 1980 году, Душанбе / С.Л. Юнга [и др.] // 1982 . – С. 12 – 16.
5. Михайлова, Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Центрального Казахстана / Н.Н. Михайлова, Н.Н. Полешко // Вестник НЯЦ РК, 2003. – Вып. 2. – С.100 – 105.
6. Михайлова, Н.Н. О механизмах очагов землетрясений Восточного Казахстана / Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. // Вестник НЯЦ РК, 2005, – Вып. 2. – С. 142 – 146.

ҚАЗАҚСТАННЫҢ СЕЙМОБЕЛСЕНДІ АУМАҚТАРЫНЫҢ ОШАҚТАР МЕХАНИЗМДЕРІ ПАРАМЕТРЛЕРИНІҢ ҮАҚЫТТАҒЫ ВАРИАЦИЯЛАРЫ

¹⁾Михайлова Н.Н., ²⁾Полешко Н.Н.

¹⁾КР ҰЯО Геофизикалық зерттеулер институты, Курчатов, Қазақстан

²⁾КР Білім және ғылым министрлігінің «Сейсмологиялық тәжірибелі-әдістемелік экспедициясы», Алматы

Қазақстан және шекаралың шектес аудандардың сейсмобелсенде аумактары үшін ошақтар механизмдерінің параметрлері өзгеруін зерттеу нәтижелері келтірілген және қатты жерсілкіндер қалыптасу процесстерімен байланысты параметрлерінің үақыттағы өзгеру ерекшеліктері сипатталған.

TEMPORAL VARIATIONS OF SOURCE MECHANISMS PARAMETERS AT SEISMICALLY ACTIVE KAZAKHSTAN REGIONS

¹⁾N.N. Mikhailova ²⁾N.N. Poleshko

¹⁾Institute of Geophysical Research NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾“Seismological Experimental-Methodical Expedition” the Ministry of Education and Science of RK, Almaty, Kazakhstan

Changes of focal mechanisms parameters for seismic active territories of Kazakhstan and adjacent territories were investigated; features of parameters change with time associated with processes of large earthquakes formations were revealed.