

УДК 550.34

ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗУЧЕНИЯ СТАТИСТИКИ НАПРАВЛЕНИЙ ДЛЯ ПАР ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ-СОСЕДЕЙ НА КАМЧАТКЕ

А.А. Гусев^{1,2}, А.А. Палуева¹

¹*Институт вулканологии и сейсмологии ДВО РАН, Петропавловск-
Камчатский, 683006; e-mail: gusev@kscnet.ru*

²*Камчатский филиал ГС РАН, Петропавловск-Камчатский*

Очаги землетрясений в пространстве–времени не располагаются вполне случайно, они обладают определенной организацией. Обычным объектом анализа являются сгущения событий сразу и в пространстве, и во времени, например, афтершоки. Будем называть два близких в пространстве-времени очага «соседями». Изучается статистика направлений для векторов r , соединяющих соседей. Изучали каталог мелкофокусных землетрясений в Камчатской зоне субдукции. Рассматривали множество пар соседей с ограничением на расстояние $|r|$ и на величину относительного запаздывания и изучали гистограммы азимутов (розы-диаграммы направлений) в трех кругах диаметром 150 км за пять периодов длительностью около 10 лет. Для получения устойчивой картины подавляли влияние двух мешающих факторов: (1) обычных афтершоков, и (2) вытянутости роз-диаграмм вдоль островной дуги для любых, а не только малых запаздываний. Зафиксируем $\lambda = 37^\circ$ как средний, опорный азимут простирания структуры островной дуги Камчатки. Статистика азимутов показала следующее. (1) Систематически формируются лепестки направленности по направлениям λ (вдоль дуги, "0") и $\lambda + 90^\circ$ (поперек дуги, "90"). (2) Нередко формируются изолированные лепестки в направлениях, близких к $\lambda \pm 30^\circ$, $\lambda \pm 45^\circ$ и $\lambda \pm 60^\circ$. (3) Вблизи области стыка Курило-Камчатской и Алеутской дуг наблюдается особая картина. (4) Розы-диаграммы заметно меняются во времени.

Введение

Слабая (фоновая) сейсмичность в сейсмических зонах коровых землетрясений (блоковой тектоники) формирует рассеянное, часто квазислучайное поле эпицентров. Хорошо известное свойство поля эпицентров – группирование: афтершоки, рои и т.п. Типично также формирование линейных уплотнений эпицентров (линеаментов); они часто маркируют сейсмоактивные разломы. На Камчатке фоновая ("слабая") мелкофокусная сейсмичность, связанная с пологим ($\sim 15^\circ$) субдукционным меганадвигом, прослеживается в плане в виде полосы шириной до 150 км; линеаментная структура на сопоставимых масштабах здесь четко не выражена.

Обычно геометрия эпицентров изучается на качественном уровне, в связи с сейсмо-геологическими данными. Имелись попытки выделить структуры из поля эпицентров формальным путем [10 и др.]. Однако фактор времени во внимание обычно не принимался. Исключением являются работы по изучению миграции эпицентров [6, 9, 1; и др.] вдоль структур с заданной геометрией. В [7] предложен полезный термин «очаги-соседи», который мы заимствовали; критерием соседства является близость в пространстве и времени, и

использовано понятие «цепочки» для группы соседей, выделенных по формальному критерию близости; но геометрия так определенной «цепочки» не изучалась.

В важной серии исследований Лукк [3] и Лукк и Турчанинов [4] отметили формирование кратковременных протяженных линейных цепочек эпицентров в Гармском районе Таджикистана. Такие цепочки состояли из пяти и более эпицентров с $M \geq 1$, произошедших за короткое время в прямолинейной полосе шириной 3-5 км и длиной 30-110 км. В этих работах получены важные первые результаты по угловой структуре серий соседей. Предмет исследования весьма интересен и явно заслуживает изучения.

В настоящей работе изучаются структурные свойства поля эпицентров каталога Камчатки путем рассмотрения простейших объектов – пар эпицентров-соседей. Изучается распределение по углу отрезков, соединяющих пары. Для этого было необходимо выработать особую методику для подавления мешающих эффектов: влияния афтершоков, и роев, а также вытянутости поля эпицентров вдоль структур дуги.

Изучение угловой структуры эпицентров-«соседей» представляет интерес с ряда точек зрения: для установления новых свойств статистической структуры наблюдаемого поля эпицентров; для изучения свойств взаимодействия очагов землетрясений; для выявления сводных геометрических характеристик сетки разломов невысокого ранга, и, в перспективе, для хотя бы частичной локализации разломов-компонент такой сетки.

Структура работы следующая. Приведен базовый алгоритм построения гистограмм направлений, список его параметров и выбор их значений. Охарактеризован исходный каталог. Описан ряд вариантов расчетов и рассмотрены их результаты.

Алгоритм построения гистограмм направлений (роз-диаграмм)

Общая схема алгоритма.

- (1) Задать управляющие параметры.
- (2) Выделить рабочую часть исходного каталога землетрясений по времени, месту, глубине и магнитуде.
- (3) Очистить рабочий каталог от выраженных групп по быстрой схеме.
- (4) По заданным ограничениям на длину r вектора \mathbf{r} пары и на запаздывание Δt между событиями пары (обычно от нескольких часов до нескольких суток) выделить все пары соседей в каталоге.
- (5) Найти азимуты и развернуть направление отсчета азимутов на направление островной дуги.
- (6) Построить исходную (R) гистограмму азимутов для соседей
- (7) Повторить шаги 4–6, используя диапазон запаздываний из интервала 100–200 сут. и получить гистограмму для «несоседей». Считаем, такая гистограмма («нормализатор») отражает типичное пространственное размещение эпицентров в пределах полугода.

(8) Пронормировать числа заполнения ячеек R -гистограммы (соседей) на аналогичные числа заполнения в нормализаторе («несоседей»); получить нормированные (N) гистограммы.

Параметры алгоритма. Список параметров алгоритма включает следующие группы:

- Координаты центра λ_0 , ϕ_0 и радиус R_0 круговой области отбора эпицентров;
- Диапазоны отбора очагов по времени, магнитуде ML , глубине.
- Параметры N_x, N_b, N_R процедуры подавления групп (см. ниже).
- Параметры соседства: разрешенный диапазон D_1, D_2 длин векторов r ; разрешенный диапазон относительного запаздывания времен пары $\Delta t_1, \Delta t_2$; разрешенный диапазон разностей номеров компонент пары в каталоге K_1, K_2 . Обычно $\Delta t_1=0, K_1=1$.
- Азимут отсчета углов («условный север») λ , шаг гистограммы углов $\Delta\alpha$.

Процедура подавления групп. Каждый член плотной серии афтершоков, создает в комбинации с другим (фиксированным) подходящим эпицентром отдельную пару. Все такие пары несут, по существу, одну и ту же информацию о геометрии поля эпицентров, и достаточно учитывать любую одиночную пару из такой серии пар. Простой систематический алгоритм выявления групп (афтершоков и пр.) был предложен в [2]. Он построен на идее обнаружения статистически значимых сгустков эпицентров в пространстве-времени; аналогичный подход предложен в [5]. Выделив группу, можно подавить связанные искажения статистики. Однако, данные алгоритмы опираются на идею пуассоновского поля событий-инициаторов групп, который сам может быть оспорен. Чтобы не проводить специального исследования, применили более примитивный и притом быстрый алгоритм, заключающийся в следующем.

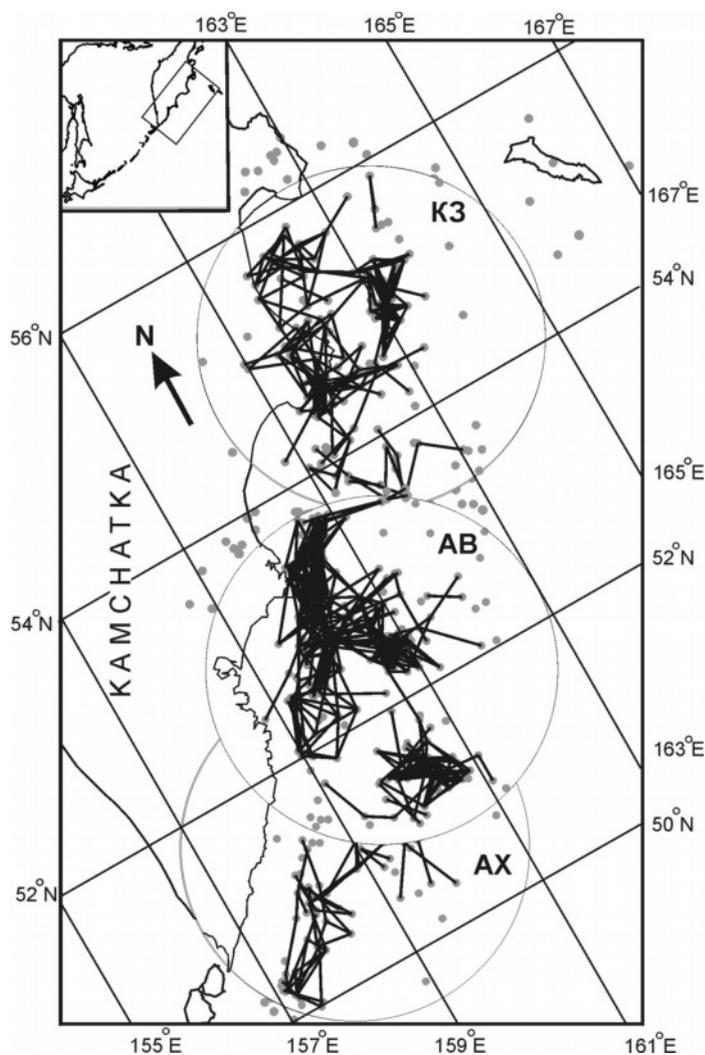
Рассмотрим подкаталог, выбранный из параллелепипеда с размерами L и W по пространству и T по времени. Разделим L, W и T на N_L, N_W и N_T одинаковых частей, соответственно, проведем через точки деления плоскости, параллельные граням параллелепипеда, и подсчитаем числа N_{ijk} заполнения полученных ячеек точками каталога. Введем порог N_R , и рассмотрим каждую из ячеек с $N_{ijk} \geq N_R$. Считаем, что эти ячейки соответствуют группам или их частям. В каждой такой ячейке рассматриваем список событий, упорядоченный по магнитуде, и отбрасываем слабые события так, что остается N_0 более сильных. Данный алгоритм частично подавляет эффекты группирования. Параметры $N_L=N_W, N_T$ и N_R были подобраны эмпирически и не подстраивались в ходе работы.

Детали алгоритма. Выбор диапазона D_1, D_2 длин векторов в существенной мере определяется точностью гипоцентров E . Чтобы оценки азимутов имели смысл, значения D_1 должны превышать E в несколько раз. Значение D_2 должно быть заметно ниже, чем R_0 , чтобы ослабить нежелательное влияние границ рабочей области. Важен выбор Δt_2 : при малых Δt_2 объем статистики мал и результаты ненадежны. При больших Δt_2 растет объем незакономерных, чисто случайных пар, и результаты зашумляются. Для выбора пар параллельно с заданием диапазона времен $\Delta t_1, \Delta t_2$ обычно применяется дополнительное ограничение на разницу но-

меров в рабочем каталоге K_1 , K_2 . Задание небольшого K_2 позволяет дополнительно подавить искажающий эффект группирования, так как не допускает формирования более K_2 пар с одним и тем же участником.

Рабочий каталог, выбор параметров расчетов

Выбор области анализа, отбор очагов. Исходный региональный каталог Камчатки получен в работах ИФЗАН, ИВ ДВО РАН под руководством С.А.Федотова, ОМСП ГС РАН, КФ ГС РАН под руководством Е.И.Гордеева, В.Н.Чеброва. Расчет эпицентров выполнялся по программе ГИПО А.А.Гусева. Полная длительность изучавшейся части исходного каталога – с 1962 по 2010 г. Области анализа (рис. 1) выбирались в виде кругов с $R_0 = 150$ км, и располагались вдоль структур островной дуги. Изучали три круга с кодами АХ, (район бухты Ахомтен, Южная Камчатка), АВ (район Авачинского залива) и КЗ (район Камчатского залива). Частичное перекрытие кругов допускалось. На этапе подавления групп обрабатывался квадрат, для которого круг является вписанным.



Для обеспечения приемлемой точности гистограмм каталог разбивался на периоды длиной около 10 лет, их определения см. Табл.1. Диапазон ML составлял 3.5-6.5. Изучали только мелкофокусные очаги, с глубинами в диапазоне 0-50 км. Азимут простираения структуры островной дуги Камчатки принимали $\lambda = 37^\circ$.

Параметры построения и анализа гистограмм. В основных расчетах принимали $N_L=10$, $N_T=10$, $N_R=10$; $D_1=15$ км, $D_2=60$ км; $\Delta t_1=0$, $\Delta t_2=0.5$ сут; $K_1=1$, $K_2=3$; $\Delta\alpha=10^\circ$. При расчете гистограммы-нормализатора принимали $\Delta t_1=100$ сут., $\Delta t_2=200$ сут. Для некоторых расчетов использовали другие варианты констант; они приведены в тексте или подписях к соответствующим рисункам.

Рис. 1. Примеры расположения пар для трех изученных кругов. Круги с цифрой 1, 3 и 5 соответствуют кодам АВ, АХ и КЗ. $\Delta t_2=15$ сут. Данные за 1962 г.

Таблица 1. Интервалы времени – "десятилетки" и их коды.

Период	Код	Примечание
1962 - 1971.11.24	«65»	землетрясение с $M=7.6$ в конце периода
1972-1980	«75»	
1981-1990	«85»	
1991-1997.12.05	«95»	землетрясение с $M=7.6$ в конце периода
1998-2010	«05»	

Результаты расчетов

На рис. 1 приведен пример картины векторов пар соседей. Видно, что такие векторы не вполне случайны; заметны субпараллельные группы. Но эта картина – чисто качественная, ее следует аккуратно проверить.

На рис. 2 приведены результаты анализа по описанному алгоритму. Приводятся гистограммы типа R (ненормированные) за периоды «65» и «85» для круга АВ). Гистограммы даны в обычном формате и в виде роз-диаграмм. Параллельно даны результаты для вариантов $\Delta t_2 = 0.5$ сут. и $\Delta t_2 = 5$ сут.

Визуально гистограммы явно не соответствуют гипотезе равномерного ("чисто случайного") распределения направлений. Для формальной проверки этого факта на одной из гистограмм с относительно малым числом пар (190) проведено среднее ($m=10.6$) и границы интервала $m \pm \sigma = [7.3 \ 13.9]$. Такой интервал в случае равномерного закона должен захватывать 68% из 18 точек гистограммы, то есть около 13 точек. Фактически в него попали всего 5 точек, что (применяя биномиальный критерий) дает уровень значимости менее 0.1%. Все приводимые далее гистограммы имеют сопоставимое число пар и сопоставимые или более сильные отклонения от равномерного закона, поэтому подобные проверки сочтены избыточными и их результаты не приводятся. На рис. 2 видно следующее:

- имеется выраженная неравномерность распределения направлений;
- степень этой неравномерности явно выше для короткого интервала запаздываний, его и использовали в дальнейшей работе;
- имеется преимущественное направление вдоль структуры углы около 0° и 180° .

На рис. 3 приводится материал расчетов по кругу АХ. Показаны гистограммы типа R за пять десятилеток, нормирующая гистограмма (суммарная за 50 лет) и пять нормированных

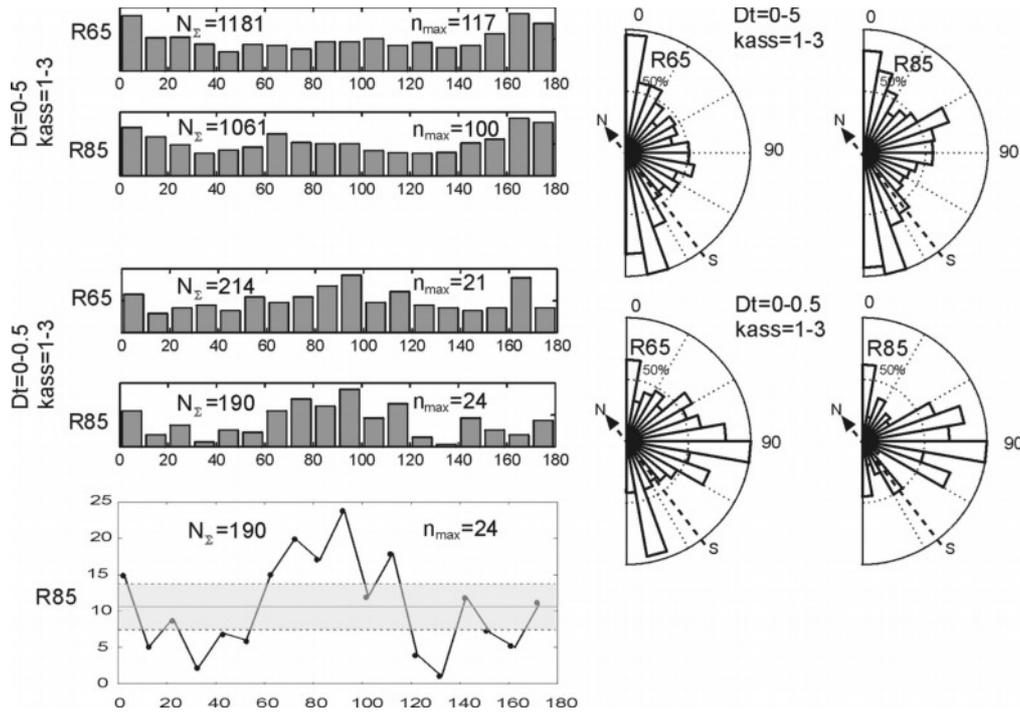


Рис. 2. Примеры гистограмм (слева) и роз-диаграмм направлений (справа), для двух периодов «65» и «85», и для двух вариантов параметра Δt_2 , для круга АВ. Нижний левый график дублирует гистограмму, находящуюся над ним, и поясняет, как можно проверить значимость отклонения гистограммы от гипотезы равномерного закона, см. текст. Все графики отображают ненормализованные гистограммы.

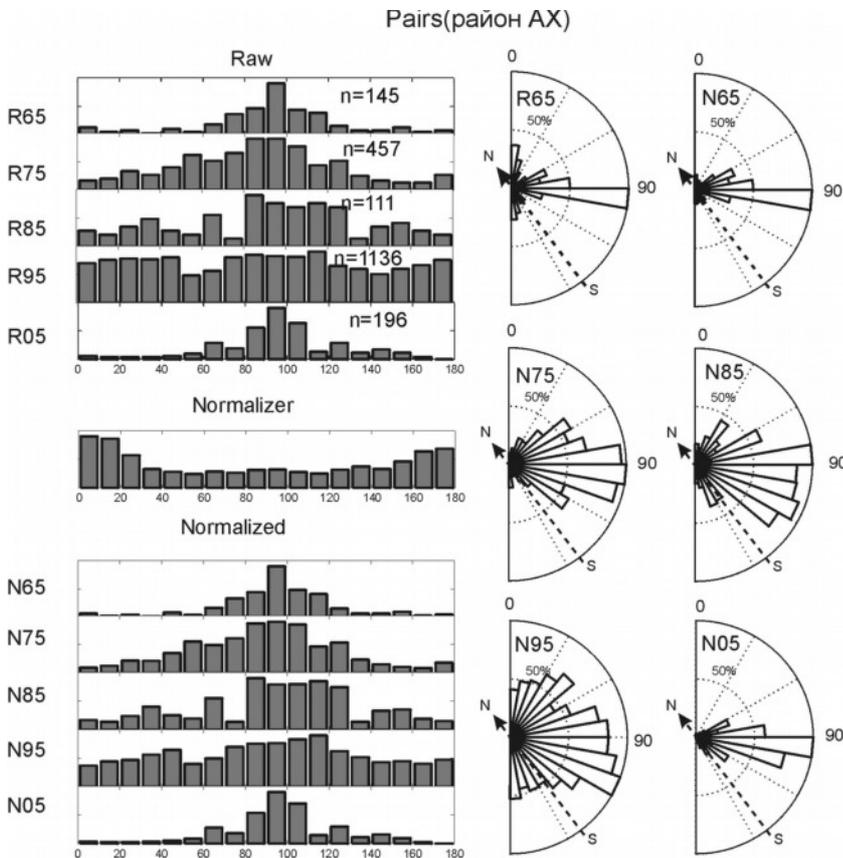


Рис. 3. Гистограммы (слева) и розы-диаграммы (справа) направлений для круга АХ для пяти периодов. Сверху вниз гистограммы образуют: группу из пяти ненормированных гистограмм (коды R65, R75 и т.д.), каждую для определенной десятилетки, гистограмму, использованную для нормирования, и далее группу из пяти нормированных гистограмм (коды N65, N75 и т.д.). Розы-диаграммы соответствуют: первая – гистограмме R65, остальные – гистограммам N65-N05. Направление географического севера указано штриховой стрелкой.

Таблица 2. Предпочтительные направления пар в разных кругах и периодах десятилетиях.

Круг	Десятилетка*	Предпочтительные направления*
АХ	«65»	90° ,
АХ	«75»	90°, 0-180°,
АХ	«85»	90°, 0-180°, 45°, 145°
АХ	«95»	90°,
АХ	«05»	90° ,
АВ	«65»	90° , 25°, 45°, 155°
АВ	«75»	90°, 25°, 55°, 125° ,
АВ	«85»	90°, 35°, 65°, 145°-155°
АВ	«95»	90°, 45°
АВ	«05»	90° , 65°, 125°, 145°
КЗ	«65»	75°-85°, 0-180°, 145° .
КЗ	«75»	75°-85°, 0-180°, 145°.25°
КЗ	«85»	75°-85°, 125°-135°15°-25°
КЗ	«95»	75°-85°, 0-180°,
КЗ	«05»	75°-85°, 0-180°, 145°, 25°, 55°, 115°-125°

* (отсчет от луча с азимутом 37°)

надвига преобладающее напряжение – сжатие поперек структур дуги и вдоль вектора взаимного движения плит, примерно по азимуту 130°. Поле напряжений и соответствующее поле сейсмоструктурных деформаций близко к чистому сдвигу (коэффициент Лоде-Надаи мало отличается от нуля, см. напр. [8]). Такое напряженное состояние хорошо объясняет лепесток 0°–180° на наших роза-диаграммах. Оно, однако, не должно себя проявлять каким-то четким образом в сдвиговых движениях по вторичным (близвертикальным?) оперяющим разломам вблизи поверхности меганадвига. Если допустить, что напряженное состояние – локально одноосное, что не вполне правдоподобно, но можно допустить в ограниченных масштабах, можно ожидать формирования движений по площадкам с простираем около 60° и 120° в нашей системе отсчета углов. Указания на такие направления в розах-диаграммах действительно имеются, но далеко не преобладают.

Наиболее явно в кругах АХ и АВ показывает себя поперечное структуре и параллельное оси сжатия направление 90°. Этой весьма выраженной тенденции нет явных причин. Простейшее объяснение такой геометрии – через трещины отрыва, обычно располагающиеся

гистограмм. Розы-диаграммы приведены следующим образом: ненормированная – за период «65», нормированные – все пять. Хорошо видны существенные вариации гистограммы углов от одной десятилетки к другой. Этот материал по всем кругам и периодам обобщен в Табл. 2. На рис. 4, 5 приводится материал расчетов по кругам АВ и КЗ.

Представляет интерес увидеть, как выраженные лепестки проявляют себя непосредственно на карте. На рис. 6 это выполнено для круга КЗ за период «85». Видно, что на карте векторов пар проявляются два семейства субпараллельных векторов, расположенных поперек и косо к структурам островной дуги.

Обсуждение

Слабая фоновая сейсмичность в основной зоне субдукционного меганадвига (круги АХ и АВ) отражает чрезвычайно малую долю общей многолетней сейсмоструктурной деформации, поэтому ее свойства могут иметь особый характер. В области этого

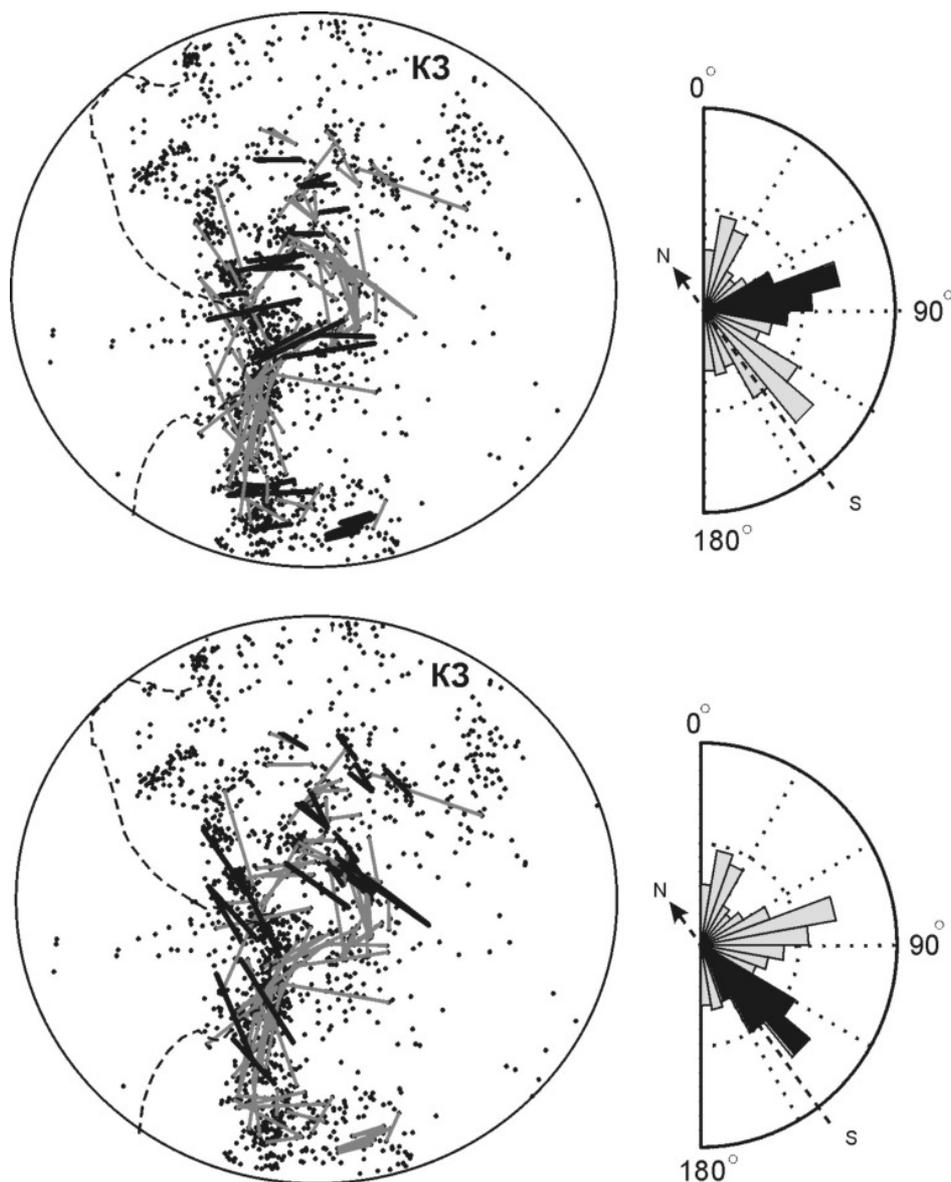


Рис. 6. Два варианта карты круга КЗ (слева) для периода "85". На каждом варианте выделены черным отрезки-пары определенного направления. Отрезки-пары других направлений и эпицентры – серые. Выделенные направления отображены в виде черных секторов на розе-диаграмме справа от каждой карты.

вдоль оси сжатия, но для литосферы на глубинах в основном 15–35 км такое объяснение выглядит экзотически. Оно реализуемо только если допустить полную компенсацию литостатического давления давлением порового флюида. В целом, вполне убедительную интерпретацию полученных роз направлений в терминах ориентации вероятных разрывов в приблизительно известном поле напряжений провести пока не удастся.

В [4] выявились предпочтительные направления цепочек для Гарма. Их гистограммы углов можно сопоставлять с нашими. Если за начало отсчета углов, по аналогии с нашим

подходом, взяв направление главных структур (хребтов), лепестки из этой работы дадут направления: основные около 0° и 90° , второстепенные около 50° и 150° , что в большой мере аналогично нашим результатам. Такое согласие неожиданно, и говорит об определенной аналогии между геомеханическими ситуациями в двух регионах.

Картина для круга КЗ менее определенная. Здесь структура островной дуги поворачивает к северу и ее азимут составляет $\approx 10^\circ$, в то время как ориентировка оси сжатия меняется в небольшой степени. Направление субдукции здесь становится косым по отношению к нормали к структурам. Тот наблюдаемый факт, что розы направлений здесь более сложно устроены, чем в двух южных кругах, согласуется с более сложной геометрией.

Заметим, что отмеченная в [4] существенная изменчивость предпочтительных направлений цепочек во времени имеет место также и для наших условий; достаточно визуально сравнить гистограммы и розы-диаграммы разных периодов. Можно сделать общий: принципиальный вывод: пары или цепочки соседей не только выявляют глубинную геометрическую структуру малоизученных живых разломов литосферы невысокого ранга, но также позволяют проследивать быстро меняющуюся динамику движений по этим разломам. При взгляде на исходное поле эпицентров геометрия разломов невидима, а динамика движений по ним скрыта от наблюдения.

Физика наблюдаемых предпочтительных направлений может заключаться в следующем. По некоторым вторичным разломам зоны Беньофа может происходить асейсмическое скольжение. Это скольжение (непрерывное, но, вероятнее, эпизодическое) может сопровождаться слабыми землетрясениями вдоль активизированных разломов. При этом следует иметь в виду, что разломы в Земле образуют неслучайную сетку, и часто формируют субпараллельные системы разломов. При эпизодическом асейсмическом скольжении вдоль разломов, то есть вдоль стыков блоковых структур с размерами в десятки км, вполне возможно возникновение почти синхронных событий на таких удалениях. Возникновение лепестков связывается в этом случае с возможностью активизации в определенные периоды времени целых неслучайных систем субпараллельных разломов. По причине наличия подобных систем распределение второго эпицентра вокруг первого неравномерно по углу, и «высвечивает» геометрические особенности такой системы.

Заключение

Разработана новая методика выявления по каталогу слабых землетрясений региона предпочтительных направлений движений по вторичным разломам и субпараллельным системам таких разломов. Выявлены предпочтительные направления систем вторичных разломов для трех участков зоны субдукции на Камчатке. Обнаружены выраженные вариации роз-диаграмм предпочтительных направлений во времени. Методика может быть применена для слежения за напряженным состоянием литосферы, а также, в перспективе, для выявления разломных систем невысокого ранга.

Список литературы

1. *Вилькович Е.В., Шнирман М.Г.* О миграции очагов землетрясений вдоль крупных разломов и зон Бенъофа // Вычислительная сейсмология. 1980. Вып. 13. С. 19-24.
2. *Гусев А.А.* Номограмма для выделения групп землетрясений.// Геол. Геофиз.1971. № 3 . С. 36-43.
3. *Лукк А.А.* Пространственно-временные последовательности слабых землетрясений Гармского района // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 2. С. 25-37.
4. *Лукк А.А., Турчанинов И.В.* Выявление линейных последовательностей эпицентров землетрясений в сейсмическом поле Гармского района // Физика Земли. 1998. № 10. С. 3 - 20.
5. *Молчан Г.М., Дмитриева О.Е.* Идентификация афтершоков: обзор и новые подходы // Современные методы обработки сейсмологических данных. Вычислительная сейсмология. Вып. 24. М.: Наука. 1991. С. 19-50.
6. *Рихтер Ч.* Элементарная сейсмология. М., Наука. 1963. 670 с.
7. *Шебалин П.Н.* Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. № 1. С. 3-15.
8. *Ребецкий Ю.Л.* Напряженное состояние земной коры Курил и Камчатки перед Симуширскими землетрясениями // Тихоокеанская геология. 2009. 28. № 5. С. 70-84.
9. *Mogi, K.,* Sequential Occurrences of Recent Great Earthquakes // J. Phys. Earth. Univ. Tokyo. 1968. 16. P. 30-36.
10. *Ouillon G., Ducorbier C., Sornette D.* Automatic reconstruction of fault networks from seismicity catalogs: Three – dimensional optimal anisotropic dynamic clustering // J. Geophys. Res. 113 P. B01306