

УДК 551.24+550.8.05

Светлой памяти нашего коллеги  
Бориса Кирилловича Сорокина  
посвящается

**АЛГОРИТМ ДЕТАЛИЗАЦИИ УЗОРОВ СУММАРНЫХ  
СТЕРЕОГРАММ В ИЗОЛИНИЯХ ПЛОТНОСТИ УГЛОВЫХ  
ИЗМЕРЕНИЙ ДЛЯ ВЫБОРОК БОЛЬШОГО ОБЪЕМА  
(НА ПРИМЕРЕ СТРУКТУР РУДНЫХ  
МЕСТОРОЖДЕНИЙ)**

© 2015 А.Н. Митрохин, В.П. Уткин, П.Л. Неволин

*Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, Владивосток, 690022;  
e-mail: stakhor@yandex.ru*

Рассматривается графическая реализация метода модального свертывания выборок большого объема в рамках статистического анализа ориентированных данных на стереограммах изоконцентраций ориентировок. Ее суть алгоритмически проста: в статистическую обработку включаются только (но все!) моды (максимумы) ориентировок, взятые с частных стереограмм по локальным точкам наблюдения (подвыборкам), охватываемым базисной выборкой. Показаны актуальность, эффективность, воспроизводимость и значимо более высокая разрешающая способность данного метода по сравнению с традиционно применяемым сквозным суммированием целиком всего базисного массива угловых измерений. Это позволяет изучать геологические объекты со структурным рисунком любого уровня сложности (включая рудоносные) без применения процедур категоризации выборок угловых измерений по тем или иным геологическим признакам.

*Ключевые слова: базисная выборка, итоговая/частная стереограмма, изоконцентрации, модальное свертывание.*

**ВВЕДЕНИЕ**

Статистическая обработка угловых измерений линейных и плоскостных элементов с помощью стереограмм, отстраиваемых в изолиниях относительной плотности (далее – изоконцентраций) ориентировок, давно уже стала неотъемлемой частью геолого-структурных и тектонофизических исследований. И здесь первостепенное значение *всегда* придается не только качеству, но и количеству исходных данных. Показательными в этом смысле являются работы по систематике дизъюнктивов в области разрывной тектоники, где *массовый* характер замеров ориентировок разрывов или трещин во многом определяет *само качество* исследований как таковое. В этом солидарны все существующие в России руководства по структурной геологии, так

или иначе затрагивающие этот аспект (Ажгирей, 1966; Белоусов и др., 2001; Вольфсон и др. 1960; Вольфсон, Яковлев, 1975; Геологоструктурные ..., 1982; Горшков, Якушова, 1973; Лир, Козлов, 1993; Мардиа, 1978; Мишин и др., 2007; Невский, 1979; Первушов, Ермохина, 2009; Рылов, Тимофеев, 1975; Светозаров, 2005; Старостин и др., 2002; Уткин, 1980б; Шерман, Днепровский, 1989 и др.). В каждом из них подчеркивается, что для получения полноценной картины поведения систем разрывов или трещин замеры должны непрерывно сопровождать наблюдения на исследуемом объекте с максимальным охватом имеющихся здесь естественных и искусственных обнажений. Причем иногда (Ажгирей, 1966; Горшков, Якушова, 1973; Кушнарев, 1977; Рылов, Тимофеев, 1975; Glamheden, Hökmark, 2010 и др.) даже *настоятельно* рекомендуется в пределах

отдельного обнажения измерять ориентировки абсолютно всех разрывов и трещин. И тогда стандартная процедура обобщения всего имеющегося объема данных в выборке для отдельно взятого объекта (далее – *сквозное суммирование*) даже с категоризацией по строго заданным критериям приводит к тому, что при статистической обработке угловых измерений приходится оперировать сотнями, а то и тысячами замеров.

Отсюда мы имеем следующую общеизвестную проблему-парадокс: рост объема выборки при сквозном суммировании *неминуемо* приводит к упрощению (сглаживанию/нивелированию) узора изолиний плотности распределения ориентировок на итоговой стереограмме при одних и тех же параметрах обчета и интерполяции.

И в итоге узор такой стереограммы перестает адекватно отражать структурный рисунок изучаемого объекта, так как *его статистически менее проявленные элементы затушевываются и поглощаются наиболее развитыми*. Сказанное усугубляется еще и тем обстоятельством, о котором часто забывают, что физический порог разрешающей способности сквозного суммирования ограничен точностью угловых измерений горным компасом в  $\pm 2-3^\circ$ . Это дает предельный для математически корректного сквозного суммирования объем  $N = 1000$  замеров даже с учетом плавающего размера площади подсчетного окна  $s(\%)$ , состоящего в обратной зависимости от  $N$  и в физическом пределе составляющего около 0.1% от площади стереограммы (Мардиа, 1978; Пронин, 1949; Чини, 1986; StereoNett, 2000 и др.). В обиходе же, как мы знаем, пользуются в основном палетками с  $s(\%) = 1\%$ . Так или иначе, выборкой большого объема можно полагать массив угловых измерений, превышающий 1000 замеров.

Второй, и *главный*, аспект очерчиваемой проблемы касается ее смысловой части. С точки зрения структурной геологии и тектонофизики наиболее статистически преобладающие структурные элементы часто относятся к самым молодым деформациям, наложенным на дислокационные структуры ранних генераций. Последние же, как известно, могут являться причиной возникновения деформаций позднего заложения. Тем самым упрощение узора итоговых стереограмм при обработке выборок большого объема объективно ведет еще и к *смысловому* искажению, а то и к потере части структурной информации, которая во многих случаях оказывается ключевой для последующих геолого-структурных и геодинамических реконструкций, что подчеркивается, например, И.П. Кушнаревым (1977) и В.А. Невским (1979). И тогда стереограммы, оставляя детали их

структурного анализирования за кадром, фактологически теряют свойства доказательного иллюстративного материала. Особенно контрастно эта проблема проявляется в контексте геолого-структурного изучения структур рудных месторождений (Невский, 1979), где работа с большими массивами геолого-структурных данных – скорее не исключение, а правило.

Поэтому очень актуально нахождение любых путей и методов работы со структурными выборками большого объема на стереограммах, которые позволяли бы снять или обойти очерченный выше парадокс. Причем в идеале – без привлечения категоризации данных по каким-либо критериям (разрывы, трещины, слоистость, минеральное наполнение и т. п.). Один из таких приемов и рассматривается в настоящей статье.

## БАЗОВЫЕ ПОДХОДЫ

В то же самое время мы должны понимать, что суммирование угловых данных (любой категории) для объекта (неважно, локальной точки ли, обширной территории ли) нацелено, прежде всего, на решение задач их обобщения/генерализации (что отчасти противоположно по цели очерченной нами проблемы) для оценки структурно-геодинамической ситуации на объекте в целом.

К ним можно (в геолого-структурном ключе, в зависимости от типа объекта) отнести задачи систематики (и выявления соответствующих доминант) разрывных и складчатых деформаций; определения их геодинамического типа (по доминантам осей напряжений); выявления устойчивых ориентировок всякого рода петрографических элементов: галек в стратиграфической толще или будин в зоне тектонического расланцевания/будинажа, параметров линейаризации структурно-текстурных элементов (типа кливажа) в магматических метаморфических породах и т. д. и т. п. И эти задачи, как мы видим, чаще всего (если не всегда) прикладные.

И такая направленность обобщения данных справедливо остается преобладающей в подавляющем большинстве современных геолого-структурных исследований, включая перечисленные выше. И было бы странно (учитывая еще и прикладной аспект задач), если бы разработчики адекватных аналитических приемов и решений (включая программные) не ориентировались бы именно на эту тенденцию<sup>1</sup>.

Со времен Б. Зандера (Ampferer, Sander, 1920; Sander, 1921) методы частотного обобщения на стереограммах для структурной геологии (и ее ветви – тектонофизики) так отшлифовались и стандартизировались и в графическом, и аналитическом исполнении, что впору их считать

<sup>1</sup> В контексте нашей работы следует оговориться сразу, что с позиций математической статистики (Чини, 1986; Электронный ..., 1984-2015) есть констатация того факта, что для геологических дисциплин (включая структурную геологию и тектонофизику) статистическая обработка данных в большинстве своем основана на *непараметрическом подходе* (и чаще всего на уровне *описательных статистик*, для нас в частности – *частотных*).

Из-за того что по факту геологи оперируют как правило либо небольшим количеством данных ( $\leq 100$ : петрофизика, петрохимия, определения абсолютных возрастов и т. п.; станции обсчета для локальных геолого-структурных пунктов наблюдений (до указанного уровня) и др.), т. к. получение информации просто очень дорого. Либо выборками большого объема (при объеме данных  $> 100 \rightarrow \infty$ ), характерных для площадных/съёмочных (литогеохимии, металлотрии, геофизических (магнито-, электро- и гравиторазведки), структурных, а также геолого-поисковых/разведочных (связанных с подсчетом запасов) работ, где неизвестен или очень трудно (а то и невозможно) достоверно предсказать характер распределения данных, чтобы так вот однозначно свести его к какому-либо математически стандартному варианту распределения с тем, чтобы перевести статистическую обработку на параметрические рельсы.

Хотя многое (даже без реализации существующих методик аппроксимации и оптимизации геоданных в анализируемой выборке под стандартные распределения) зависит, хотя и с оговорками, попросту от объема данных в выборке (Электронный ..., 1984-2015). При очень большом объеме геоданных (примерно от тысячи и более) выборка может попросту рассматриваться как нормально распределенная, поскольку многие параметрические критерии, основанные на нормальном распределении (Стьюдента и т. п.), при таких объемах выборочной совокупности превращаются из функциональных переменных просто в константы.

Но даже в этих случаях геологи остаются осторожными, поскольку распределения данных могут оказаться так хаотичны, что, может статься, и выработка тех или иных статистических гипотез и их анализ окажется столь нетривиальной задачей как в аналитическом, так и в графическом исполнении (включая их параметрический вариант), что на ее выходе сможет потеряться не только количественный, но и качественный смысл обрабатываемой информации.

Альтернативой для геологии, как нам видится из своего опыта, является формирование статистических гипотез на основе геолого-генетических моделей, базирующихся на определенном цифровом материале (в статистическом разделе структурной геологии/тектонофизики – главенствующее направление, частично рассмотренное в данном разделе статьи). Но и тут это дело не самого близкого будущего, раз геологи по-прежнему используют (и это их в целом устраивает) в своих исследованиях главным образом статистические наработки как минимум 80-летней давности.

классическими. Настолько, что порой исследователи, используя «стандартный» вариант подсчета плотности распределения ориентировок, отвечающий 1% площади стереограммы (реализованный, кстати, по умолчанию также в большинстве существующих программных продуктов), даже не задумываются о том, что есть еще какие-то варианты детализации узоров стереограмм.

Хотя многие методы обобщения данных на стереографических сетках (как то: скользящего окна, косинусных сумм (StereoNett, 2000), Пронина – Ламберта (Пронин, 1949), да и просто подсчета плотности ориентировок на полярных сетках с переменной густотой сети (Мандыч, 1981) и т. п.) в большинстве своем уже изначально содержат в себе возможность корректной (в обратной пропорции к объему выборки  $N$ ) детализации узоров обобщающих (суммарных) стереограмм.

Видятся две главные причины существования такой (еще преобладающей на данный момент) в структурной геологии/тектонофизике тенденции.

Первая – сугубо формальная, когда статистическое обобщение данных является инструментом, сугубо дополняющим исследование. Здесь статистическое обобщение данных – это лишь вспомогательный инструментарий, способству-

ющий систематизации и упорядочиванию данных, которые выступают в роли дополнительного (вероятностного) аргумента за/против выводов, полученных в ходе умозаключений.

К последнему примыкает определенным образом и вторая причина, но уже по существу вопроса, когда объект исследования (видимый исследователю в форме как закартированного структурного рисунка, так и адекватно описывающей его стереограммы) рассматривается как результат развития геодинамически однородных исходных и синхронных (по отношению к объекту) деформаций. Здесь ключевое для названного типа деформаций слово – «однородный». Это позволяет рассматривать геодинамику формирования структур анализируемого объекта только сугубо с общединамических позиций, когда будут известны лишь исходная для него (объекта) геодинамическая триада осей эллипсоида палеонапряжений (с условием, что  $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$ ) с точки зрения теории Кулона – Мора и соответствующий рисунок ассоциирующих с ними структур.

Детализация же узора суммарных стереограмм оказывается востребованной благодаря не только проблематике статистического изучения структур рудных месторождений (о которой мы говорили выше), но и развитию метода парагенетического анализа (Расцветаев, 1980, 1982, 1985,

1987а, 1987б и др.), его производных (Бурзунова, 2015<sup>2</sup>; Семинский, 1994, 2003; Семинский, Бурзунова, 2007; Семинский, Черемных, 2011 и др.) и аналогов (Парфенов, 1984; Ребецкий, 2002; Сорокин, 1976<sup>3</sup>, 1989<sup>4</sup> и др.) применительно к структурным объектам любого типа (не обязательно рудным).

Такие методы нацелены на исследование именно деталей и тонкостей распределения ориентировок (поясовых, конических и т. п.), поскольку эти детали позволяют определять не только показатели общей динамической обстановки, но и изучать сам характер процесса заложения и развития дислокационных структур, определяемых и контролируемых этой обстановкой.

Теоретической основой этих методов служит разрабатываемый с середины 70-х годов XX в. подход, рассматривающий любой структурный ансамбль как изначально геодинамически неоднородный, но все-таки упорядоченный в геолого-геометрическом отношении коллаж (метарисунок) дочерних структур и их сочетаний-парагенезов (соорганизующихся, как правило, в динамически и дислокационно обособленные структурные рисунки-домены), структурная канва которого (через различные сценарии – прямой или опосредованной – возрастной, иерархической, а то и генетической соподчиненности) как целое контролируется особенностями зарождения и эволюции материнских деформаций и полей напряжений<sup>5</sup>.

Рассматриваемый нами прием заключается в графическом снятии с каждой частной стереограммы (характеризующей станцию обсчета, то есть точку наблюдения/измерений) замеров вершин всех максимумов плотности полюсов (в виде точек с угловыми координатами). Из азов математической статистики следует, что это есть не что иное, как упрощенный вариант *метода модальной редукции (свертывания)* полимодальных выборок большого объема, являющийся частью графического разведочного анализа данных (Электронный ..., 1984–2015), в том числе и ориентированных (Белоусов и др., 1997, 2001; Грачев, Мухамедиев, 2000; Грачев, Морозов, 1993; Кноринг, 1969 и др.). А полимодальным является практически любой набор замеров ориентировок (особенно в разрывной тектонике). Суть нашей<sup>6</sup> версии метода такова: суммирование производится ступенчато с вовлечением в него только максимумов (мод) (читай: устойчивых элементов) промежуточных подвыборок (станций обсчета), отражающих априори особенности инфраструктуры полимодальной<sup>7</sup> подвыборки/выборки независимо от значений концентрации замеров в самих модах. Причем так, что величины максимумов нивелируются пропорционально величине плотности замеров в них, а сами они стягиваются в точки (в их вершинах), снимая тем самым негативное влияние объема выборки на проявление деталей ее инфраструктуры<sup>8</sup>. Так

<sup>2</sup> Бурзунова Ю.П. Сложные сети трещин в разломных зонах земной коры (результаты тектонофизического анализа): Дисс. канд. геол.-мин. наук. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2015. 150 с.

<sup>3</sup> Сорокин Б.К. Методика работ // Иванов Б.А., Сорокин Б.К., Уткин В.П. и др. Региональная тектоника Дальнегогорского рудного района: Отчет. Владивосток: ПГО Приморгеология, 1976. С. 31–61.

<sup>4</sup> Сорокин Б.К. Методика работ // Уткин В.П., Сорокин Б.К., Митрохин А.Н. и др. Геодинамика формирования рудо-контролирующих структур Придорожного месторождения: Отчет. Владивосток: ДВГИ ДВО АН СССР, 1989. С. 8–34.

<sup>5</sup> Типовые примеры: (1) для складкообразования – ритмичное чередование складок волочения и зон декомпрессии, соответственно, на крыльях и в замках складок первого порядка (зачастую в купе) с сообразным знакопеременным рисунком ассоциирующего с ними соскладчатого взбросо-надвигового кливажа (Уткин, 1980а, 1980б, 1989; Continental ..., 1994; Twiss et al., 2006 и др.); (2) для разрывообразования – сосуществование ареалов транспрессии и транстенсии с их чешуйчатыми веерами, соответственно, сжатия и растяжения, симметричных относительно зоны материнского разлома, также выступающего здесь в роли самостоятельной структурообразующей единицы (через свои движения) как генератора и регулятора иницирующего поля напряжений (Митрохин, 2012; Морозов, 2002; Осокина, 1989; Разломообразование ..., 1991; Уткин и др., 2004; Fossen, Tikoff, 1998; Mathieu et al., 2011; Park et al., 2008; Twiss et al., 2006; Wesnousky, 2005 и др.).

<sup>6</sup> Уточняем еще раз, что в нашем случае: непараметрический.

<sup>7</sup> Полимодальное распределение – это распределение, имеющее несколько мод (т. е. два или более «пика»). Полимодальность распределения часто может показывать, что выборка не является однородной и наблюдение порождены двумя или более наложенными распределениями (Электронный ..., 1984–2015).

Последнее для тектоники считается самым обычным явлением, перерастающим в правило. Особенно когда набор замеров в стереограмму осуществляется «валово» (полная аналогия с первичным забором образцов пород в пределах какого-нибудь интрузивного массива, например) (без разбраковки на строго генетически однозначные элементы (категории/признаки) типа слоистости, для разрывных дислокаций – левых/правых сдвигов, зон дробления и т. п. под грифом «трещиноватость») и т. д. Исключение составляют динамически «чистые» структуры (фиксируемые станцией подсчета), как то: единичная складка, поверхность разлома, зона тектонического рассланцевания и т. п., распределение элементов залегания которых может быть наверняка подогнано под стандартное распределение типа Гаусса – Фишера (нормальное) или Бингхэма (поясовое) (примеры: Чини, 1986). Но, когда такие «чистые» выборки сводятся воедино, негативное для параметрической статистики влияние полимодальности опять начинает брать свое.

или иначе, а графическая реализация этого приема очень проста и интуитивно понятна любому геологу, привыкшему оперировать массивами ориентированных данных, и не требует привлечения серьезного математического аппарата, основанного на параметрических гипотезах, как это мы видим, например, в работах (Белоусов и др., 1997, 2001; Грачев, Мухамедиев, 2000; Грачев, Морозов, 1993; Кноринг, 1969 и др.).

Проиллюстрируем сказанное на примере дизъюнктивной тектоники конкретного геологического объекта – Фестивального гидротермального месторождения, расположенного в Комсомольском оловорудном районе Хабаровского края. Так как оно очень хорошо известно (Асманов и др., 1988; Геология..., 1971; Дубровский и др., 1979; Касаткин и др., 1994; Огнянов, 1986; Сорокин и др., 1995 и др.), скажем только, что его разрез имеет двухчленное строение: синдвиговые рудоносные тела кварцевых турмалинитов рассекают как тесно сжатые, круто

залегающие терригенные породы доаптского складчатого основания, так и полого лежащие на нем с резким угловым и азимутальным несогласием породы апт-кампанского вулканогенного чехла. В соответствии с этим собранные нами данные по ориентировкам разрывов здесь сгруппированы в две выборки большого объема замеров (по основанию  $N_1 = 8092$  и чехлу  $N_2 = 6488$ ) (рисунок).

Приведенные на рисунке стереограммы есть результат применения двух указанных выше способов обобщения угловых измерений: посредством сквозного суммирования (стереограммы *a* и *b*) (берем его за эталон) и путем модального свертывания (*в* и *д*). Причем все стереограммы, и по параметрам обобщения, и по узору, полностью сопоставимы между собой: они построены с использованием «стандартного» метода – со скользящим окном в 1% площади стереограммы – и имеют одно и то же сечение изолиний плотности в узоре. Далее мы всю схему

Альтернативой для причинно-следственной (по смыслу) разбраковки распределений данных в однородные выборки/подвыборки для отдельной станции обобщения замеров элементов залегания служат уже динамо-геометрические критерии в рамках теории деформаций (поясовых и конических моделей как минимум). Что, однако, не служит препятствием для дальнейшего суммирования данных. Поскольку задачи разбраковки (с точки зрения деформационного анализа) могут быть осуществлены на любом этапе завершения процесса суммирования.

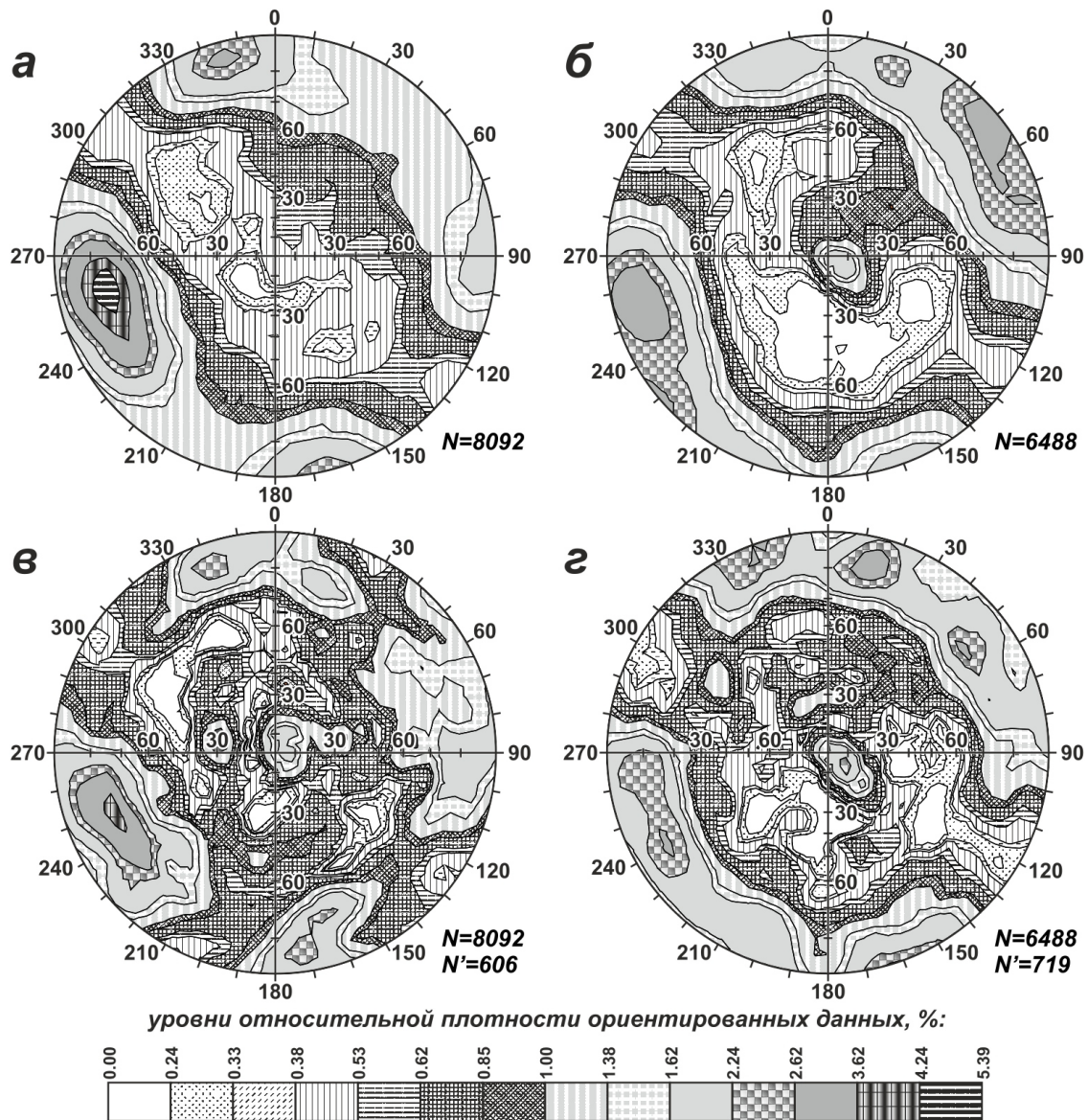
Так или иначе, наш прием позволяет исследователю получить удобоваримый вариант детализации обобщенных угловых измерений, не углубляясь без особой на то нужды в тонкости математической статистики, касающиеся вопросов однородности или наложенности/ (а еще и наследованности) выборок, сведенных в одну станцию обобщения.

<sup>8</sup> Иными словами, все максимумы независимо от их интенсивности рассматриваются здесь как значимые (!), без проведения какой-либо предварительной селекции максимумов на этот счет. Почему?

Во-первых, такой подход диктуется сутью самой проблемы, очерченной в начале настоящей статьи (см. Введение). В самом деле, любая селекция выбрасывает из рассмотрения максимумы низкой концентрации. На то и нацелены существующие при модальном свертывании количественные методики расчета порога значимости (это – 2-5% при  $\approx 100$  замерах для 1 частной стереограммы) (параметрические (Белоусов и др., 1997, 2001; Грачев, Морозов, 1993; Грачев, Мухамедиев, 2000; Кноринг, 1969 и др.), непараметрические (Бурзунова, 2015<sup>2</sup>)). Качественную оценку такого же рода тоже не стоит исключать (Бурзунова, 2015<sup>2</sup>). А это все ведет к упрощению рисунка стереограммы: сперва частной, а в итоге суммарной. Что противоречит нашей проблеме детализации итоговой (модально свернутой) стереограммы.

Во-вторых, этому способствовала специфика синдвиговых жильных и штокверковых рудно-магматических объектов Сихотэ-Алиня (на которых, собственно, и выросла наша проблема и ее решение) с многостадийным рудно-магматическим наполнением, фиксирующим поэтапно процесс объемного рассеяния дислокаций от эмбриональных (часто сосредоточенных) их форм путем их усложнения к зрелым (диссипативным) в рамках как минимум схем В. Риделя (Riedel, 1929) (в разломах-сдвигах) и Муди – Хилла (1960) (их крыльях) (Касаткин, 2011; Митрохин, 2012; Неволин, 1996; Сорокин и др. 1995; Сучков, 1989; Уткин, 1980а, 1980б, 1989 и др.). И, соответственно, при таких трендах эволюции рудоконтролирующих структур нам просто оставалось пойти вслед за В.А. Невским (1979), который, наверное, одним из первых сформулировал справедливую мысль о том, что на рудных объектах при решении вопросов происхождения трещин *не стоит удалять начальные изоконцентрации со стереограммы*, так как при этом искажается (упрощается) их узор, что существенно снижает ее информативность.

В-третьих, уж как-то так получилось, что конкретный объект, взятый нами для исследования (Фестивальное месторождение), оказался и самым сложным с точки зрения статистики в плане однородности подвыборок. Здесь все сложилось в случайности. И станции обобщения/наблюдений (чьи замеры представлены на рисунке в обобщенных выборках) сами имеют не только разномастный объем (27-453 замера), но и сугубо хаотичное распределение как по степени непрерывности снятия замеров, так и по географической (в координатах X, Y, Z) и геологической привязке. И то, что учитывались и компилировались замеры, сделанные разными авторами разной структурной квалификации в разные годы (геологами Комсомольской ГРЭ (1955-1993 гг.), Солнечной ГРЭ и Фестивального рудника (1986-1993 гг.); нами в 1989-2006 гг.). И в таких условиях, очевидно, трудно было бы выйти за пределы чисто частотного анализа ориентировок и их описательных характеристик.



Суммарные стереограммы относительной плотности разрывов в терригенном основании (а, в) и вулканогенно-осадочном чехле (б, г) на Фестивальном месторождении (Комсомольский район). Сетка Вульфа, верхняя полусфера. Стереограммы, выполненные посредством сквозного суммирования угловых данных из базисных выборок (а, б); стереограммы относительной плотности вершин максимумов (мод) плотности распределения полюсов разрывов (б, г), взятых с частных стереограмм (станций обсчета), которые характеризуют различные участки Фестивального месторождения.  $N$  – первичный объем базисной выборки;  $N'$  – объем базисной выборки после ее модального свертывания.

попытались сделать пошаговой, применительно к модальному суммированию (но не забывая при этом сравнивать его результаты с суммированием сквозным, см. рисунок).

**Шаг 1 (Вход).** В нашем примере выборки  $N_1$  и  $N_2$  объединяют в себе 68 и 53 станции обсчета соответственно, которые характеризуют собой отдельные точки/интервалы структурных наблюдений и массовых замеров элементов залегания (с разным объемом измерений: от 27 до 453). Именно они и послужили исходными данными для свертывания.

Для каждой из станций были отстроены частные (локальные) стереограммы, узор ко-

торых был получен графически «стандартным» методом: либо вручную (на сетке Пронина), либо с использованием надлежащего программного обеспечения (StereoNett, 2000).

**Шаг 2.** С каждой из этих стереограмм были сняты точки с угловыми координатами со всех без исключения вершин их максимумов (как главных, так и самых незначительных) независимо от величин плотности замеров в них. (Здесь уместен любой вариант снятия координат: как графический (путем поступательного наложения вершин мод с частной стереограммы на суммирующие кальки), так и путем их оцифровки для каждой стереограммы с подготовкой

соответствующих файлов для последующего суммирования оцифрованных данных в итоговые стереограммы (см. шаг 3)).

**Шаг 3.** Затем эти точки (моды) были сведены опять в 2 выборки объемами  $N'_1 = 606$  и  $N'_2 = 719$  замеров, которые представляют собой не что иное, как модально свернутые модификации исходных (базисных) выборок  $N_1$  и  $N_2$ , включающие в себя наиболее репрезентативные их части, чьи объемы ( $N'$ ) составляют уже всего 0.08-0.1 от  $N$ . Для каждой из них строим свои стереограммы. Повторимся: стереограммы  $v$  и  $g$  (для выборок  $N'_1$  и  $N'_2$ ) были построены опять же с помощью «стандартного» метода суммирования и интерполяции (тут для их построения возможен и графический (вручную), и компьютерный вариант).

**Шаг 4 (Выход).** Здесь у конечных модальных стереограмм (при сохранении общей канвы) получились узоры куда более рельефные и детальные, чем у их базисных аналогов (рисунок, стереограммы  $a, б, в, г$ ), прошедших через сквозное суммирование. В самом деле, модальные стереограммы  $v$  и  $g$  четко выдерживают в своих узорах исходные тенденции распределения ориентировок, которые имеют место на стереограммах  $a$  и  $б$ , с сохранением устойчивого местоположения основных их максимумов. А геометрия их поясовых и конических распределений делается при этом значительно более контрастной, особенно в областях с пологими углами падения. Модально свернутые выборки в зависимости от способа их получения могут храниться как в графическом, так и в цифровом исполнении.

Но, переходя уже к общему случаю, при выполнении шагов 1-4 необходимо держать в уме и тот вполне ожидаемый факт (особенно в нашем случае), что можно получить модально свернутую выборку объемом  $N'$  и более 1000 замеров. Тогда потребуется промежуточно объединять в новую подвыборку друг с другом 2 и более станции, дающие наиболее весомый вклад (по количеству мод) в конечную выборку (как правило, с наиболее сложным рельефом изоконцентраций при, судя по нашему опыту,  $N_{cm} \approx 100-400$  замеров). Соответственно, здесь потребуется возврат к шагам 1-4 с заикливанием через условный оператор с  $N' > 1000$ . Что может делать модальное свертывание многоступенчатым процессом.

## ОБСУЖДЕНИЕ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный пример показывает, что модальное свертывание демонстрирует очень высокую степень воспроизводимости инфраструктуры базисных выборок одновременно с реально ощутимым улучшением качества ее отображения при одних и тех же, подчеркнем,

параметрах обсчета и интерполяции. Мало того, глубина детализации узоров модальных стереограмм, даже полученных «стандартным» методом, уже вполне сопоставима со сквозным суммированием при  $s(\%) = 0.1-0.2\%$ , что, как уже говорилось, соответствует физической точности угловых измерений *in situ*. И это только при *однократном* свертывании. А оно, может быть и *многоступенчатым*, с тем чтобы объем сворачиваемой выборки  $N'$  не выходил за пределы 1000 как репера физической точности натуральных измерений. Это может достигаться объединением некоторой части станций обсчета в промежуточные подвыборки. Более того, тотальный охват всех мод ориентировок на любом этапе итераций ведет к тому, что именно сама статистика как таковая обеспечивает здесь роль объективного критерия для определения требуемой глубины детализации структуры базисной выборки.

Строго говоря, узор стереограммы с объемом выборки  $N$  на стереографической сетке площадью  $S$  и радиусом  $R$  с радиусом подсчетного окна  $r$  следует получать, исходя из соотношения  $r = R/N^{1/2}$ , при котором площадь окна  $s = \pi r^2$  будет составлять  $1/N$  площади сетки  $S$  с радиусом  $R$  (Пронин, 1949; Glamheden, Hökmark, 2010; Kamb, 1959 и др.). И, следовательно, чем больше  $N$ , тем меньше должна быть  $s$ . О чем, кстати, исследователи (включая разработчиков программного обеспечения), повторимся, зачастую забывают, пользуясь в обыденной практике только палетками в 1% с фиксированным  $r$  (типа планисфер Пронина или Ламберта) как «эталонном». Только поэтому мы ограничили рассмотрение особенностей работы модального свертывания лишь рамками «стандартной» процедуры. Хотя для увеличения глубины детализации инфраструктуры взятой в обработку выборки ориентировок до 1000 замеров (и несколько более) этот аналитический инструмент должен быть основополагающим, позволяющим обойтись и без применения процедур рассмотренного метода. Что может делать предлагаемый нами вариант комбинированным. Другое дело, что ключевым выигрышем такого модального свертывания является возможность получения корректной картины для выборок *сколь угодно большого* объема. Причем с попутным применением всего имеющегося аналитического арсенала, позволяющего исследователю уточнять надлежащим образом инфраструктуру исследуемой выборки ориентированных данных.

Остается только добавить, что еще одной выигрышной стороной метода модального свертывания является то, что в него заложена потенциальная возможность вовлечения вновь в «цифрооборот» хотя бы модальных данных со стереограмм и таблиц из опубликованных и

фондовых источников (где, понятно, результаты геолого-структурных исследований замкнуты только на себя, когда цифровые массивы недоступны), без подачи массивов первичных угловых измерений. Особенно это касается времени частого использования стереограмм в геолого-структурной практике, приходящегося на 60-70-е годы XX столетия, когда, собственно, и был сформулирован сам принцип избирательной фиксации и последующей статистической обработки угловых измерений только для стабильно развитых элементов инфраструктуры какого-либо геолого-структурного объекта (Ажгирей, 1966), одной из реализаций которого и является метод модального свертывания.

## Список литературы

- Ажгирей Г. Д.* Структурная геология. М.: Изд-во МГУ, 1966. 350 с.
- Асманов В.Я., Вокуев А.Л., Гоневчук В.Г. и др.* Металлогения Комсомольского рудного района // Металлогения главных оловорудных районов юга Дальнего Востока. Владивосток: ДВО АН СССР, 1988. С. 85-113.
- Белоусов Т.П., Куртасов С. Ф., Мухамедиев Ш.А.* Делимость земной коры и палеонапряжения в сейсмоактивных и нефтегазоносных регионах Земли. М.: ОИФЗ РАН, 1997. 324 с.
- Белоусов Т.П., Мухамедиев Ш.А., Куртасов С.Ф.* Трещиноватость палеозойских пород Кызылкумов, Узбекистан, Средняя Азия // Российский журнал наук о Земле. 2001. Т. 3. № 5. С. 331-350.
- Вольфсон Ф.И., Дюков А.И., Кушнарев И.П. и др.* Основные вопросы и методы изучения структур рудных полей и месторождений. М.: Гостеоллиздат, 1960. 624 с.
- Вольфсон Ф.И., Яковлев К.Д.* Структуры рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1975. 271 с.
- Геология, геохимия и минералогия Комсомольского района. М.: Наука, 1971. 336 с.
- Геологоструктурные методы изучения эндогенных месторождений. М.: Наука, 1982. 264 с.
- Горшков Г.П., Якушова А.Ф.* Общая геология: Изд. 3-е. М.: МГУ, 1973. 589 с.
- Грачев А.Ф., Морозов И.Б.* О выделении систем трещин // Физика Земли. 1993. № 8. С. 28-33.
- Грачев А.Ф., Мухамедиев Ш.А.* О трещиноватости каменноугольных известняков Московской синеклизы // Физика Земли. 2000. № 1. С. 61-77.
- Дубровский В.К., Малиновский Е.П., Родионов С.М.* Структура и зональность оловорудных месторождений Комсомольского района. М.: Наука, 1979. 136 с.
- Касаткин С.А.* Геодинамика формирования рудоконтролирующих структур Фестивального месторождения (Комсомольский рудный район): Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ДВГИ ДВО РАН, 2011. 28 с.
- Кноринг Л.Д.* Математические методы при изучении механизма образования тектонической трещиноватости. Л.: Недра, 1969. 88 с.
- Кушнарев И.П.* Методы изучения разрывных нарушений. М.: Недра, 1977. 248 с.
- Лир Ю.В., Козлов А.В.* Структуры рудных полей и месторождений: Лабораторн. практикум. СПб.: СПбГИ, 1993. 159 с.
- Мандыч В.А.* Структуры рудных полей и месторождений: задания к лабораторным работам для студентов специальности 0101 и методические указания по их выполнению и оформлению результатов. Владивосток: ДВПИ, 1981. 32 с.
- Мардиа К.* Статистический анализ угловых наблюдений. М.: Наука, 1978. 238 с.
- Мишин Н.И., Степина З.А., Панфилов А.Л.* Структурная организация рудных полей. СПб.: «Автор», 2007. 232 с.
- Митрохин А.Н.* Дизъюнктивные рудно-магматические структуры смыкания и дуплексы: идентификация, пути и методы их изучения // Современные технологии освоения минеральных ресурсов: Сб. научн. трудов. Вып. 10. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2012. С. 53-59.
- Морозов Ю.А.* Структурообразующая роль транспрессии и трансенсии // Геотектоника. 2002. № 6. С. 3-24.
- Муди Дж.Д., Хилл М.Дж.* Сдвиговая тектоника // Вопр. совр. зарубежной тектоники. М.: ИЛ, 1960. 265-333.
- Неволин П.Л.* Сдвиговая геодинамическая обстановка и структуры токверковых месторождений Сихотэ-Алиня // Тихоокеанская геология. 1996. Т. 15. № 2. С. 107-115.
- Невский В.А.* Трещинная тектоника рудных полей и месторождений. М.: Недра, 1979. 224 с.
- Огнянов Н.В.* Геология оловорудных районов и месторождений Монголо-Охотской оловонной области // Геология оловорудных месторождений СССР. Кн. 1. М.: Недра, 1986. С. 340-399.
- Осокина Д.Н.* Иерархические свойства тектонического поля напряжений // Экспериментальная тектоника: методы, результаты, перспективы. М.: Наука, 1989. С. 197-208.
- Парфенов В.Д.* К методике тектонофизического анализа геологических структур // Геотектоника. 1984. № 1. С. 60-72.
- Первушов Е.М., Ермохина Л.И.* Определение пространственного положения поверхностей геологических тел.: Учебн.-метод. пособие для студентов геологического факультета. Саратов: Наука, 2009. 51 с.
- Пронин А.В.* Статистическая обработка в стереографической проекции ориентированных вели-



- чин // Советская геология. 1949. Сб. 37. С. 41-50.
- Разломобразование в литосфере. Зоны сдвига. Новосибирск: Наука, 1991. 262 с.
- Расцветаев Л.М.* Закономерный структурный рисунок земной поверхности и его динамическая интерпретация // Проблемы глобальной корреляции геологических явлений. М.: Наука, 1980. С. 145-197. (Тр. ГИН АН СССР; Вып. 340).
- Расцветаев Л.М.* Структурные рисунки трещиноватости и их геомеханическая интерпретация // ДАН. 1982. Т. 267. № 4. С. 904-909.
- Расцветаев Л.М.* Некоторые общие модели дизъюнктивной тектонической деформации // Экспериментальная тектоника в теоретической и прикладной геологии. М.: Наука, 1985. С. 118-127.
- Расцветаев Л.М.* Выявление парагенетических семейств тектонических дизъюнктивов как метод палеогеомеханического анализа полей напряжений и деформаций земной коры // Поля напряжений и деформаций в земной коре. М.: Наука, 1987а. С. 171-181.
- Расцветаев Л.М.* Парагенетический метод структурного анализа дизъюнктивных тектонических нарушений // Проблемы структурной геологии и физики тектонических процессов. М.: ГИН АН СССР, 1987б. С. 173-235.
- Ребецкий Ю.Л.* Обзор методов реконструкции тектонических напряжений и сейсмоструктурных деформаций // Тектонофизика сегодня. М.: Изд-во ОИФЗ, 2002. С. 227-243.
- Рылов А.П., Тимофеев Е.П.* Горная геометрия. М.: Недра, 1975. 231 с.
- Светозаров В.В.* Основы статистической обработки результатов измерений: Учебн. пособие. М.: Изд-во МИФИ, 2005. 40 с.
- Семинский К.Ж.* Принципы и этапы спецкартирования разломно-блоковой структуры на основе изучения трещиноватости // Геология и геофизика. 1994. Т. 35, № 9. С. 112-130.
- Семинский К.Ж.* Внутренняя структура континентальных разломных зон. Тектонофизический аспект. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2003. 243 с.
- Семинский К.Ж., Бурзунова Ю.П.* Новый подход к анализу хаотической трещиноватости вблизи разломных сместителей // Геология и геофизика. 2007. Т. 48. № 3. С. 330-343.
- Семинский К.Ж., Черемных А.В.* Трещинные сети и напряженное состояние кайнозойских осадков Байкальского рифта: новые возможности структурно-парагенетического анализа // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 3. С. 450-469.
- Сорокин Б.К., Митрохин А.Н., Касаткин С.А.* Сравнительный анализ дислокаций апт-кампанского вулканогенного и доаптского триасового комплексов Комсомольского района (на примере Фестивального месторождения) // Тихоокеанская геология. 1995. Т. 14. № 5. С. 46-56.
- Старостин В.И., Дергачев А.Л., Семинский Ж.В.* Структуры рудных полей и месторождений: Учебник. М.: Изд-во МГУ, 2002. 352 с.
- Сучков В.И.* Геолого-структурные условия размещения оруденения в центральной части Комсомольского рудного района: Автореф. дисс. канд. геол.-мин. наук. Владивосток: ДВО АН СССР, 1989. 23 с.
- Уткин В.П.* Роли переориентировок напряжений в формировании месторождений // Изв. вузов. Геология и разведка. 1980а. № 5. С. 43-49.
- Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации и методика их изучения. М.: Наука, 1980б. 144 с.
- Уткин В.П.* Сдвиговые дислокации, магматизм и рудообразование. М.: Наука, 1989. 166 с.
- Уткин В.П., Митрохин А.Н., Неволин П.Л. и др.* Структурно-геодинамический фактор в распределении золотой минерализации Южного Приморья // ДАН. 2004. Т. 394. № 5. С. 654-658.
- Чини Р.Ф.* Статистические методы в геологии. Гл. 9: Ориентировки в трехмерном пространстве. М: Мир, 1986. С. 123-143.
- Шерман С.И., Днепровский Ю.И.* Поля напряжений земной коры и геолого-структурные методы их изучения. Новосибирск: Наука, 1989. 158 с.
- Электронный учебник по статистике. М: StatSoft Inc., 1984-2015. (WEB: <http://www.statsoft.ru/home/textbook/default.htm>).
- Ampferer O., Sander B.* Tektonische Verkupfung von Kalk- und Zentral alpen in Wien Verhandlungen der Geologischen Bundesanstalt, 1920. P. 119-131.
- Continental deformation. New York: Pergamon Press Ltd., 1994. 421 p.
- Fossen H., Tikoff B.* 1998. Extended models of transpression and transtension, and application to tectonic settings // Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. Geol. Soc. London Spec. Pub. 1998. V. 135. P. 15-33.
- Glamheden R., Hökmark H.* Creep in jointed rock masses. State of knowledge. Stockholm: Svensk Kärnbränslehantering AB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co.), 2010. 51 p.
- Kamb W.B.* Ice petrofabric observations from the Blue glacier, Washington, in relation to the theory and experiment // J. Geophys. Res. 1959. V. 64. № 11. P. 1891-1909.
- Mathieu L., van Wyk de Vries B., Pilato M. et al.* The interaction between volcanoes and strike-slip, transtensional and transpressional fault zones: Analogue models and natural examples // Journal of Structural Geology. 2011. № 33. P. 898-906.
- Park A.F., Lentz D.R., Thorne K.G.* Deformation and Structural Controls on Gold Mineralization in the

- Clarence Stream Shear Zone, Southwestern New Brunswick, Canada // *Exploration and Mining Geology*. 2008. V. 17. № 1. P. 51-66.
- Riedel W.* Zur mechanik geologischer Brucherscheinungen // *Cent. Miner., Geol. and Paleontol. Bull.* 1929. V. 1. P. 78-97.
- Sander B.* Geologische Student am Westende der Hohen Tauern II. *Jahrb Geologischen Staat in Wien*. 1921. V. 70. P. 273-296.
- StereoNett: a tool to display, change and analyze orientation data, version 2.46, 21.08.2000 / Duyster J.P., Institute for Geology, Ruhr University Bochum, Germany (<http://www.ruhr-uni-bochum.de/hardrock/downloads.html>).
- Twiss R.J., Moores E.M.* *Structural Geology: Second Edition*. New York: W.H. Freeman and Co., 2006. 532 p.
- Wesnousky S.G.* The San Andreas and Walker Lane fault systems, western North America: transpression, transtension, cumulative slip and the structural evolution of a major transform plate boundary // *Journal of Structural Geology*. 2005. № 27. P. 1505-1512.

**AN ALGORITHM TO SPECIFY TOTAL STEREOGRAMS' PATTERNS IN DENSITY ISOCONCENTRATIONS OF ANGLED DATA FOR LARGE SAMPLES (CASE STUDY FOR STRUCTURES OF ORE DEPOSITS)**

**A.N. Mitrokhin, V.P. Utkin, P.L. Nevolin**

*Far East Geological Institute, FEB RAS; Vladivostok, 690022*

The paper presents a graphic implementation of method of modal reduction for large samples under the statistical analysis of angled data on their isoconcentrations' stereograms. It is algorithmically simple: statistical treatment includes only (but however all!) modes (maximum) of orientations taken from the particular stereograms of local observing stations (subsamples), which are covered by the base large sample. Topicality, efficiency, reproducibility and significantly higher resolution of this method are shown in comparison with traditionally applied through summation of the complete base massif of angled data. It allows studying geological objects with structural patterns of any complexity level (including ore-bearing) without application of categorization procedures of the orientations' samples according one or another geological criteria.

*Keywords: basic grand sample, total/particular stereogram, isoconcentrations, modal reduction.*