

УДК 550.34

Калысова Ж., Мураталиева Ж.,
Омуралиев М., Омуралиева А.
Институт сейсмологии НАН КР,
г. Бишкек, Кыргызстан

АНАЛИЗ ВЗАИМОСВЯЗИ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ, ГЕОФИЗИЧЕСКИХ, НЕОТЕКТОНИЧЕСКИХ КРИТЕРИЕВ СЕЙСМИЧНОСТИ И ОЦЕНКА ИХ ВЕСОВ (ВКЛАДОВ) ДЛЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО РАЙОНИРОВАНИЯ

Аннотация. В статье описана методика анализа взаимосвязи геологических, геофизических, неотектонических критериев сейсмичности и весовая их оценка для сейсмического районирования на основах теории множеств, графов и матриц.

Ключевые слова: геологические, геофизические, неотектонические критерии, сейсмичность, вес (вклад), сейсмическое районирование.

СЕЙСМИКАЛУУЛУКТУН ГЕОЛОГИЯЛЫК, ГЕОФИЗИКАЛЫК, НЕОТЕКТОНИКАЛЫК КРИТЕРИЙЛЕРИНИН ӨЗ АРА БАЙЛАНЫШЫН ТАЛДОО ЖАНА СЕЙСМИКАЛЫК РАЙОНДОШТУРУУ ҮЧҮН АЛАРДЫН САЛМАКТАРЫН (САЛЫМДАРЫН) БААЛОО

Кыскача мазмуну. Макалада сейсмикалуулуктун геологиялык, геофизикалык, неотектоникалык критерийлеринин өз ара байланышын талдоо методикасы жана көптүктөр (топтор), графтар жана матрицалар теорияларынын негиздеринде сейсмикалык райондоштуруу үчүн алардын салмактарын (салымдарын) баалоо баяндалган.

Негизги сөздөр: геологиялык, геофизикалык, неотектоникалык критерийлер, сейсмикалуулук, салмак (салым), сейсмикалык райондоштуруу.

ANALYSIS OF THE RELATIONSHIP AMONG GEOLOGICAL, GEOPHYSICAL, NEOTECTONIC CRITERIAS OF SEISMICITY AND ASSESSMENT OF THEIR WEIGHTS (CONTRIBUTIONS) FOR SEISMIC ZONING

Abstract. A methodology for analyzing the relationship among geological, geophysical, and neotectonic criterias of seismicity and assessment of their weights (contributions) for seismic zoning based on the theories of graph and matrices is described in the article.

Keywords: geological, geophysical, neotectonic criteria, seismicity, weight (contribution), seismic zoning.

При проведении сейсмостектонического анализа и сейсмического районирования изучаются сложные взаимосвязи между сейсмичностью, геологическим строением и геодинамическими процессами. Существует значительное количество критериев, характеризующих сейсмический режим, таких как геологический, геофизический и т.д., при этом число критериев меняется в зависимости от участка. Соответственно, задачи сейсмостектонического анализа и сейсмического районирования являются, используя язык математики, задачами большой размерности.

С 70-х годов при исследованиях в области сейсмостектоники и сейсмического районирования выделилось направление комплексного использования разнообразных геологических и геофизических данных с помощью их формализации и компьютерной обработки, которое отражено в работах А.А. Борисова, Г.А. Шенкаревой [1], И.М.

Гельфанда и др. [3], А.А. Борисова [2], Н.И. Николаева, П.Н. Николаева [4,5], П.Н. Николаева [6,7], Г.И. Рейнера [8] и др. Результаты их работ служат основой современного сейсмотектонического анализа и сейсмического районирования [9]. Однако в их методиках имеются некоторые недостатки. А именно, при весовой оценке (вклада) геологических и геофизических критериев сейсмичности учитываются их взаимосвязи и взаимоотношения, предопределяющие основные параметры землетрясений (энергетические параметры, затухание и т.д.). Следует отметить, что много условностей существует при весовой оценке магнитуды.

Наиболее оптимальным подходом для объективного сейсмотектонического анализа и осуществления сейсмического районирования является использование методов дискретной математики — теории множеств, графов и матриц [10]. Так, характеристики сейсмичности и геологического строения составляют множества. Над этим множеством можно проводить операции объединения \cup , пересечения \cap , разности / и дополнения —. Для обозначения связи между объектами (элементами) множества вводится понятие «отношения». Совокупность множества с заданным в нём бинарным отношением Γ называется графом G . Здесь объекты представляются вершинами, а отношения (связи) между этими объектами — рёбрами (дугами). Последовательность рёбер называется цепью. Число рёбер цепи — её длиной. Цепь, в которой совпадают конечные вершины, называется циклом. Циклы как бы окантуют грани графа. Число рёбер (дуг), инцидентных вершине U , называется степенью $S(u)$ этой вершины. Граф G является связным, если любая пара его вершин соединена цепью. В связном графе, имеющем b -вершин и p -рёбер, определяется цикломатическое число:

$$\lambda(G) = p - b + 1,$$

являющееся числом ассоциаций признаков сейсмичности. Степень «размазанности» в результате накладки связей объектов — наложения (пересечение) рёбер графа, можно оценить величиной $t(G)$ — толщиной графа. Нижняя оценка толщины графа определяется неравенством:

$$t(G) \geq 1 +] \frac{\sum_{i=1}^n S_i - 2}{6(n - 2)} [,$$

где,] [— целая часть, n — число вершин, S_i — степень i -й вершины.

Определённый интерес для классификации графов, соответственно для сейсмотектонического районирования, представляет хроматическое число — минимальное число цветов для раскраски графа. Нижнее хроматическое число определяется оценкой Геллера.

$$h(G) \geq \left[\frac{|V(G)|^2}{|V(G)|^2 - 2|U(G)|} \right],$$

где $V(G)$ и $U(G)$ — вершины и рёбра графа G , а верхнее хроматическое число

$$h(G) \leq S_{max} + 1,$$

где S_{max} - наибольшее значение степени вершин.

Сопоставим каждой вершине b_i графа вес w_i из множества весов $W = \{w_i\}$, $i = 1, 2, \dots, n$. В результате получим множество взвешенных вершин $\{(b_i, w_i)\}$. Сопоставим каждому ребру r_i множество связей вес m_i из множества весов $M = \{m_i\}$, $i = 1, 2, \dots, k$.

В результате получим множество взвешенных рёбер $\{(r_i, m_i)\}$. Множество взвешенных вершин и дуг определяют в совокупности взвешенный граф. Если связи между объектами направлены, то имеем ориентированный граф. Здесь рёбра (дуги) представляются векторными величинами.

Бинарное отношение (бинарную связь) можно задать в виде матрицы смежности, каждой строке (столбцу) которой взаимно однозначно сопоставляют элемент множества. Тогда каждая клетка взаимно однозначно соответствует связям или весам вершин и дуг (рёбер). При этом веса вершин графа можно задать в виде столбцовой матрицы, а веса дуг — в виде диагональной матрицы порядка k .

Возводя в квадрат матрицы смежности, определяем множество цепей длины 2; в куб — множество цепей длины 3 и т.д. Элемент матрицы S^n представляет собой множество цепей длины n . В таблице 1 и рисунке 1 приведена матрица смежности и граф основных структурно-вещественных образований в земной коре орогенов и прилегающих к ним платформ. Элементы матрицы или рёбра графа отражают связи (отношения) рассматриваемых объектов. Например, C_{12} означает структурно-вещественные характеристики границ районов с гранитогнейсовым и меланократовым догеосинклинальными основаниями; C_{13} и C_{23} представляют характеристики крутых крыльев мегантиклинали, развитых, соответственно, в районах с гранитогнейсовым и меланократовым основанием. Множество цепей длины 2 с начальной вершиной ГГО — гранитогнейсовое основание, приведены в виде таблицы 2. Здесь, в I-й строке приведено множество связей границ районов с гранитогнейсовым и меланократовым основаниями, с остальными рассматриваемыми образованиями; во II-й строке — множество связей крутого крыла мегантиклинали, развитой в районе с гранитогнейсовым основанием, с остальными образованиями; в III-й строке - множество связей пологого крыла мегантиклинали, развитой в районе с гранитогнейсовым основанием; в IV-й строке — множество связей зоны низких предгорий, развитой в районе с гранитогнейсовым основанием; в V-й строке — множество связей пологого крыла мегасинклинали, развитой в районе с гранита-гнейсовым основанием; в VI-й строке — множество связей крутого крыла мегасинклинали, развитой в районе с гранитогнейсовым основанием; в VII-й строке — множество связей зоны краевого разлома, развитой в районе с гранита-гнейсовым основанием; в VIII-й строке — множество связей центрального внутривпадинного поднятия, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием; в IX-й строке — множество связей периклинали поднятия, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием; в X-й строке — множество связей центриклинали прогибов (мегасинклинали), развитых в районе с гранитогнейсовым основанием; в XI-й строке — множество связей поперечного поднятия, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием; в XII-й строке — множество связей поперечного прогиба, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием, в XIII-й строке множество связей диагонального поднятия, осложненного флексурно-разрывной зоной, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием; в XIV-й строке - множество связей поперечного регионального линеамента, развитого в районе с гранитогнейсовым основанием.

Таблица 1. Матрица смежностей основных структурно-вещественных образований в земной коре орогена и примыкающих к ним платформ.

№	Структурно-вещественные образования	ГТО	МКО	КМА	ЗНП	ПМА	КМС	ПМС	ЗКР	ЦВП	ПрР	ЦМС	ПП	ППр	ДФЗ	ПРЛ
1	Гранитоидное основание (ГТО)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	Гранитоидное основание (ГТО)	C ₁₂	C ₁₃	C ₁₄	C ₁₅	C ₁₆	C ₁₇	C ₁₈	C ₁₉	C ₁₉	X ₁₀	X ₁₁	X ₁₂	X ₁₃	X ₁₄	X ₁₅
2	Метаморфическое основание (МКО)	C ₂₁		C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉	X ₂₀	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅
3	Крутое крыло мегантиклинали (КМА)	C ₃₁	C ₃₂		C ₃₄	C ₃₅	C ₃₆		C ₃₈		X ₃₀		X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅
4	Зона низких прогибов (ЗНП)	C ₄₁	C ₄₂	C ₄₃		C ₄₆			C ₄₈		X ₄₀	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅
5	Пологие крыло мегантиклинали (ПМА)	C ₅₁	C ₅₂	C ₅₃				C ₅₇			X ₅₀	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅
6	Крутое крыло мегасинклинали (КМС)	C ₆₁	C ₆₂	C ₆₃	C ₆₄			C ₆₇	C ₆₈		X ₆₀	X ₆₁	X ₆₂	X ₆₃	X ₆₄	X ₆₅
7	Пологие крыло мегасинклинали (ПМС)	C ₇₁	C ₇₂			C ₇₅	C ₇₆				X ₇₀	X ₇₁	X ₇₂	X ₇₃	X ₇₄	X ₇₅
8	Зона краевого разлома (ЗКР)	C ₈₁	C ₈₂	C ₈₃	C ₈₄		C ₈₆				X ₈₀	X ₈₁	X ₈₂	X ₈₃	X ₈₄	X ₈₅
9	Центральное внутривпадинное поднятие (ЦВП)	C ₉₁	C ₉₂					C ₉₇			X ₉₀	X ₉₁	X ₉₂	X ₉₃	X ₉₄	X ₉₅
10	Периклираль поднятия (ПрП)	X ₀₁	X ₀₂	X ₀₃	X ₀₄	X ₀₅	X ₀₆	X ₀₇	X ₀₈	X ₀₉		Y ₀₁	Y ₀₂	Y ₀₃	Y ₀₄	Y ₀₅
11	Центриклираль мегасинклинали (ЦМС)	X ₁₁	X ₁₂		X ₁₄	X ₁₅	X ₁₆	X ₁₇	X ₁₈	X ₁₉	Y ₁₀		Y ₁₂	Y ₁₃	Y ₁₄	Y ₁₅
12	Поперечное поднятие (ПП)	X ₂₁	X ₂₂	X ₂₃	X ₂₄	X ₂₅	X ₂₆	X ₂₇	X ₂₈	X ₂₉		Y ₂₀	Y ₂₁		Y ₂₄	Y ₂₅
13	Поперечное прогибание (ППр)	X ₃₁	X ₃₂	X ₃₃	X ₃₄	X ₃₅	X ₃₆	X ₃₇	X ₃₈	X ₃₉		Y ₃₁	Y ₃₂	Y ₃₃	Y ₃₄	Y ₃₅
14	Диагональное поднятие и флексурно-разрывная зона (ДФЗ)	X ₄₁	X ₄₂	X ₄₃	X ₄₄	X ₄₅	X ₄₆	X ₄₇	X ₄₈	X ₄₉	Y ₄₀	Y ₄₁	Y ₄₂	Y ₄₃	Y ₄₄	Y ₄₅
15	Поперечный региональный линеймент (ПРЛ)	X ₅₁	X ₅₂	X ₅₃	X ₅₄	X ₅₅	X ₅₆	X ₅₇	X ₅₈	X ₅₉	Y ₅₀	Y ₅₁	Y ₅₂	Y ₅₃	Y ₅₄	

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
I	C ² ₁₂		C ₁₂ C ₃₃	C ₁₂ C ₂₄	C ₁₂ C ₂₅	C ₁₂ C ₂₆	C ₁₂ C ₂₇	C ₁₂ C ₂₈	C ₁₂ C ₂₉	C ₁₂ X ₃₀	C ₁₂ X ₃₁	C ₁₂ X ₃₂	C ₁₂ X ₃₃	C ₁₂ X ₃₄	C ₁₂ X ₃₅
II	C ² ₁₃	C ₁₃ C ₃₂		C ₁₃ C ₃₄	C ₁₃ C ₃₅	C ₁₃ C ₃₆		C ₁₃ C ₃₈		C ₁₃ X ₃₀		C ₁₃ X ₃₂	C ₁₃ X ₃₃	C ₁₃ X ₃₄	C ₁₃ X ₃₅
III	C ² ₁₄	C ₁₄ C ₄₂	C ₁₄ C ₄₃			C ₁₄ C ₄₆		C ₁₄ C ₄₈		C ₁₄ X ₄₀	C ₁₄ X ₄₁	C ₁₄ X ₄₂	C ₁₄ X ₄₃	C ₁₄ X ₄₄	C ₁₄ X ₄₅
IV	C ² ₁₅	C ₁₅ C ₅₂	C ₁₅ C ₅₃	C ₁₅ C ₅₄			C ₁₅ C ₅₇		C ₁₅ C ₅₈	C ₁₅ X ₅₀	C ₁₅ X ₅₁	C ₁₅ X ₅₂	C ₁₅ X ₅₃	C ₁₅ X ₅₄	C ₁₅ X ₅₅
V	C ² ₁₆	C ₁₆ C ₆₂	C ₁₆ C ₆₃	C ₁₆ C ₆₄			C ₁₆ C ₆₇	C ₁₆ C ₆₈		C ₁₆ X ₆₀	C ₁₆ X ₆₁	C ₁₆ X ₆₂	C ₁₆ X ₆₃	C ₁₆ X ₆₄	C ₁₆ X ₆₅
VI	C ² ₁₇	C ₁₇ C ₇₂			C ₁₇ C ₇₅	C ₁₇ C ₇₆		C ₁₇ C ₇₉	C ₁₇ C ₇₉	C ₁₇ X ₇₀	C ₁₇ X ₇₁	C ₁₇ X ₇₂	C ₁₇ X ₇₃	C ₁₇ X ₇₄	C ₁₇ X ₇₅
VII	C ² ₁₈	C ₁₈ C ₈₂	C ₁₈ C ₈₃	C ₁₈ C ₈₄		C ₈₂ C ₈₆				C ₁₈ X ₈₀	C ₁₈ X ₈₁	C ₁₈ X ₈₂	C ₁₈ X ₈₃	C ₁₈ X ₈₄	C ₁₈ X ₈₅
VIII	C ² ₁₉	C ₁₉ C ₉₂					C ₁₉ C ₉₇			C ₁₉ X ₉₀	C ₁₉ X ₉₁	C ₁₉ X ₉₂	C ₁₉ X ₉₃	C ₁₉ X ₉₄	C ₁₉ X ₉₅
IX	X ² ₁₀	X ₁₀ X ₀₂	X ₁₀ X ₀₃	X ₁₀ X ₀₄	X ₁₀ X ₀₅	X ₁₀ X ₀₆	X ₁₀ X ₀₇	X ₁₀ X ₀₈	X ₁₀ X ₀₉		X ₁₀ Y ₀₁	X ₁₀ Y ₀₂	X ₁₀ Y ₀₃	X ₁₀ Y ₀₄	X ₁₀ Y ₀₅
X	X ² ₁₁	X ₁₁ X ₁₂		X ₁₁ X ₁₄	X ₁₁ X ₁₅	X ₁₁ X ₁₆	X ₁₁ X ₁₇	X ₁₁ X ₁₈	X ₁₁ X ₁₉	X ₁₁ Y ₁₀		X ₁₁ Y ₁₂	X ₁₁ Y ₁₃	X ₁₁ Y ₁₄	X ₁₁ Y ₁₅
XI	X ² ₁₂	X ₁₂ X ₂₂	X ₁₂ X ₂₃	X ₁₂ X ₂₄	X ₁₂ X ₂₅	X ₁₂ X ₂₆	X ₁₂ X ₂₇	X ₁₂ X ₂₈	X ₁₂ X ₂₉	X ₁₂ Y ₂₀	X ₁₂ Y ₂₁			X ₁₂ Y ₂₄	X ₁₂ Y ₂₅
XII	X ² ₁₃	X ₁₃ X ₃₂	X ₁₃ X ₃₃	X ₁₃ X ₃₄	X ₁₃ X ₃₅	X ₁₃ X ₃₆	X ₁₃ X ₃₇	X ₁₃ X ₃₈	X ₁₃ X ₃₉	X ₁₃ Y ₃₀	X ₁₃ Y ₃₁			X ₁₃ Y ₃₄	X ₁₃ Y ₃₅
XIII	X ² ₁₄	X ₁₄ X ₄₂	X ₁₄ X ₄₃	X ₁₄ X ₄₄	X ₁₄ X ₄₅	X ₁₄ X ₄₆	X ₁₄ X ₄₇	X ₁₄ X ₄₈	X ₁₄ X ₄₉	X ₁₄ Y ₄₀	X ₁₄ Y ₄₁	X ₁₄ Y ₄₂	X ₁₄ Y ₄₃		X ₁₄ Y ₄₅
XIV	X ² ₁₅	X ₁₅ X ₅₂	X ₁₅ X ₅₃	X ₁₅ X ₅₄	X ₁₅ X ₅₅	X ₁₅ X ₅₆	X ₁₅ X ₅₇	X ₁₅ X ₅₈	X ₁₅ X ₅₉	X ₁₅ Y ₅₀	X ₁₅ Y ₅₁	X ₁₅ Y ₅₂	X ₁₅ Y ₅₃	X ₁₅ Y ₅₄	

Таблица 2.

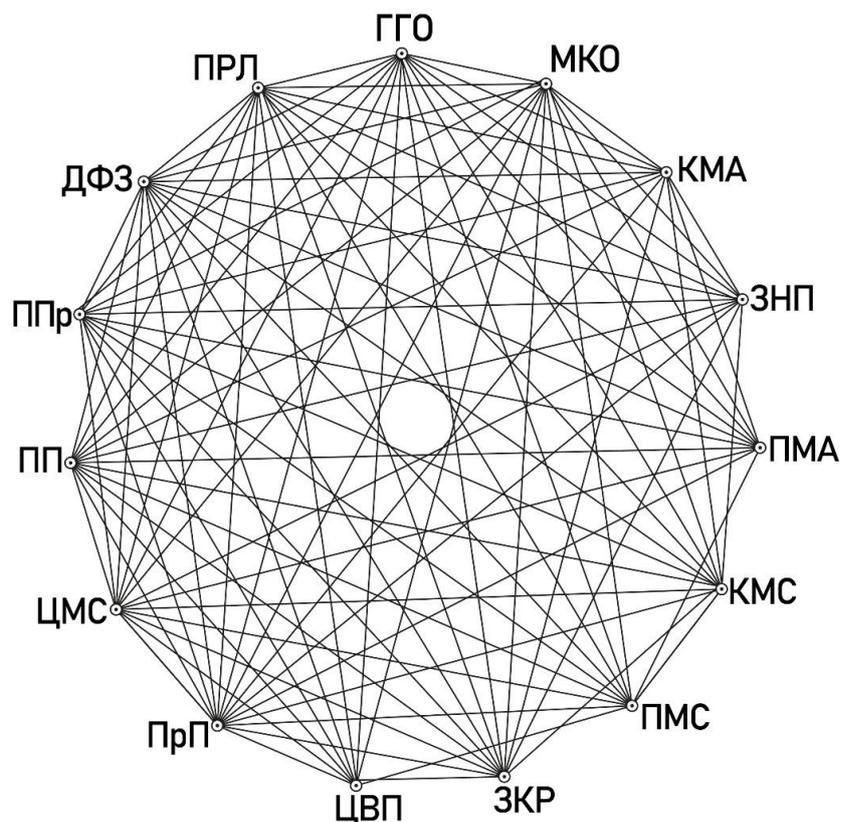


Рисунок 1. Граф взаимосвязей основных структурно-вещественных образований в земной коре орогенов и прилегающих к ним платформ. Условные обозначения вершин графа приведены в таблице 1.

Рассматриваемый граф структурно-вещественных образований имеет 120 рёбер и 15 вершин. При этом одна вершина имеет степень 9; одна вершина — степень 10; четыре вершины — степень 11; три вершины — степень 13; остальные четыре вершины — степень 14. Цикломатическое число графа

$$\lambda(G) = 120 - 15 + 1 = 106,$$

т. е. граф может иметь 106 граней, что представляет собой своеобразное число ассоциаций структурно-вещественных образований. Число ассоциаций может быть увеличено включением ещё петрографических и других характеристик среды и процессов.

Следует отметить, что немалое число отношений (связей) объектов может быть «размазано». Этот вопрос можно решить определением толщины графа.

$$t(G) \geq 1 + \frac{184-2}{6(15-2)} = 3.$$

Это значит, что вершины рассматриваемого графа следует располагать на не менее, чем трёх поверхностях, чтобы её дуги (рёбра) не пересекались. Хроматическое число данного графа $h(G)$ равно 15.

В таблице 3 приведены особенности связей (отношений) структурно-вещественных образований в районах некоторых сильных землетрясений Кыргызстана. Определим интенсивность участия рёбер в заданном событии S , другими словами, степень участия связей структурно-вещественных образований. Для этого вычислим производную $\partial G/\partial S$ графа по событию S . Событием S может быть, например, образование множеством рёбер

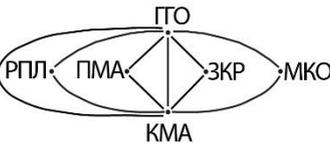
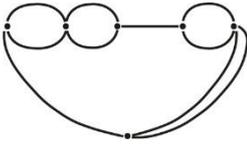
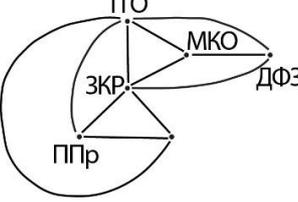
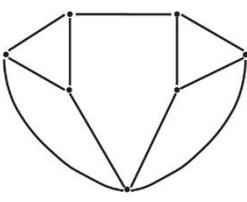
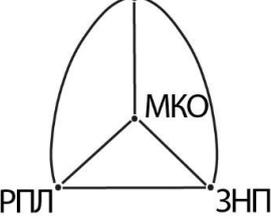
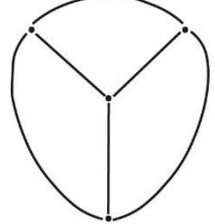
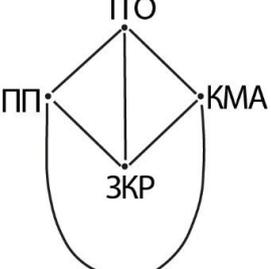
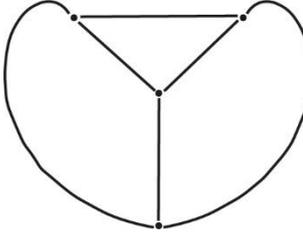
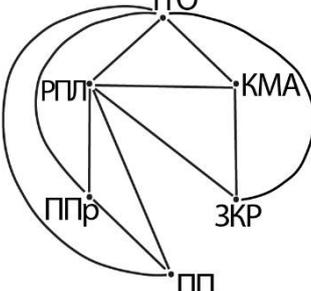
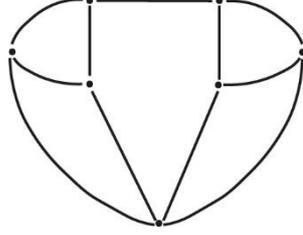
состава графа G или образованием множеством рёбер цикла графа G, т.е. образованием разных совокупностей связей, которые проявляются по мере созревания землетрясения.

Производной $\frac{\partial S}{\partial S}$ графа по событию S называется неориентированный взвешенный граф, носитель которого совпадает с носителем модели, определяемой этим событием, и пара вершин (U_i, U_j) взвешена отношением частоты $(F_i - F_{ij}) + (F_j - F_{ij})$ их несовместного участия к частоте F_{ij} совместного участия в событии S:

$$\frac{\partial G}{\partial S}(U_i, U_j) = \frac{F_i - 2F_{ij} + F_j}{F_{ij}}$$

Таблица 3 - Графы структурно-вещественных образований некоторых сильных землетрясений.

Название, год, магнитуда		Граф	Двойной граф
1	2	3	4
Беловодское, 1885 M = 6.9	$\Sigma Si = 12$ $S_{max} = 4$ $\lambda(G) = 3$ $2 \leq h(G) \leq 5$		
Верненское, 1887 M = 7.3	$\Sigma Si = 16$ $S_{max} = 4$ $\lambda(G) = 6$ $h(G) = 5$		
Кеминское, 1911 M = 8.2	$\Sigma Si = 24$ $S_{max} = 5$ $\lambda(G) = 7$ $3 \leq h(G) \leq 5$		
Кемино-Чуйское, 1938 M = 6.9	$\Sigma Si = 16$ $S_{max} = 4$ $\lambda(G) = 4$ $2 \leq h(G) \leq 4$		
Сарыкамышское, 1970 M = 6.8	$\Sigma Si = 12$ $S_{max} = 3$ $\lambda(G) = 3$ $h(G) = 4$		

<p>Жаланаш — Тюпское 1978 M = 6.5</p>	<p>$\sum S_i = 20$ $S_{max} = 6$ $\lambda(G) = 5$ $h(G) = 7$</p>		
<p>Чаткальское 1946 M = 7.0</p>	<p>$\sum S_i = 22$ $S_{max} = 5$ $\lambda(G) = 5$ $2 \leq h(G) \leq 6$</p>		
<p>Исфара – Баткенское 1978 M = 6.4</p>	<p>$\sum S_i = 12$ $S_{max} = 3$ $\lambda(G) = 3$ $h(G) = 4$</p>		
<p>Маркансуйское 1974 M = 7.3</p>	<p>$\sum S_i = 12$ $S_{max} = 3$ $\lambda(G) = 3$ $h(G) = 4$</p>		
<p>Заалайское (Алайское) 1978 M = 6.8</p>	<p>$\sum S_i = 22$ $S_{max} = 5$ $\lambda(G) = 5$ $2 \leq h(G) \leq 6$</p>		

При этом частотная матрица отношений F и матрица инцидентности Q удовлетворяют соотношению:

$$F = Q^T \cdot Q,$$

где Q^T — транспонированная матрица Q . Вычислим производную графа Сарыкамышского землетрясения (рисунок 2 (а)). Граф его содержит 12 остовов (рисунок 2 (б)). Матрица инцидентности имеет следующий вид:

$$Q = \begin{pmatrix} a & b & c & d & e & f \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Частотная матрица отношений F , соответствующая матрице Q :

$$F = Q^T \cdot Q = \begin{pmatrix} a & b & c & d & e & f \\ 7 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2 \\ 3 & 6 & 2 & 2 & 3 & 1 \\ 3 & 2 & 6 & 2 & 3 & 2 \\ 3 & 2 & 2 & 6 & 3 & 1 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 7 & 2 \\ 2 & 1 & 2 & 1 & 2 & 4 \end{pmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}$$

Вычисляя значения производной на рёбрах графа (на связях объектов), получим граф:

$$\frac{\partial G}{\partial S} \text{ (рисунок 2 (в))}$$

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{pmatrix} a & b & c & d & e & f \\ - & 2,3 & 2,3 & 2,3 & 2,6 & 1,6 \\ 2,3 & - & 4 & 4 & 2,3 & 8 \\ 2,3 & 4 & - & 4 & 2,3 & 3 \\ 2,3 & 4 & 4 & - & 2,2 & 8 \\ 2,6 & 2,3 & 2,3 & 2,2 & - & 3,5 \\ 1,6 & 8 & 3 & 8 & 3,5 & - \end{pmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}$$

Анализируя граф $\frac{\partial G}{\partial S}$, замечаем, например, что рёбра b и f , а также d и f наиболее интенсивно участвуют, т.е. связи между гранитогнейсовым основанием, региональным поперечным линеаментом и зоной низких предгорий, а также связи между гранитогнейсовым основанием, зоной низких предгорий и региональным поперечным линеаментом в наибольшей степени участвовали в районе Сарыкамьшского землетрясения. Известно, что энергию можно выразить через произведение массы на квадрат скорости.

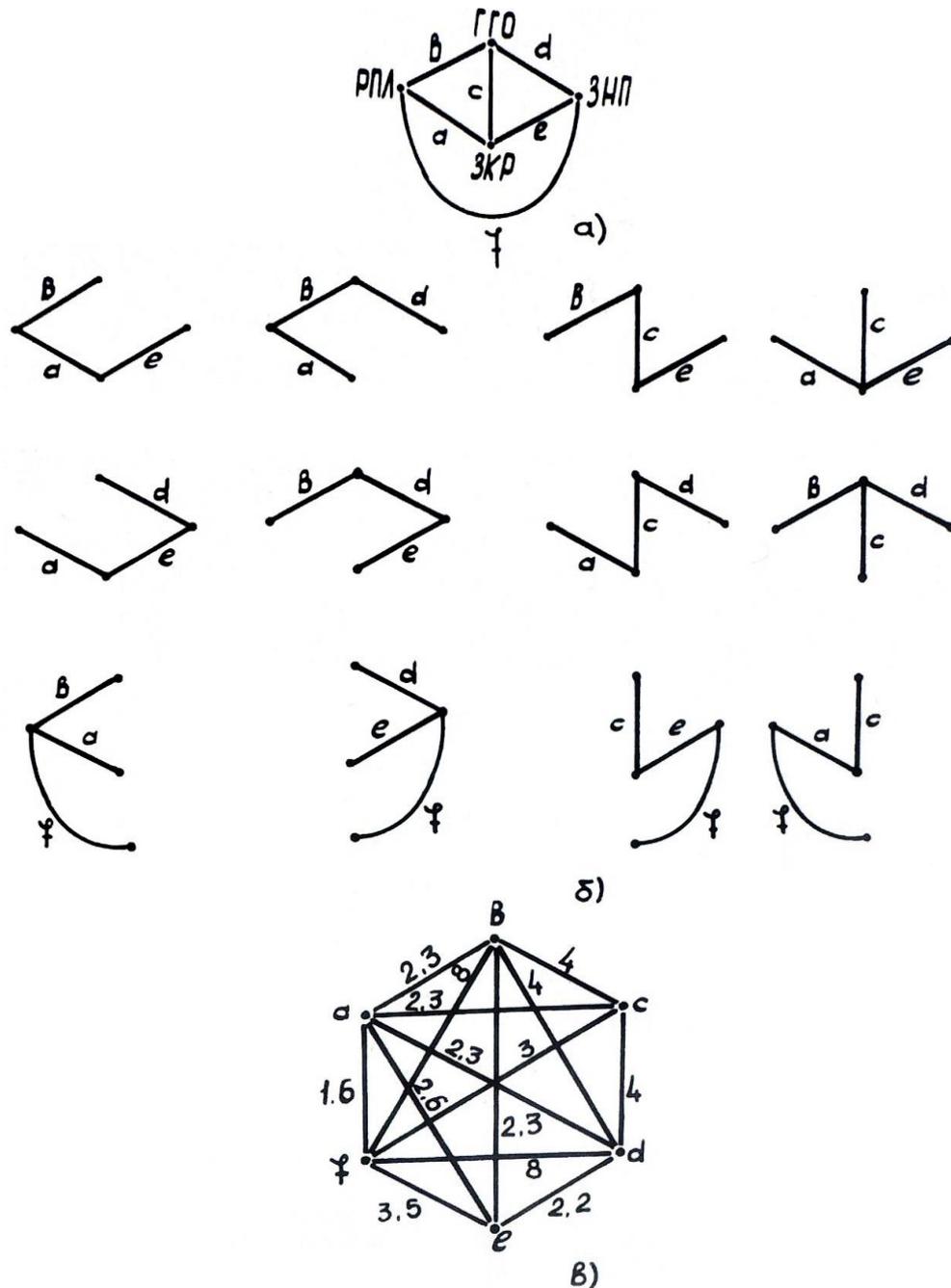


Рисунок 2. (а). Граф взаимосвязей структурно-вещественных образований Сарыкамышского землетрясения (1970 г., $M=6.8$); (б) остовы графа-возможные наборы взаимосвязанных структурно-вещественных образований, формирующихся по ходу подготовки и осуществления землетрясения; (в) производные графа взаимосвязей структурно-вещественных образований Сарыкамышского землетрясения по динамическому формированию наборов.

Аналогично магнитуду (или энергию) землетрясения можно сопоставить с произведением своеобразного веса, отношений между рёбрами графа и квадрата значений производной на этих рёбрах:

$$M = m_1 U_1^2 + m_2 U_2^2 + \dots + m_n U_n^2 ,$$

где m_i - вес связи (отношение) между рёбрами, $U_i \in \frac{\partial G}{\partial S}$ значения производной на этих рёбрах.

Допуская

$$\frac{m_2}{m_1} = \frac{U_2}{U_1} = K_1$$

$$\frac{m_3}{m_2} = \frac{U_3}{U_2} = K_2$$

.....

$$\frac{m_n}{m_{n-1}} = \frac{U_n}{U_{n-1}} = K_{n-1},$$

находим, что

$$M = m_1 (U_1^2 + U_2^2 K_1 + U_3^2 K_2 + \dots + U_n^2 K_{n-1}).$$

Подставляя значения $M=6.8$ и производные элементов матрицы $\frac{\partial G}{\partial S}$, получим матрицу весов отношений между рёбрами:

$$m = 10^{-3} m = 10^{-3} \begin{vmatrix} & a & b & c & d & e & f \\ - & 11.2 & 11.2 & 11.2 & 12.6 & 7.8 & \\ 11.2 & - & 19.5 & 19.5 & 11.2 & 39.0 & \\ 11.2 & 19.5 & - & 19.5 & 11.2 & 14.6 & \\ 11.2 & 19.5 & 19.5 & - & 10.7 & 39.0 & \\ 12.6 & 11.2 & 11.2 & 10.7 & - & 17.0 & \\ 7.8 & 39.5 & 14.6 & 39.0 & 17.0 & - & \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}$$

Отсюда находим веса каждого ребра, как половину суммы весов связей с другими рёбрами графа $\frac{\partial G}{\partial S}$.

$$m_r = 10^{-3} \begin{vmatrix} & a & b & c & d & e & f \\ 27.0 & & & & & & \\ 100.4 & & & & & & \\ & 76.0 & & & & & \\ & & 99.9 & & & & \\ & & & 62.7 & & & \\ & & & & 117.4 & & \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}$$

Далее находим веса вершин (структурно-вещественных образований) Сарыкамышского землетрясения, графа G как половину суммы весов рёбер, инцидентных определений вершине:

$$W = 10^{-3} \begin{vmatrix} & \text{ГГО} & \text{ЗНП} & \text{ЗКР} & \text{РПЛ} \\ 138.15 & & & & \\ & 140.0 & & & \\ & & 82.85 & & \\ & & & 122.4 & \end{vmatrix} \begin{matrix} \text{ГГО} \\ \text{ЗКП} \\ \text{ЗКР} \\ \text{РПЛ} \end{matrix}$$

Теперь рассмотрим граф Сарыкамышского землетрясения, на котором событие S-образование рёбрами базисного цикла, т.е. ассоциации структурно-вещественных

образований. Цикломатическое число $\lambda(G)$ графа равно 3. Следовательно граф содержит три базисных цикла – ассоциации структурно-вещественных образований. Матрица инцидентности:

$$Q = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{vmatrix} \end{matrix}$$

Частотная матрица отношений:

$$F = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 2 & 1 & 3 & 2 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 2 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} \end{matrix}$$

Вычисляя значения производной, получим граф $\frac{\partial G}{\partial S}$ - матрицу:

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} - \\ 1 \\ 0 \\ 2 \\ 1 \\ 0 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 1 & 0 & 2 & 1 & 0 \\ - & 0 & \frac{1}{2} & 2 & 1 \\ 0 & - & 2 & 1 & 0 \\ 2 & \frac{1}{2} & - & \frac{1}{2} & 0 \\ 1 & 2 & 1 & \frac{1}{2} & - & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & - \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} \end{matrix}$$

Отсюда находим матрицу весов между связями рёбер:

$$m = 10^{-3} \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} - \\ 249.6 \\ 0 \\ 499.2 \\ 249.6 \\ 0 \end{matrix} & \begin{vmatrix} 249.6 & 0 & 499.2 & 249.6 & 0 \\ - & 0 & 124.8 & 499.2 & 249.6 \\ 0 & - & 499.2 & 249.6 & 0 \\ 499.2 & 124.8 & 499.2 & - & 124.8 \\ 249.6 & 499.2 & 249.6 & 124.8 & - & 0 \\ 0 & 249.6 & 0 & 0 & 0 & - \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} \end{matrix}$$

Далее определим матрицу весов рёбер графа **G**:

$$m = 10^{-3} \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} 499.2 \\ \\ \\ \\ \\ \end{matrix} & \begin{vmatrix} 561.6 & & & & & \\ & 374.4 & & & & \\ & & 624.4 & & & \\ & & & 561.6 & & \\ & & & & 124.8 & \end{vmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} \end{matrix}$$

На основе значений весов рёбер находим веса вершин графа:

$$W = 10^{-3} \begin{matrix} & \text{ГГО} & \text{ЗНП} & \text{ЗКР} & \text{РПЛ} \\ \begin{matrix} \text{ГГО} \\ \text{ЗКП} \\ \text{ЗКР} \\ \text{РПЛ} \end{matrix} & \begin{matrix} 780.2 \\ 655.4 \\ 717.6 \\ 592.8 \end{matrix} & & & \end{matrix}$$

Для сравнения рассмотрим степень участия связей структурно-вещественных образований в районе Исфара-Баткенского землетрясения (рисунок 3 (а)). Граф содержит 10 остовов (рисунок 3 (б)). Матрица инцидентности имеет следующий вид:

$$Q = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{matrix} & \begin{matrix} 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \end{matrix} & \end{matrix}$$

Частотная матрица отношения **F**, соответствующая матрице **Q**:

$$F = Q^T * Q = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} & \begin{matrix} 5 & 1 & 2 & 4 & 2 & 1 \\ 1 & 4 & 2 & 2 & 1 & 2 \\ 2 & 2 & 6 & 2 & 4 & 2 \\ 4 & 2 & 2 & 6 & 2 & 2 \\ 2 & 1 & 4 & 2 & 5 & 1 \\ 1 & 2 & 2 & 2 & 1 & 4 \end{matrix} & \end{matrix}$$

Вычисляя значения производной на рёбрах, получаем граф $\frac{\partial G}{\partial S}$ (рисунок 3 (в)) и матрицу:

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{matrix} & a & b & c & d & e & f \\ \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix} & \begin{matrix} - & 7 & 3.5 & \frac{3}{4} & 3.5 & 7 \\ 7 & - & 3 & 3 & 7 & 2 \\ 3.5 & 3 & - & 4 & \frac{3}{4} & 3 \\ \frac{3}{4} & 3 & 4 & - & 3.5 & 3 \\ 3.5 & 7 & \frac{3}{4} & 3.5 & - & 7 \\ 7 & 2 & 3 & 3 & 7 & - \end{matrix} & \end{matrix}$$

Элементы этой матрицы и магнитуда Исфара-Баткенского землетрясения $M=6.4$ определяют матрицу весов отношений между рёбрами:

$$m = 10^{-3} \begin{matrix} & \mathbf{a} & \mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} & \mathbf{e} & \mathbf{f} \\ \begin{matrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \\ \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{matrix} & \begin{matrix} - & 92.31 & 46.16 & 9.89 & 46.16 & 92.31 \\ 92.31 & - & 39.56 & 39.56 & 92.31 & 26.37 \\ 46.16 & 39.56 & - & 52.75 & 9.89 & 39.56 \\ 9.89 & 39.56 & 52.75 & - & 46.16 & 39.56 \\ 46.16 & 92.31 & 9.89 & 46.16 & - & 92.31 \\ 92.31 & 26.37 & 39.56 & 39.56 & 92.31 & - \end{matrix} \end{matrix}$$

Матрицу весов рёбер графа G :

$$m = 10^{-3} \begin{matrix} & \mathbf{a} & \mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} & \mathbf{e} & \mathbf{f} \\ \begin{matrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \\ \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{matrix} & \begin{matrix} 143.42 & & & & & \\ & 145.06 & & & & \\ & & 93.96 & & & \\ & & & 93.96 & & \\ & & & & 143.42 & \\ & & & & & 145.06 \end{matrix} \end{matrix}$$

Матрицу весов вершин графа G :

$$W = 10^{-3} \begin{matrix} & \text{МКО} & \text{ГГО} & \text{ЗНП} & \text{РПА} \\ \begin{matrix} \text{МКО} \\ \text{ГГО} \\ \text{ЗНП} \\ \text{РПЛ} \end{matrix} & \begin{matrix} 166,49 & & & \\ & 215,95 & & \\ & & 191,22 & \\ & & & 191,22 \end{matrix} \end{matrix}$$

Пусть событие S – образование рёбрами базисного цикла графа Исфара-Баткенского землетрясения. Цикломатическое число $\lambda(G)$ графа равно 3, т.е. имеет 3 ассоциации структурно-вещественных образований. Матрица инцидентности имеет следующий вид:

$$Q = \begin{matrix} & \mathbf{a} & \mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} & \mathbf{e} & \mathbf{f} \\ \begin{matrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \\ \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{matrix} & \begin{matrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \end{matrix} \end{matrix}$$

Которому соответствует частотная матрица отношений:

$$F = \begin{matrix} & \mathbf{a} & \mathbf{b} & \mathbf{c} & \mathbf{d} & \mathbf{e} & \mathbf{f} \\ \begin{matrix} \mathbf{a} \\ \mathbf{b} \\ \mathbf{c} \\ \mathbf{d} \\ \mathbf{e} \\ \mathbf{f} \end{matrix} & \begin{matrix} 2 & 1 & 0 & 1 & 1 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 2 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 2 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 \end{matrix} \end{matrix}$$

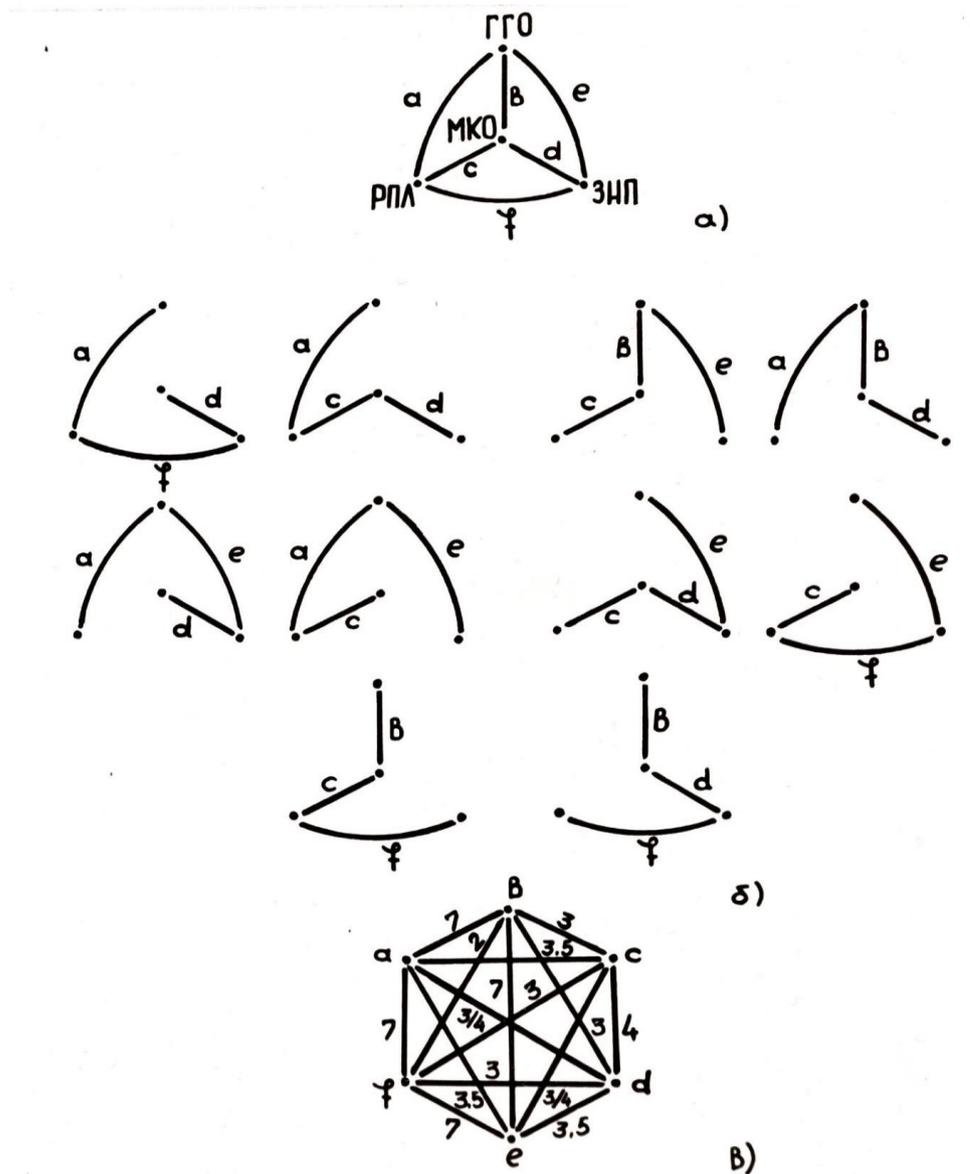


Рисунок 3. (а). Граф взаимосвязей структурно-вещественных образований Исфара-Баткенского землетрясения (1978 г., $M=6.4$); (б) остовы графа – возможные наборы взаимосвязанных структурно-вещественных образований, формирующихся по ходу подготовки и осуществления землетрясения; (в) производные графа взаимосвязей структурно-вещественных образований Исфара-Баткенского землетрясения по динамическому формированию наборов.

Вычисляя значения производной, получим матрицу:

$$\frac{\partial G}{\partial S} = \begin{pmatrix} a & b & c & d & e & f \\ - & 1 & 0 & 2 & 1 & \frac{1}{2} \\ - & 1 & 0 & 1 & 0 & 2 \\ 0 & 0 & - & 1 & 0 & 2 \\ 2 & 1 & 1 & - & 0 & 3 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & - & 2 \\ 1 & 2 & 2 & 3 & 2 & - \\ \frac{1}{2} & & & & & \end{pmatrix} \begin{matrix} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{matrix}$$

Определим матрицу весов между связями рёбер:

$$m = 10^{-3} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} a & b & c & d & e & f \end{array} \\ \left\| \begin{array}{cccccc} - & 177.06 & 0 & 354.32 & 177.32 & 88.58 \\ 177.16 & - & 0 & 177.16 & 0 & 354.32 \\ 0 & 0 & - & 177.16 & 0 & 354.32 \\ 354.32 & 177.16 & 177.16 & - & 0 & 351.48 \\ 177.16 & 0 & 0 & 0 & - & 354.32 \\ 88.58 & 354.32 & 354.32 & 531.48 & 354.32 & - \end{array} \right\| \begin{array}{l} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{array} \end{array}$$

Матрицу весов рёбер графа **G**:

$$m = 10^{-3} \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} a & b & c & d & e & f \end{array} \\ \left\| \begin{array}{cccccc} 398,61 & & & & & \\ & 354,32 & & & & \\ & & 265,74 & & & \\ & & & 620,06 & & \\ & & & & 265,74 & \\ & & & & & 841,51 \end{array} \right\| \begin{array}{l} a \\ b \\ c \\ d \\ e \\ f \end{array} \end{array}$$

и матрицу весов вершин графа **G**:

$$W = 10^{-3} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \text{МКО} & \text{ГГО} & \text{ЗНП} & \text{РПА} \end{array} \\ \left\| \begin{array}{cccc} 620,06 & & & \\ & 509,34 & & \\ & & 863,66 & \\ & & & 752,93 \end{array} \right\| \begin{array}{l} \text{МКО} \\ \text{ГГО} \\ \text{ЗНП} \\ \text{РПЛ} \end{array} \end{array}$$

Из вышеизложенного следует, что вес (вклад) каждого структурно-вещественного образования в величину магнитуды (или энергии) землетрясения определяется их взаимоотношениями (взаимосвязями). Сочетания структурно-вещественных образований (объектов), играющих роль геологических признаков сейсмичности, могут изменяться в пространстве даже в пределах одной сейсмоактивной или сейсмогенной зоны. Возможно и изменение взаимосвязей структурно-вещественных образований во времени по ходу развития земной коры, в том числе по мере подготовки землетрясения. В связи с этим можно сказать, что вклад геологических признаков изменяется от участка к участку.

Для прогнозирования сейсмической опасности следует решать экспериментальные задачи на эталонных районах осуществленных и зарегистрированных землетрясений, где известны конкретны взаимоотношения объектов. При решении экспериментальных задач осуществляем своеобразное «обучение». В результате каждая связь (каждое взаимоотношение) структурно-вещественных образований присвоит себе значение веса (вклада). Точность результатов в значительной мере будет определяться достоверностью установления взаимоотношений объектов и точностью определения значений магнитуды или энергии землетрясений в учебной выборке. Обучение можно проводить относительно максимально наблюдаемых сотрясений, затухания интенсивности и т.п.

При картографировании площадей с различным уровнем сейсмической опасности (максимальной магнитуды или энергии ожидаемых землетрясений M_{max}) вычисляются значения производных связей участка. Суммируя половины произведений весов связей и квадратов их производных, получим прогнозное значение, M_{max} ожидаемых землетрясений. Далее те же операции повторяются для каждого участка региона.

С учётом максимально наблюдаемых сотрясений, данных по затуханию интенсивности, инженерно-геологических условий и другие осуществится переход от зон возникновения землетрясений максимально возможных магнитуд к зонам интенсивности.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана методика анализа взаимосвязи геологических, геофизических, неотектонических критериев сейсмичности и их весовая оценка для сейсмического районирования на основах теории множеств, графов и матриц.
2. Вес (вклад) каждого структурно-вещественного образования в величину магнитуды (или энергии) землетрясения определяется их взаимоотношениями (взаимосвязями). Сочетания структурно-вещественных образований (объектов), играющих роль геологических признаков сейсмичности, могут изменяться в пространстве даже в пределах одной сейсмоактивной или сейсмогенной зоны. Возможно и изменение взаимосвязей структурно-вещественных образований во времени по ходу развития земной коры, в том числе по мере подготовки землетрясения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Борисов А.А., Шенкарева Г.А. Сейсмолого-геофизическая характеристика Кавказа и запада Средней Азии. – Бюлл. МОИП. Отд. Геол., 1972, т.47, №6, с.5-16.
2. Борисов А.А. Определение пороговых условий высокой сейсмоопасности путем формализованного анализа геофизических данных. Геофиз. сборник, 1976, вып.71, с. 19-28.
3. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.А. и др. О критериях высокой сейсмичности. – ДАН СССР, 1972, т.202, №6, с.1317-1320.
4. Николаев А.И., Николаев П.Н. Методические аспекты прогноза возбужденной сейсмичности, связанной с заполнением крупных водохранилищ – В кн.: Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М, 1977, с. 99-112.
5. Николаев А.И., Николаев П.Н. Новые принципы вероятностей сейсмического районирования. – В кн.: Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с. 153-164.
6. Николаев П.Н. О применении корреляционного метода в сеймотектонике и прогноз землетрясений максимальной силы. В кн.: Влияние инженерной деятельности на сейсмический режим. М., 1977, с.113-127.
7. Николаев П.Н. Количественная оценка достоверности и значимости геологических критериев сейсмичности. – Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. 1997, выпуск, с.112-117.
8. Рейснер Г.И. Геологические методы оценки сейсмической опасности. М. Недра, 1980, 173 с.
9. Трофимов А.К. Вопросы методики сеймотектонического анализа. В кн. Тянь-Шань в новейшем этапе геологического развития. Фрунзе: Илим 1989, с.122-134.
10. Омуралиев М. Отчёт Института сейсмологии АН Киргизской ССР «Разработать методические рекомендации по использованию Аэрокосмических данных для характеристики сейсмических районов. Роль активных разломов в формировании сейсмогенных структур» Гос. регистрации 01.86. 0103631 инв. № 02.9. 10 011576, Фрунзе. 1990.

Рецензент: чл. – корр. НАН КР, д. г-м.н., проф. Абдрахматов К.Е.