

УДК 550.341

РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ($M \geq 6.0$) В КАСПИЙСКОМ РЕГИОНЕ: КОПЕТДАГ–АЛАДАГ–БИНАЛУД¹

© 2012 г. А.И. Горшков, О.В. Новикова

*Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН,
г. Москва, Россия*

Представлены результаты распознавания методом морфоструктурного районирования высокосейсмичных пересечений линеаментов в пределах горной системы Копетдаг–Аладаг–Биналуд, характеризующейся высоким уровнем сейсмичности; к некоторым из пересечений приурочены эпицентры зарегистрированных в регионе землетрясений с $M \geq 6.0$.

С помощью алгоритма распознавания образов КОРА-3 в регионе установлены пересечения, вблизи которых возможно возникновение землетрясений с $M \geq 6.0$. Большинство распознанных высокосейсмичных пересечений расположено на линеаментах высших рангов, разделяющих наиболее крупные блоки земной коры. Для рассматриваемых пересечений характерна контрастность новейших тектонических движений в сочетании с повышенной раздробленностью земной коры.

Ключевые слова: сильные землетрясения, распознавание образов, морфоструктурное районирование, пересечения линеаментов, характерные признаки высокосейсмичных пересечений линеаментов.

Введение

Каспийский регион, расположенный в центральной части Альпийского подвижного пояса, охватывает Южно-Каспийскую глубокоководную впадину и обрамляющие ее молодые горно-складчатые сооружения, характеризующиеся высоким уровнем сейсмической активности. В последнее десятилетие благодаря постоянно возрастающей активности нефтегазовых комплексов прикаспийских стран регион интенсивно развивается. Для объектов расширяющейся нефтегазовой инфраструктуры региона наибольшую природную угрозу представляют сильные землетрясения. Очевидно, что информация о местоположении их потенциальных очагов имеет первостепенное значение для разработки мер по обеспечению сейсмобезопасности таких объектов в целях предотвращения крупномасштабных экологических катастроф.

Задача определения потенциальных очагов сильных землетрясений в пределах крупнейших тектонических структур Каспийского региона решается с использованием методики распознавания, основанной на представлениях о связи сильных землетрясений с морфоструктурными узлами, формирующимися в местах сочленения блоков земной коры [Гельфанд и др., 1972, 1976; Гвишиани и др., 1988]. Ранее с помощью названной методики были определены потенциальные места сильных землетрясений во многих сейсмоактивных регионах мира. В каждом из изученных регионов впоследствии произошли землетрясения, подтвердившие достаточно высокую надежность и эффективность методологии: 82% землетрясений возникли в узлах, которые были классифицированы как высокосейсмичные [Горшков, 2010].

¹ Данная статья – первая из подготовленных авторами публикаций по определению потенциальных очагов сильных землетрясений в пределах крупнейших тектонических структур Каспийского региона с использованием методики распознавания.

Цель данной работы – определение потенциальных мест сильных землетрясений ($M \geq 6.0$) в пределах горного пояса Копетдаг–Аладаг–Биналуд, занимающего восточную часть Каспийского региона. Изучаемая территория неоднократно подвергалась воздействию разрушительных землетрясений как в историческом прошлом, так и на современном этапе; последнее из них – Ашхабадское землетрясение 1948 г. – стало причиной гибели десятков тысяч человек.

Изучением сейсмоопасных зон Копетдагского региона в разное время занимались многие исследователи (см., например, обзор в работе [Каррыев, 1995]). Новейшие региональные обобщения представлены в работе [Balassanian et al., 1999], выполненной в рамках Международного проекта *GSHAP* на основе вероятностных и детерминистических методов оценки сейсмической опасности.

Морфоструктурное районирование горного пояса Копетдаг–Аладаг–Биналуд

Положение объектов распознавания – пересечений морфоструктурных линеаментов – определено методом морфоструктурного районирования [Ранцман, 1979], которое ранее было выполнено для изучаемой территории (результаты см. в [Горшков и др., 2002]). Рассматриваемый горный пояс располагается между двумя древними жесткими глыбами земной коры – Туранской плитой на севере и Иранской плитой на юге. Современную геодинамику и сейсмичность региона определяет продвижение последней в северном направлении [Трифонов, 1983]. Формирование новейшей структуры Копетдагского региона происходило в условиях субмеридионального сжатия, признаки которого были обнаружены при специальных структурно-парагенетических исследованиях [Расцветаев, 1973].

Рельеф изучаемой территории определяют две группы хребтов, разделенных межгорной и внутригорными впадинами, а также продольными долинами (рис. 1). Северная группа формирует горное сооружение Копетдага, южная образует систему сопряженных поднятий Эльбурс–Аладаг–Биналуд. Межгорная Кучано-Мешхедская впадина и продольный участок долины р. Атрек отделяют Копетдаг от горных цепей Эльбурс–Аладаг–Биналуда.

Граница горного сооружения с Туранской плитой проходит по глубинному Южно-Туркменскому разлому северо-западного простирания, который в современном рельефе представлен крутым уступом северного склона Копетдага. На юге граница между Эльбурс–Аладаг–Биналудом и Иранским плато в рельефе выражена менее четко, так как их сочленение осложнено системой молодых наложенных впадин.

Морфоструктурное районирование ориентировано на установление иерархии блокового строения земной коры путем анализа рельефа земной поверхности по топографическим картам и космическим снимкам с учетом геологических и тектонических данных [Ранцман, 1979; Гвишиани и др., 1988]. В Копетдагском регионе выделены три *горные страны* (территориальные единицы первого ранга) – Копетдаг, Кучано-Мешхедская межгорная впадина и Аладаг–Биналуд (рис. 2), имеющие различную историю формирования. Горное сооружение Копетдага образовано сложной системой хребтов с доминирующим западным–северо-западным–восточным–юго-восточным простиранием; хребты Аладаг и Биналуд сформированы на окраине Центрально-Иранского срединного массива [Хаин, 2001]. Поднятие Аладаг–Биналуд представлено более консолидированными протяженными хребтами, образующими в плане выгнутую к северу дугу. Друг от друга горные страны отделены линеаментами первого ранга.

Каждая из горных стран разделена на *мегаблоки*, являющиеся территориальными единицами второго ранга; они различаются простиранием и высотой слагающих их хребтов. Мегаблоки, в свою очередь, делятся на *блоки*, относимые к единицам низшего в иерархии третьего ранга.



Рис. 1. Главные структурные и орографические элементы земной коры Прикаспийского региона

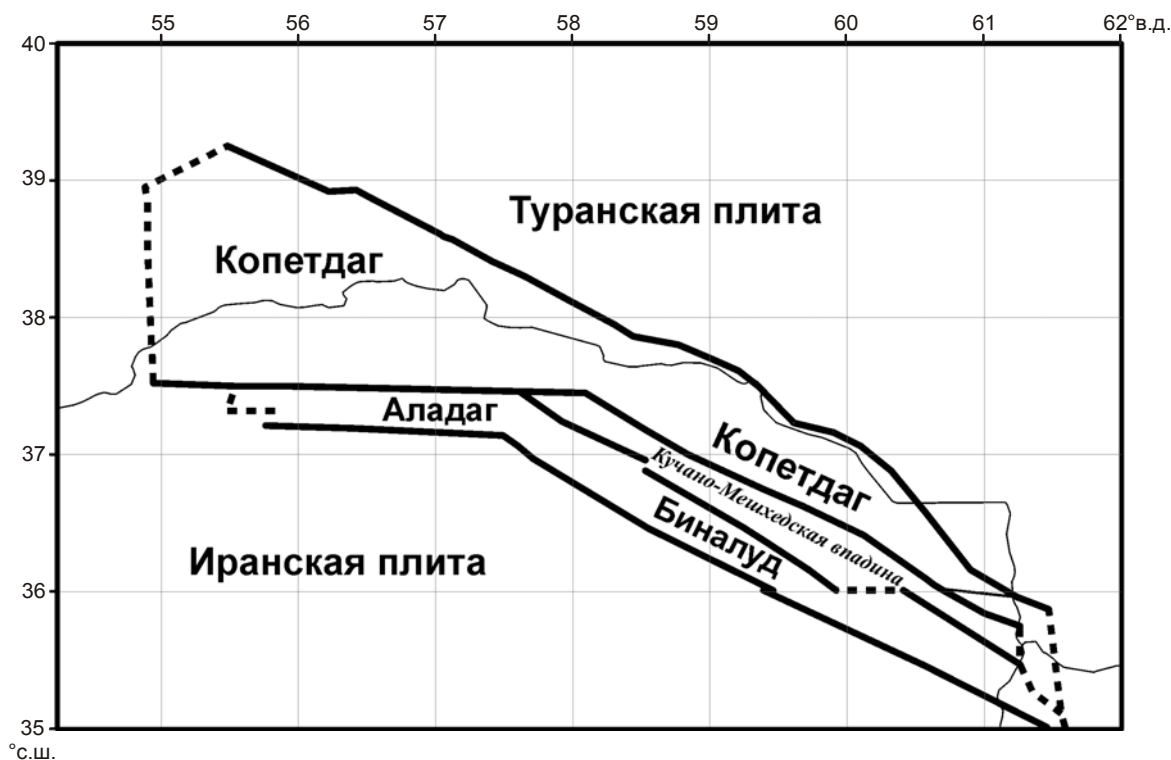


Рис. 2. Горные страны Копетдагского региона и линеаменты первого ранга. Сплошные линии – продольные линеаменты, пунктирные – поперечные. Тонкая извилистая линия – граница между государствами Прикаспийского региона

Различают продольные и поперечные морфоструктурные линеаменты, ограничивающие территориальные единицы. Продольные линеаменты имеют простирание, близкое к простиранию осей и подножий хребтов, продольных долин и межгорных котловин; они обычно включают зоны хорошо изученных глубинных разломов. Поперечные линеаменты перпендикулярны крупным элементам рельефа или пересекают их под углом; они проходят по местам резких и существенных изменений высоты горных хребтов.

Зоны поперечных линеаментов включают вытянутые в одном направлении отрезки разломов и тектонические уступы. Ранг линеаментов определяется рангом разделяемых им территориальных единиц.

В местах пересечения линеаментов формируются морфоструктурные узлы, для которых характерна повышенная раздробленность земной коры. Механизм усиления раздробленности узлов за счет формирования в них новых разрывов был предложен в работе [Gabrielov, Keiliss-Borok, Jackson, 1996]. Для определения природных границ узлов необходимо проведение детальных полевых исследований [Ранцман, Гласко, 2004].

Схема морфоструктурного районирования Копетдагского региона, представленная на рис. 3, основана на картографических материалах и космических снимках. Поскольку природные границы узлов не определены, в качестве последних мы рассматриваем окрестности точек пересечения осей линеаментов, ограниченные окружностью с радиусом 25 км.

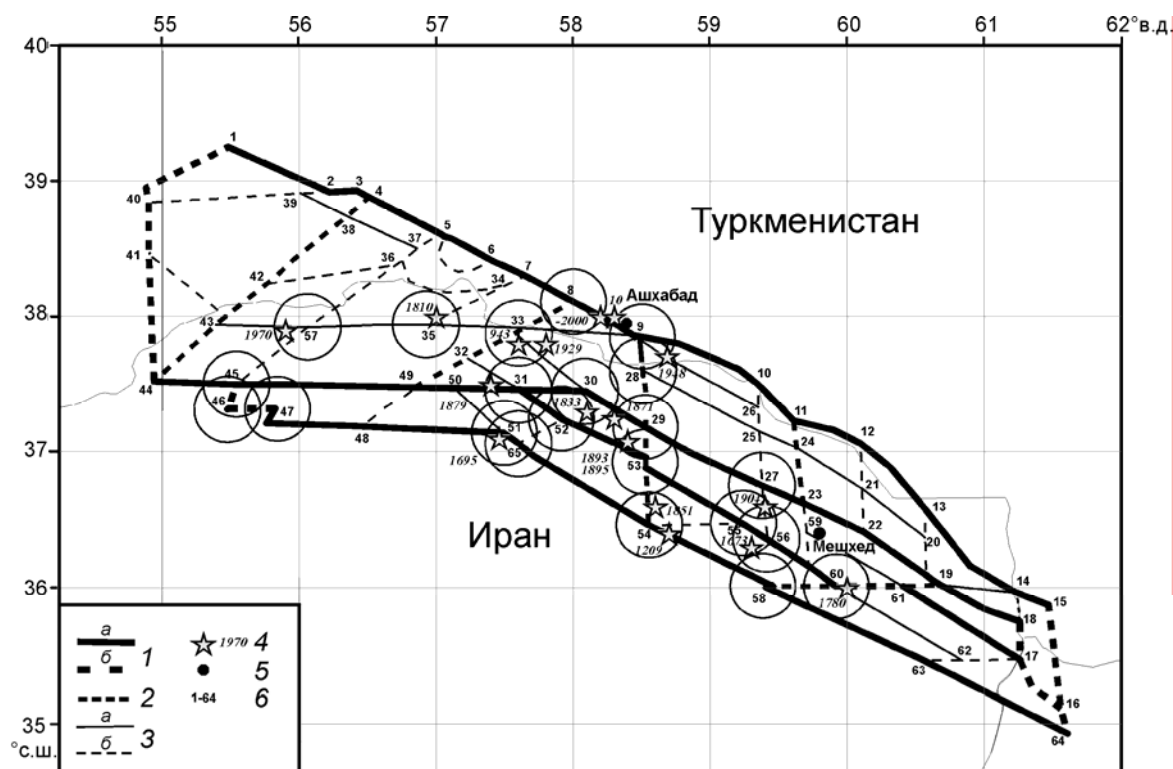


Рис. 3. Распознанные высокосейсмичные пересечения линеаментов в Копетдагском регионе

1 – линеаменты первого ранга (а – продольные; б – поперечные); 2 – поперечные линеаменты второго ранга; 3 – линеаменты третьего ранга (а – продольные, б – поперечные); 4 – эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ с указанием года их возникновения; 5 – крупные города; б – номера пересечений линеаментов. Окружности – границы узлов, распознанных как высокосейсмичные для $M \geq 6.0$. Тонкая извилистая линия – границы между государствами Прикаспийского региона

Распознавание высокосейсмичных пересечений линеаментов Копетдагского региона

Определение мест возможных землетрясений с $M \geq 6.0$ рассматривается в работе как задача распознавания образов. Землетрясения с $M \geq 6.0$, зарегистрированные в регионе, связаны лишь с некоторыми из пересечений линеаментов (см. рис. 3). Цель распознавания – разделение всех пересечений линеаментов Копетдагского региона на два

класса, к одному из которых относятся высокосейсмичные узлы, в которых могут возникать сильные землетрясения с магнитудой $M \geq 6.0$ (класс **В**). Ко второму классу относятся низкосейсмичные узлы, в которых возможны землетрясения только с магнитудой $M < 6.0$ (класс **Н**).

В Копетдагском регионе в качестве объектов распознавания рассматривались 65 пересечений линеаментов, установленных по результатам морфоструктурного районирования (см. рис. 3). Радиус кругов, аппроксимирующих территорию морфоструктурного узла, соответствует эмпирическим данным о размерах очагов землетрясений [Ризниченко, 1976; Wells, Coppersmith, 1994]: по Ю.В. Ризниченко, очаг землетрясения с $M=6.0$ имеет длину около 23 км при ширине около 10 км. Поэтому в Копетдагском регионе узлом считалась окрестность точек пересечения линеаментов, ограниченная окружностью с радиусом 25 км.

Материал обучения

Для формирования материала обучения из региональных каталогов землетрясений [Кондорская и др., 1993; Berberian, 1994; Shebalin, Tatevosian, 1997] были выбраны коровые землетрясения с $M \geq 6.0$, включая исторические. Перечень анализируемых событий представлен в табл. 1, где для каждого землетрясения указаны только ближайшие к нему пересечения линеаментов. Эпицентры землетрясений, расположенные на расстоянии, не превышающем 25 км от точки пересечения осей линеаментов, на рис. 3 отмечены звездочкой с указанием года события.

Анализируемые 65 пересечений были разделены на две группы. Обучающая выборка **В₀** для высокосейсмичного класса **В** составлялась формальным образом – вокруг каждого эпицентра проводилась окружность радиусом 25 км и в выборку **В₀** включались все пересечения линеаментов, попадавшие внутрь этой окружности. В результате, выборку **В₀** составили 15 пересечений. Остальные 50 пересечений образовали обучающую выборку **Н₀** низкосейсмичного класса **Н**.

Таблица 1. Землетрясения с $M \geq 6.0$, произошедшие в Копетдагском регионе в разные годы

Год	Координаты, °с.ш., °в.д.	Магнитуда M_S	Номер ближайшего пересечения	Расстояние от эпицентра до бли- жайшего пересечения, км
2000 до н.э.	38.0, 58.0	7.1	8	25.0
10	38.0, 58.3	7.1	9	25.0
943	37.8, 57.6	7.6	33	7.7
1209	36.4, 58.7	7.2	54	15.1
1673	36.3, 59.3	7.1	56	12.5
1695	37.1, 57.5	7.0	51	6.0
1780	36.0, 60.0	6.5	60	7.6
1810	38.0, 57.0	6.4	35	7.3
1833	37.3, 58.1	6.2	30	17.7
1851	36.6, 56.6	6.9	54	14.8
1871	37.2, 58.3	7.2	29	23.8
1879	37.5, 57.4	6.7	31	21.6
1893	37.1, 58.4	7.1	53	11.8
1895	37.1, 58.4	6.8	53	17.8
1904	36.6, 59.4	6.3	27	19.0
1929	37.8, 57.8	7.2	33	23.4
1948	37.7, 58.7	7.3	9	24.2
1970	37.9, 55.9	6.7	57	15.7

Параметры пересечений линеаментов, использованные для распознавания

В данной работе использовались те же параметры (табл. 2), что и применявшиеся ранее при распознавании высокосейсмичных пересечений линеаментов в других регионах [Гельфанд и др., 1972, 1976; Ранцман, 1979; Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010].

Таблица 2. Параметры, использованные для распознавания в Копетдагском регионе, и пороги их дискретизации

Параметры	Порог дискретизации
<i>Морфометрические параметры</i>	
Максимальная высота рельефа, H_{\max} , м	1631; 2300
Минимальная высота рельефа, H_{\min} , м	190; 615
Размах высот, $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$, м	1201; 1706
Расстояние между точками H_{\max} и H_{\min} , L , км	35; 43
Градиент рельефа, $\Delta H/L$	38
<i>Геологические параметры</i>	
Площадь рыхлых четвертичных пород, Q , %	52
<i>Параметры сети линеаментов</i>	
Высший ранг линеамента, ВР	1
Число линеаментов в пересечении, ЧЛ	2
Число линеаментов в круге радиуса 25 км, ЧЛК	3
Расстояние до ближайшего линеамента первого ранга, P_1 , км	0
То же до линеамента второго ранга, P_2 , км	32
То же до ближайшего пересечения, P_p , км	22; 28
<i>Сочетания типов рельефа (Мор)</i>	
1 – горы/равнины (г/р) 2 – горы/предгорья (г/пр) 3 – горы/горы (г/г) 4 – предгорья/равнины (пр/р)	2

Приводимые значения определены в пределах кругов радиусом 25 км вокруг точек пересечения линеаментов по топографическим, геологическим и гравиметрическим картам, а также по схеме морфоструктурного районирования изучаемого региона (см. рис. 3). Параметры включают информацию о контрастности и интенсивности тектонических движений на основе данных о высотах рельефа в окрестности пересечений, сочетаниях типов рельефа, площади четвертичных рыхлых отложений, а также показатели тектонической раздробленности пересечений, которые определяются непосредственно по карте морфоструктурного районирования региона. К последним относятся сведения о числе и рангах линеаментов, формирующих пересечение.

Алгоритм КОРА-3 [Гельфанд и др., 1972, 1976; Гвишиани и др., 1988], использованный в работе для классификации пересечений линеаментов, оперирует в пространстве двоичных векторов. Поэтому измеренные значения параметров были трансформированы в двоичные векторы с помощью процедур дискретизации и кодировки, подробно описанных в работе [Гвишиани и др., 1988]. Пороги дискретизации параметров приведены в табл. 2. Для тех параметров, область значений которых разбивалась на три интервала (“малые”, “средние”, “большие”), в таблице указаны два порога дискретизации.

Результаты распознавания

С применением алгоритма КОРА-3 (параметры алгоритма $k_1 = 2$, $\bar{k}_1 = 1$, $k_2 = 21$, $\bar{k}_2 = 1$) на этапе обучения были обнаружены 11 признаков высокосейсмичного класса **В** и 9 признаков низкосейсмичного класса **Н** (табл. 3).

Таблица 3. Характерные признаки пересечений линеаментов классов **В** и **Н**

№	Параметры									
	H_{\max} , м	H_{\min} , м	ΔH , м	L , км	$\Delta H/L$	Мор	Q , %	ЧЛК	P_1 , км	$P_п$, км
<i>Характерные признаки класса В</i>										
1	>2300						>52			≤28
2		>615		≤35						≤28
3	>2300		≤1706							≤28
4		>615							≤32	>22
5		≤190		≤35						>22
6		>615					≤52		≤32	
7		≤190	>1706						≤32	
8			>1706			г/р или г/пр		≤3		
9					>38	г/р		≤3		
10	≤2300				>38			≤3		
11			≤1706		>38		≤52			
<i>Характерные признаки класса Н</i>										
1			≤1706						>32	
2	≤2300								>32	
3	≤2300						>52			
4	≤2300	≤615				г/р или г/пр				
5				>35	≤38					
6		≤615			≤38					
7			≤1706	>35						
8		≤615		>35						
9	≤2300			>35						

Интервалы значений параметров в табл. 3 соответствуют определенным для них порогам дискретизации. При значении порога голосования $\Delta = 0$ из 65 рассматриваемых пересечений 22 (34%) были классифицированы как высокосейсмичные (**В**) и 43 (66%) как низкосейсмичные (**Н**).

Высокосейсмичные пересечения отмечены на вышеприведенном рис. 3 кругами радиуса 25 км в масштабе карты. Можно видеть, что все 18 землетрясений с $M \geq 6.0$ находятся вблизи пересечений, отнесенных распознаванием к классу **В**.

В 25-километровой окрестности распознанных **В**-пересечений 45, 46, 47, 58 землетрясения с $M \geq 6.0$ до настоящего времени не зафиксированы.

Контрольные эксперименты

Стабильность и неслучайность разделения пересечений линеаментов на классы **В** и **Н** были оценены с помощью четырех контрольных экспериментов по методике, подробно описанной в [Гвишиани и др., 1988]. В эксперименте “Эквивалентные признаки” была получена классификация, полностью совпадающая с основной. В ходе эксперимента “Сейсмическое будущее”, в котором обучение **В**₀ и **Н**₀ составляется из объектов

классов **В** и **Н**, определенных в результате распознавания, только три объекта поменяли свою классификацию с **Н** на **В**, что составляет 5% от общего числа объектов распознавания. В ходе эксперимента “Скользкий контроль”, когда из материала обучения последовательно исключается по одному объекту, из класса **Н** в класс **В** перешли 6 объектов (9%). В эксперименте “Исключение функций”, когда последовательно из распознавания исключается каждый из параметров, составивших решающее правило, классификацию с **Н** на **В** поменяли 11 объектов (17%). Такие незначительные изменения основной классификации свидетельствуют о ее стабильности и отвечают эмпирическим критериям устойчивости классификаций, получаемых в задачах распознавания, разработанных в [Гвишиани и др., 1988].

Обсуждение результатов и выводы

Главным критерием качества результатов распознавания является количество ошибок типа “пропуск цели” или их отсутствие. С этой точки зрения результаты распознавания высокосейсмичных пересечений для $M \geq 6.0$ в Копетдагском регионе представляются положительными: все 18 землетрясений с $M \geq 6.0$, известных в регионе (см. табл. 1), находятся вблизи пересечений, отнесенных при распознавании к классу **В**.

Из 65 пересечений Копетдагского региона 22 отнесены к высокосейсмичным. Общая площадь кругов, соответствующих **В**-пересечениям, занимает не более трети всей территории горного пояса Копетдаг–Аладаг–Биналуд.

В пределах региона распознанные **В**-пересечения образуют три четких кластера различной площади (см. рис. 3). Самый крупный из них образован **В**-пересечениями, которые расположены в центральной части региона. Другая компактная группа **В**-пересечений расположена в пределах Биналуда западнее г. Мешхед. Группа из трех **В**-пересечений распознана в районе сочленения Копетдага с Аладагом и Эльбурсом.

На региональном уровне оценка сейсмической опасности Копетдагского региона была проведена в рамках Международного проекта *GSHAP* с использованием вероятностного и детерминистского подходов [Balassanian et al., 1999]. На серии карт сейсмической опасности, представленных в названной работе, оконтурены зоны ожидаемой интенсивности сейсмических событий. Кластеры высокосейсмичных пересечений, распознанные в нашей работе, согласуются с зонами наивысшей интенсивности, установленными в [Balassanian et al., 1999], которые имеют протяженность в сотни километров. Очевидно, что в пределах этих зон могут быть и участки невысокой сейсмичности.

Результаты распознавания, представленные на рис. 3, могут быть использованы для уточнения и дифференциации существующих карт сейсмической опасности и общего сейсмического районирования для территории Копетдагского региона.

Абсолютное большинство – 20 из 22 – распознанных **В**-пересечений включает линеаменты высших (первого и второго) рангов, которые разделяют наиболее крупные блоки земной коры в Копетдагском регионе (см. рис. 3). Это подтверждает закономерность, отмеченную при распознавании высокосейсмичных пересечений линеаментов для $M \geq 6.0$ и в других областях Альпийско-Гималайского пояса [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010]. Иными словами, высокосейсмичные пересечения линеаментов связаны с границами наиболее крупных подразделений земной коры. И только два пересечения, распознанные как высокосейсмичные, образованы линеаментами третьего ранга (см. рис. 3, пересечения 35, 57).

Характерные признаки, по которым различаются пересечения классов **В** и **Н** (см. табл. 3), предоставляют косвенную информацию о некоторых геолого-геоморфологических особенностях мест расположения высоко- и низкосейсмичных пересечений. Из тринадцати параметров, использованных для распознавания в исследуемом регионе,

наиболее информативными для разделения пересечений на классы **В** и **Н** оказались десять. Согласно характерным признакам, пересечения класса **В** отличаются более высокой степенью раздробленности земной коры в их окрестности. На это указывают такие показатели раздробленности, как расстояние до ближайшего пересечения (R_p) и расстояние до линейных элементов первого ранга (P_1). Для **В**-пересечений характерны “небольшие” значения этих параметров – $R_p \leq 28$ км и $P_1 \leq 32$ км (см. табл. 3). Кроме этого, **В**-пересечения характеризуются интенсивными новейшими вертикальными движениями, о чем свидетельствуют “большие” значения градиента рельефа ($\Delta H/L > 38$) и “малые” расстояния между точками максимальных и минимальных отметок рельефа в окрестности пересечений ($L \leq 35$ км). Аналогичные особенности высокосейсмичных пересечений были установлены при распознавании мест возможных землетрясений и в других областях Альпийско-Гималайского пояса [Гвишиани и др., 1988; Горшков, 2010].

Найденные характерные особенности мест возможных землетрясений в Копетдагском регионе существенны для понимания геолого-геоморфологических факторов, обуславливающих процессы сейсмогенеза. Отметим, что в работах по моделированию динамики литосферы и сейсмичности [Keilis-Borok, Rotwain, Soloviev, 1997] повышенная раздробленность среды признается необходимым условием для возникновения сильных землетрясений.

Литература

- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. Сер. геофиз. 1972. Т. 202, № 6. С.28–35.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопоф Л., Пресс Ф., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. М.: Наука, 1976. С.3–91. (Вычислительная сейсмология; Вып. 9).
- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 174 с.
- Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД, 2010. 472 с.
- Горшков А.И., Пиотровская Е.П., Раницман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XXX. Туркмено-Хорасанские горы. $M \geq 6.5$ // Проблемы теоретической сейсмологии и сейсмичности / Под ред. В.И. Кейлис-Борока. М.: ГЕОС, 2002. С.129–140. (Вычислительная сейсмология; Вып. 33).
- Каррыев Б.С. Сейсмичность Копетдагского региона. Ашхабад: Ылым, 1995. 235 с.
- Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Куреев И.А., Вандышева Н.В. О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990) // Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1 / Под ред. В.И. Уломова. М.: ИФЗ, 1993. С.70–79.
- Раницман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 170 с.
- Раницман Е.Я., Гласко М.П. Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-ПРЕСС, 2004. 224 с.
- Расцветаев Л.М. Некоторые общие особенности позднеальпийской структуры орогенических областей юга СССР и тектонические напряжения новейшего времени // Новейшая тектоника, новейшие отложения и человек. Вып. 5. М.: Изд-во МГУ, 1973. С.57–107.
- Ризниченко Ю.В. Размеры очага корового землетрясения и сейсмический момент // Исследования по физике землетрясений. М.: Наука, 1976. С.9–27.
- Трифонов В.Г. Позднечетвертичный тектогенез. М.: Наука, 1983. 240 с.
- Хаин В.Е. Тектоника континентов и океанов (год 2000). М.: Научный мир, 2001. 606 с.
- Balassanian S., Ashirov T., Chelidze T., Gassanov A., Kondorskaya N., Molchan G., Pustovitenco B., Trifonov V., Ulomov V., Giardini D., Erdik M., Ghavory-Ashtiany M., Grunthal G., Mayer-

- Rosa D., Shenk V., Stucchi M.* Seismic hazard assessment for the Caucasus test area // *Ann. Geofis.* 1999. V. 42, N 6. P.1139–1151.
- Berberian M.* Natural hazard and the first earthquake catalogue of Iran. V. 1: Historical hazards in Iran prior to 1900. IIEES, Tehran. 1994. 605 p.
- Gabrielov A.M., Keilis-Borok V.I., Jackson D.D.* Geometric incompatibility in a fault system // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1996. V. 93, N 9. P.3838–3842.
- Keilis-Borok V.I., Rotwain I.M., Soloviev A.A.* Numerical modeling of block structure dynamics: dependence of a synthetic earthquake flow on the structure separateness and boundary movements // *J. Seismol.* 1997. V. 1, N 2. P.151–160.
- Shebalin N.V., Tatevosian R.E.* Catalogue of large historical earthquakes of the Caucasus // *Historical and prehistorical earthquakes in the Caucasus / Eds. D. Giardini, S. Balassanian. NATO ASI Series, 2. Environment. V. 28. Dordrecht; Boston; London, Kluwer Academic Publishers, 1997. P.201–232.*
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, and surface displacement // *Bull. Seismol. Soc. Amer.* 1994. V. 84. P.974–1002.

Сведения об авторах

ГОРШКОВ Александр Иванович – доктор физико-математических наук, ученый секретарь, заведующий лабораторией геодинамики, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: (495) 333-53-55. E-mail: gorshkov@mitp.ru

НОВИКОВА Ольга Владимировна – научный сотрудник, Международный институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. 117997, ГСП-7, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32. Тел.: (495) 333-12-55. E-mail: onovikov@mitp.ru

RECOGNITION OF EARTHQUAKE-PRONE AREAS ($M \geq 6.0$) IN THE CASPIAN REGION: KOPETDAGH–ALADAGH–BINALUD

A.I. Gorshkov, O.V. Novikova

*International Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics,
Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

Abstract. Seismogenic high-seismicity intersections of morphostructural lineaments have been identified in the Kopetdagh–Aladagh–Binalud mountain system. Recognition patterns – intersections of lineaments – have been defined with morphostructural zoning method. The recorded $M \geq 6.0$ earthquakes nucleate at some of the intersections of lineaments delineated in the study region. Among all intersections we recognized the seismogenic zones (high-seismicity), prone to $M \geq 6.0$ earthquakes, with the pattern recognition algorithm CORA-3. The majority of high-seismicity intersections sit at the first and second rank lineaments, i.e. larger earthquakes originate at the boundaries of larger blocks. These intersections exhibit the contrast neotectonic movements and the increased fracturing of the crust.

Keywords: large earthquakes, pattern recognition, morphostructural zoning, intersections of lineaments characteristic features of seismogenic intersections of lineaments.