

УДК 550.341

## ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ С 1972 ПО 2000 ГОД

А.И. Горшков, В.Г. Кособоков, Е.Я. Ранцман, А.А. Соловьев

Международный институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики Российской академии наук, Москва, Россия

Представлены результаты проверки прогнозов мест возникновения сильных землетрясений, которые в разное время, начиная с 1972 года, были определены методами распознавания образов для 11 сейсмоактивных горных регионов мира. Для проверки использованы данные Национального центра информации о землетрясениях США (NEIC) по состоянию на 1 июля 2000 г. Прогнозы основаны на предположении, что эпицентры сильных землетрясений приурочены к местам пересечений тектонически активных зон разломов – морфоструктурным узлам. Установлено, что из 68 землетрясений, которые произошли в исследованных регионах после момента опубликования соответствующих результатов прогноза, 61 (90%) оказалось в узлах и 7 (10%) – вне узлов. При этом 57 землетрясений произошли в узлах, определенных как высокосейсмичные, и лишь 4 – в узлах, распознанных как низкосейсмичные; 19 землетрясений произошло в высокосейсмичных узлах, где на момент опубликования прогноза такие события не наблюдались. Результаты проверки доказывают: сильные землетрясения в основном происходят именно в высокосейсмичных узлах, и подтверждают надежность классификации узлов на высоко- и низкосейсмичные методами распознавания.

## RECOGNITION OF EARTHQUAKE PRONE AREAS: VALIDITY OF RESULTS OBTAINED FROM 1972 TO 2000

A.I. Gorshkov, V.G. Kossobokov, E.Ya. Rantsman, A.A. Soloviev

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

The work discusses the validity of earthquake site predictions made since 1972 by pattern recognition method in 11 worldwide seismic regions. NEIC catalogue as of July 1, 2000 has been used for this purpose. Predictions are based on the assumption that epicenters of strong earthquakes are nucleated at nodes forming around intersections of fault zones. It was found that among 68 events of relevant magnitudes that occurred in the studied regions after corresponding publications, 61 (90%) earthquakes took place at the nodes and 7 (10%) events occurred out of the previously mapped nodes. 57 events occurred at the nodes previously identified as highly seismic ones and only 4 events took place at nodes predicted as non-seismogenic. 19 earthquakes occurred at predicted seismogenic nodes within which events of relevant magnitudes have not been recorded at the instant the predictions were made. Results of this work support the idea that strong earthquakes occur at highly seismic nodes and confirm the reliability of the predictions previously made.

### Введение

Задача определения мест возможного возникновения сильных землетрясений была поставлена В.И.Кейлис-Бороком и И.М.Гельфандом перед коллективом геофизиков и математиков в начале 70-х годов прошлого века [1]. Разработанная методика была основана на использовании методов распознавания образов [2] для анализа данных морфоструктурного районирования горных стран [3, 4]. За прошедшие годы были разработаны прогнозы мест возникновения сильных землетрясений в 11 сейсмоактивных горных регионах мира [5–20].

Цель данной работы – проверка прогнозов за период от их публикации до 1 июля 2000 г. Очевидно, что никакая ретроспективная эвристическая оценка не может заменить этот окончательный тест результатов распознавания.

В разделах 1 и 2 кратко дана постановка задачи прогноза мест землетрясений и методы, разработанные для ее решения. Методика описана с той подробностью, которая необходима для понимания результатов проведенной проверки. В разделе 3 суммируются результаты проверки распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в 11 сейсмоактивных регионах, в разделе 4 обсуждается степень надежности прогнозов сильных землетрясений, полученных методами распознавания образов.

## 1. Прогноз мест возможного возникновения землетрясений как задача распознавания образов

Задача прогноза мест возникновения сильных землетрясений решалась нетрадиционными методами сейсмотектоники. Решение основано на *гипотезе*, что эпицентры большинства сильных землетрясений приурочены к местам пересечений тектонически активных зон разломов [1] – *морфоструктурным узлам*. Гипотеза может нарушаться в силу ошибок как в регистрации места и силы землетрясений, так и в оконтуривании границ узлов, что изначально отмечалось ее авторами. Местоположение узлов определяется по специальной методике морфоструктурного районирования – МСР (см. ниже разд. 2).

Обычно сильные землетрясения зарегистрированы лишь в небольшой части выделяемых узлов данного региона. Возникает задача распознавания [2] тех узлов, в которых возможно возникновение сильных землетрясений. Иными словами, необходимо разделить все узлы данного региона на два класса:

**В** – высокосейсмичные узлы, где могут возникать сильные землетрясения с магнитудой  $M$ , равной или выше пороговой магнитуды  $M_0$ , для которой решается задача в данном регионе;

**Н** – низкосейсмичные узлы, в которых землетрясения с магнитудой  $M \geq M_0$  не могут происходить.

Магнитуда *сильного* землетрясения варьирует от региона к региону и зависит от уровня сейсмичности в каждом из них.

Для решения задачи в серии публикаций [1, 3–20] использованы методы распознавания образов. Для анализа формализованного описания морфоструктурных узлов был использован алгоритм распознавания Кора-3 [2]. Обучение алгоритма производится по двум выборкам **В**<sub>0</sub> и **Н**<sub>0</sub>. Выборку **В**<sub>0</sub> составляют узлы, в которых на момент решения задачи уже известны землетрясения с  $M \geq M_0$ . Обычно при составлении этой выборки учитываются землетрясения за период после 1900 г., предполагая, что их параметры, важные в данной задаче (значение магнитуды и координаты эпицентра), определены с достаточной точностью. В выборку **Н**<sub>0</sub> включаются узлы, в которых в историческое время землетрясения с  $M \geq M_0$  не наблюдались. При этом в обучение – выборки **В**<sub>0</sub> и **Н**<sub>0</sub> – не включаются узлы, с которыми связаны исторические и/или палеоземлетрясения, а также события, по энергии уступающие предсказываемым на 1–2 порядка. Эти узлы не участвуют в процессе обучения алгоритма и в выработке решающего правила, но классифицируются в ходе распознавания. Результат их распознавания служит одновременно и контролем достоверности классификации всех узлов региона, поскольку естественно предположить, что большинство из них должно быть распознано как высокосейсмичные. *Решающее правило* для разделения узлов на классы вырабатывается алгоритмом в результате анализа обучающих выборок.

Разделение алгоритмом узлов на классы **В** и **Н** проводилось на основе характеристик узлов. Эти характеристики включают такие два типа информации:

- показатели контрастности и интенсивности тектонических движений на основе данных о высотах рельефа в узле, сочетаниях типов рельефа, площади молодых рыхлых отложений; эти данные определяются по топографическим, геологическим и геоморфологическим картам;

- показатели тектонической раздробленности узлов, которые определяются непосредственно по карте морфоструктурного районирования, составляемой для определения местоположения узлов в данном сейсмоактивном регионе.

Значения характеристик узлов определялись в пределах их границ. При распознавании на Памире и Тянь-Шане [1, 10] границы узлов определялись на основании полевых наблюдений и образованы линиями, параллельными линеаментам, которые формируют узел. В других регионах границы определялись достаточно условно как окружности определенного радиуса вокруг точек пересечения осей линеаментов, формирующих узел. Радиус окружности выбирался в зависимости от масштаба МСР, определяемого в соответствии с уровнем сейсмичности данного региона. Чем выше значение пороговой магнитуды  $M_0$ , относительно которого проводилось распознавание узлов, тем бóльшим был радиус круга и тем в более мелком масштабе проводился МСР. Например, морфоструктуры Анд Южной Америки для задачи распознавания узлов относительно  $M \geq 7.75$  картировались в масштабе 1 : 7 500 000, а размер узла определялся радиусом 75 км; в Пиренеях для прогноза мест землетрясений с  $M \geq 5.0$  МСР картирование проводилось в масштабе 1:1 000 000, а размер узла определяется радиусом 25 км.

## 2. Морфоструктурные узлы – элементы современной блоковой структуры земной коры

Положение морфоструктурных узлов на местности определялось на схемах МСР, которые составлены геоморфологами по формализованным признакам [3, 4]. Схемы МСР представляют собой модели современной блоковой структуры земной коры. Выделяются три элемента блоковых структур: *иерархически упорядоченные блоки*; *морфоструктурные линеаменты* – границы блоков; *морфоструктурные узлы* – места сочленений блоков, где пересекаются линеаменты.

Положение элементов блоковых структур определяется целенаправленным анализом рельефа поверхности Земли. По топографическим картам и космическим снимкам, с учетом сведений, полученных из геологических и тектонических карт, составляются предварительные схемы информативных признаков рельефа. На эти схемы наносятся линейные элементы рельефа – оси и подножия хребтов, прямолинейные участки долин, данные о высоте осей хребтов; отмечаются места резких изменений высот и простираций осей хребтов и линий подножий; определяются места смены рисунка речных долин.

**Блоки.** Для блоков характерны близкие значения информативных признаков рельефа. Границы блоков проводятся там, где резко и существенно меняется значение хотя бы одного признака. Блокам и их границам присваивается третий – низший в иерархии – ранг. Блоки объединяются в мегаблоки, если значения информативных признаков от одного блока к другому изменяются согласно установленной последовательности; границы мегаблоков проводятся там, где последовательность нарушается. Мегаблокам и их границам присваивается второй ранг.

Самая крупная единица районирования – *горная страна* – территория единого облика рельефа (например, нагорье) и одного типа процесса горообразования (например, эпиплатформенного). Горной стране и ее границам присваивается первый ранг.

**Морфоструктурные линеаменты.** Различается три типа морфоструктурных линеаментов: продольные, поперечные и главные сдвиги (или раздвиги).

*Продольные линеаменты* близпараллельны линиям осей и подножий хребтов, протяжению продольных долин и межгорных котловин; включают обычно зоны хорошо изученных глубинных разломов.

*Поперечные линеаменты* пересекают крупные элементы рельефа косо или под прямым углом; проходят по местам резких и существенных изменений значений информативных признаков рельефа. Зоны поперечных линеаментов включают прерывисто расположенные и вытянутые в едином направлении линейные элементы рельефа, геологические разрывы и интрузивные тела. Выделение поперечных линеаментов – наиболее сложная процедура МСР.

*Главные сдвиги* обычно косо ориентированы относительно регионального простираания круп-

ных элементов рельефа, в зонах сдвигов формируются элементы рельефа, параллельные сдвигам. Главные сдвиги имеют протяжение в сотни и тысячи километров; им присваиваются собственные имена (например, “Таласо-Ферганский” на Тянь-Шане или “Сан-Андреас” в Калифорнии).

Ранжирование элементов блоковых структур – ответственная процедура МСР, поскольку ранг линеамента и число линеаментов, формирующих узел, оказались наиболее информативными характеристиками при разделении узлов на классы **В** и **Н** алгоритмами распознавания (см. таблицы характерных признаков узлов **В** и **Н** в статьях по распознаванию, перечисленных в списке литературы).

**Морфоструктурные узлы.** Это – элементы современной блоковой структуры, выделяемые методом МСР. Специфические черты природы узлов созданы мелкоблоковой структурой – при пересечении или сочленении активных тектонических зон происходят дифференцированные подвижки и смещения мелких блоков. Механизм усиления раздробленности узлов за счет формирования в них новых разрывов недавно предложен в работе [21]. Зоны линеаментов в узлах теряют линейность, разбиваются на отрезки разных простираний. Долины рек наследуют ослабленные тектонические зоны, меняют направление, образуя коленчатые переломы. Территории узлов понижены относительно блоков и значительно обводнены: несколько рек в узле сливаются в единый поток при пересечении отрезков линейных зон. Узлы характеризуются мозаичными сочетаниями горных пород, контрастными типами рельефа и ландшафтов. В узлах также наблюдаются крупные смещения масс на склонах: обвалы, оползни, оседания и т.п. Границы узлов определяются при крупномасштабном МСР территории пересечений зон линеаментов [22, 23]. При картировании отмечаются места, где восстанавливается линейность зон линеаментов и исчезает линейно-блоковая структура.

К узлам приурочены экстремальные природные явления, обусловленные глубинными процессами – гипоцентры землетрясений, скопления углеводородов, оруденение, геохимические аномалии.

Эти свойства узлов позволили успешно использовать алгоритмы распознавания для определения нефтегазоносных узлов [24], рудоконцентрирующих узлов [9, 25] и узлов, где могут возникнуть крупные обвально-оползневые дислокации [26, 27].

Многолетнее изучение блоковой структуры с помощью МСР выявило феноменальную роль морфоструктурных узлов в контроле многих глубинных и поверхностных природных процессов, а разработанная для прогноза мест возникновения землетрясений методика распознавания позволила выделять узлы повышенной активизации этих процессов.

### **3. Проверка результатов прогноза мест возможного возникновения землетрясений**

За почти 30-летний период прогноз мест сильных землетрясений был осуществлен в 11 регионах. Схемы МСР, на основе которых проводилось распознавание узлов **В** и **Н**, были составлены по единой методике, но в разных масштабах в зависимости от уровня сейсмичности региона и пороговой магнитуды (см. разд.1). Схемы МСР Анд Южной Америки и Камчатки были составлены в масштабе 1:7 500 000. Схемы МСР Западных Альп, Пиренеев, Большого и Малого Кавказа составлены в масштабе 1:1 000 000. В остальных регионах морфоструктурное районирование проведено в масштабе 1:2 500 000. Несколько варьировался набор характеристик узлов, использованных для их классификации. Его основу во всех регионах составляли морфометрические показатели рельефа в узлах и параметры морфоструктурных схем. На Кавказе, в Альпах и Пиренеях дополнительно использовались гравиметрические характеристики узлов. Постановка задачи принципиально не менялась и состояла в разделении всех узлов данного региона на классы **В** и **Н**. Для распознавания применялся алгоритм Кора-3 [2] и его модификация “Подклассы” [13]. Первая проверка результатов прогноза за период 1974–1984 гг. в четырех изученных на тот момент времени регионах была проведена в работе [28] и подтвердила их достоверность. Прошедшие годы многократно увеличили материал для проверки, что позволяет

сделать значительно более надежное заключение о достоверности и надежности распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений.

Для проведения проверки был использован глобальный каталог землетрясений мировой сети станций, составленный в Национальном центре информации о землетрясениях (NEIC, г. Голден, США) по состоянию на 1 июля 2000 г. [29]. В проверке учитывалось землетрясение, если хотя бы одно из значений четырех магнитуд ( $M_b, M_s, M_l, M_p$ ), представленных для него в каталоге, было равным или превышало порог  $M_0$ , который рассматривался в данном регионе. Сильные афтершоки, происходившие в том же узле, где и главный толчок, не учитывались. Информация о всех землетрясениях, использованных нами для проверки, дана в табл. 1 (включая землетрясение 19.10.1991 г. в Гималаях, которое произошло до публикации, но после сдачи статьи [5] в печать). Все регионы и значения  $M_0$  для каждого региона указаны в табл. 2. В некоторых регионах задача прогноза мест землетрясений решалась для двух значений пороговой магнитуды (Гималаи) и даже для трех (Большой Кавказ).

ТАБЛИЦА 1. Землетрясения, которые произошли после публикации результатов прогноза мест возникновения землетрясений по: [29]

Дата	Координаты		Глубина очага, км	Магнитуда	Соотношение с прогнозом
	Широта, град.	Долгота, град.			
Тянь-Шань и Памир ( $M \geq 6.5$ )					
11.08.1974	39.45 N	73.83 E	9	7.3	узел <b>В</b>
24.03.1978	42.83 N	78.60 E	33	7.1	узел <b>В</b>
01.11.1978	39.34 N	72.61 E	40	6.8	вне узлов
23.08.1985	39.43 N	75.22 E	7	7.5	узел <b>В</b>
19.08.1992	42.14 N	73.57 E	27	7.5	вне узлов
30.05.1998	37.11 N	70.11 E	33	7.0	узел <b>В*</b>
Балканы, Малая Азия, Закавказье ( $M \geq 6.5$ )					
27.03.1975	40.41 N	26.13 E	5	6.7	узел <b>В</b>
06.09.1975	38.47 N	40.72 E	26	6.7	узел <b>В</b>
11.05.1976	37.56 N	20.35 E	33	6.7	узел <b>В</b>
24.11.1976	39.12 N	44.02 E	36	7.3	узел <b>В</b>
20.06.1978	40.73 N	23.22 E	3	6.6	узел <b>В</b>
15.04.1979	42.09 N	19.20 E	10	7.3	узел <b>В</b>
24.02.1981	38.22 N	22.93 E	33	6.8	узел <b>В*</b>
18.01.1982	40.00 N	24.31 E	10	7.0	узел <b>В</b>
17.01.1983	38.02 N	20.22 E	14	7.2	узел <b>В</b>
06.08.1983	40.14 N	24.76 E	2	7.3	узел <b>В*</b>
30.10.1983	40.33 N	42.18 E	12	6.9	узел <b>В</b>
07.12.1988	40.99 N	44.19 E	5	7.0	узел <b>В*</b>
13.03.1992	39.71 N	39.60 E	27	6.9	узел <b>В</b>
13.05.1995	40.15 N	21.69 E	14	6.8	узел <b>В*</b>
15.06.1995	38.40 N	22.28 E	14	6.5	узел <b>В</b>
13.10.1997	36.38 N	22.07 E	24	6.7	узел <b>В*</b>
18.11.1997	37.57 N	20.66 E	33	6.6	узел <b>В</b>
27.06.1998	36.88 N	35.31 E	33	6.6	узел <b>Н</b>
17.08.1999	40.74 N	29.86 E	17	7.8	узел <b>В</b>
12.11.1999	40.75 N	31.16 E	10	7.5	узел <b>В</b>
Калифорния и Невада ( $M \geq 6.5$ )					
15.10.1979	32.63 N	115.33 W	12	7.0	узел <b>В</b>
25.05.1980	37.57 N	118.82 W	15	6.7	узел <b>В*</b>
02.05.1983	36.22 N	120.32 W	10	6.7	вне узлов
21.07.1986	37.54 N	118.45 W	9	6.5	узел <b>В*</b>
24.11.1987	33.01 N	115.84 W	2	6.7	узел <b>В</b>
18.19.1989	37.04 N	121.88 W	18	7.1	узел <b>В</b>
25.04.1992	40.37 N	124.32 W	15	7.1	узел <b>В</b>
28.06.1992	34.20 N	116.44 W	1	7.6	узел <b>В</b>
28.06.1992	34.20 N	116.83 W	5	6.7	узел <b>В*</b>
17.01.1994	34.21 N	118.54 W	18	6.8	узел <b>В*</b>
16.10.1999	34.59 N	116.27 W	0	7.4	вне узлов

ТАБЛИЦА 1. (окончание)

Дата	Координаты		Глубина очага, км	Магнитуда	Соотношение с прогнозом
	Широта, град.	Долгота, град.			
Италия ( $M \geq 6.0$ )					
23.11.1980	40.91 N	15.36 E	10	7.2	узел <b>B</b>
29.04.1984	43.26 N	12.55 E	12	6.1	вне узлов
07.05.1984	41.76 N	13.89 E	10	6.0	узел <b>B*</b>
26.09.1997	43.08 N	12.81 E	10	6.4	вне узлов
12.04.1998	46.25 N	13.65 E	10	6.0	узел <b>B</b>
Анды Южной Америки ( $M \geq 7.75$ )					
03.03.1985	33.13, S	71.87 W	33	7.8	узел <b>B</b>
30.07.1995	23.34, S	70.29 W	45	8.0	узел <b>B*</b>
Камчатка ( $M \geq 7.75$ )					
05.12.1997	54.84 N	162.04 E	33	7.8	узел <b>B</b>
Западные Альпы ( $M \geq 5.0$ )					
20.10.1985	44.81 N	6.63 E	10	5.0	узел <b>B</b>
11.02.1991	44.87 N	6.70 E	14	5.1	узел <b>B</b>
20.11.1991	46.78 N	9.52 E	10	5.1	узел <b>B*</b>
08.05.1992	47.27 N	9.50 E	5	5.0	узел <b>B</b>
14.12.1994	46.01 N	6.35 E	10	5.1	узел <b>H</b>
Большой Кавказ ( $M \geq 5.0, 5.5, 6.5$ )					
23.02.1981	41.79 N	45.97 E	33	5.1	узел <b>B</b>
12.05.1981	42.83 N	45.76 E	33	5.1	узел <b>B</b>
18.10.1981	43.25 N	45.30 E	33	5.7	узел <b>B</b>
29.11.1981	40.83 N	48.07 E	45	5.1	узел <b>B</b>
04.03.1984	43.07 N	45.61 E	33	5.3	узел <b>B</b>
04.07.1985	42.13 N	45.86 E	33	5.2	вне узлов
03.05.1988	42.47 N	47.66 E	22	5.1	узел <b>B*</b>
29.04.1991	42.45 N	43.67 E	17	7.3	узел <b>B*</b>
15.06.1991	42.46 N	44.01 E	9	6.5	узел <b>H</b>
23.10.1992	42.59 N	45.10 E	16	6.8	узел <b>B</b>
22.02.1993	42.56 N	43.86 E	10	5.0	узел <b>B*</b>
17.04.1994	41.95 N	46.32 E	33	5.0	узел <b>B</b>
31.01.1999	43.16 N	46.84 E	33	5.8	узел <b>B</b>
Пиренеи ( $M \geq 5.0$ )					
18.02.1996	42.83 N	2.53 E	10	5.0	узел <b>H</b>
04.10.1999	42.90 N	0.60 E	10	5.1	узел <b>B</b>
Гималаи ( $M \geq 6.5, 7.0$ )					
19.10.1991	30.78 N	78.77 E	10	7.0	узел <b>B*</b>
28.03.1999	30.51 N	79.40 E	15	6.6	узел <b>B</b>

*Примечание.* **B** – узлы, распознанные как высокосейсмичные; **B\*** – узлы, распознанные как высокосейсмичные, но на момент решения задачи в них не были зарегистрированы землетрясения с  $M \geq M_0$ ; **H** – узлы, распознанные как низкосейсмичные

При проверке результатов прогноза эпицентры сильных землетрясений, которые произошли в каждом регионе за период после публикации прогнозов, наносились на схему МСР соответствующего региона. Прогноз считался оправдавшимся, если эпицентр расположен в узле **B**, т.е. в пределах круга вокруг точки пересечения линеаментов. Радиус круга для каждого региона указан в табл.2. Прогноз считался неподтвержденным, если эпицентр оказывался в узле **H** или за пределами круга.

В результате проверки установлено, что суммарно во всех изученных регионах произошло 70 сильных землетрясения (см. табл. 1, 2), из которых

- 57 (84 %) произошло в узлах **B**,
- 4 (6 %) произошло в узлах **H**,
- 7 (10 %) произошло вне узлов (за исключением одного события на Большом Кавказе эти землетрясения приурочены к зонам линеаментов).

ТАБЛИЦА 2. Результаты проверки прогноза мест возникновения землетрясений

Регион	Пороговая магнитуда $M_0$	Радиус круга, км	Число узлов в регионе		Год публикации прогноза	Землетрясения, произо- шедшие в регионе после публикации прогноза		
			<b>В</b>	<b>Н</b>		Общее число	<b>В</b> узлах <b>В</b> (в том числе в узлах <b>В</b> *)	<b>В</b> узлах <b>Н</b>
Тянь-Шань и Памир	$\geq 6.5$	узлы	22	19	1972	6	4(1)	
Балканы, Малая Азия, Закавказье	$\geq 6.5$	62.5	78	87	1974	20	19(5)	1
Калифорния и Невада	$\geq 6.5$	25	77	75	1976	11	9(4)	
Италия	$\geq 6.0$	35	46	77	1979	5	3(1)	
Анды Южной Америки	$\geq 7.75$	75	40	21	1982	2	2(1)	
Камчатка	$\geq 7.75$	75	11	7	1984	1	1	
Западные Альпы	$\geq 5.0$	25	34	28	1985	5	4(1)	1
Большой Кавказ	$\geq 6.5$	узлы	26	38	1986	3	2(1)	1
	$\geq 5.5$	узлы	38	26	1987	5	4(1)	
	$\geq 5.0$	25	72	30	1988	13	11(3)	
Пиренеи	$\geq 5.0$	25	15	26	1987	2	1	1
Малый Кавказ	$\geq 5.5$	25	48	16	1991	0		
Гималаи	$\geq 7.0$	50	36	60	1994	1	1(1)	
	$\geq 6.5$	50	48	48	1992	2	2(1)	
Всего	–	–	591	558	–	68	57(19)	4

*Примечание.* Для Большого Кавказа и Гималаев, где прогноз дан для трех и двух магнитудных диапазонов, статистики нижнего порога магнитуды включают статистики более высоких порогов

#### 4. Обсуждение результатов и выводы

В первую очередь отметим тот факт, что 61 (90 %) сильное землетрясение произошло в узлах, установленных морфоструктурным районированием, что подтверждает исходную гипотезу, использованную в прогнозе: *эпицентры большинства сильных землетрясений приурочены к морфоструктурным узлам*. Заметим, что 10 % землетрясений, произошедших не в узлах, по-видимому, свидетельствуют о том, что небольшое число сильных землетрясений может происходить в узлах, образованных линеаменами более низких рангов, чем определенные нами на схемах МСР. Это косвенно подтверждается тем, что из восьми эпицентров, возникших не в узлах, семь расположены в зонах выделенных линеаментов (т.е., возможно, на пересечении выделенного линеамента с линеаментом более низкого ранга) и лишь один эпицентр – вдали от них (т.е., возможно, на пересечении линеаментов более низких рангов). Большинство из них относится к прогнозам в регионах, где распознавание проводилось на основе схем МСР в масштабе 1:2 500 000. В прогнозах для регионов, в которых МСР проводилось в масштабе 1:1 000 000 только одно землетрясение на Большом Кавказе произошло вне узлов. *Переход к составлению схем МСР в масштабе 1:1 000 000 повысил точность прогнозов.*

Из 57 сильных землетрясений, произошедших в узлах **В**, 19 (33 %) возникло в узлах **В\***, т.е. там, где в момент решения задачи распознавания землетрясения с магнитудой  $M_0$  и выше не были зарегистрированы. Остальные 42 землетрясения произошли в тех узлах, где и ранее наблюдались землетрясения соответствующих магнитуд. По-видимому, этот результат проверки свидетельствует в пользу долгосрочной пространственной группировки сильных землетрясений.

Поскольку классификации высоко- и низкосейсмичных узлов в работах [1, 5–20] нетривиальны (см. табл. 2), вероятность ошибки классификации высокосейсмичных узлов может быть оценена отношением числа сильных землетрясений в узлах **Н** к общему числу землетрясений в узлах.

Это отношение достаточно мало ( $4/57 = 7.01\%$ ) и в целом свидетельствует о высокой надежности результатов прогноза. Как видно из табл. 2, процент высокосейсмичных узлов во всех регионах, кроме задач для магнитуды 5.0 на Большом Кавказе, для магнитуды 5.5 на Малом Кавказе и для магнитуды 7.75 в Андах Южной Америки, не превышает  $2/3\%$ , тогда как процент предсказанных землетрясений выше  $2/3\%$ . Наиболее надежны результаты в регионах, где проверка ведется наиболее продолжительное время и, соответственно, статистика сильных землетрясений велика. К ним относятся Балканы, Малая Азия и Закавказье, а также Калифорния и Невада. Очевидно, прогнозы наименее обоснованы в регионах, где задача распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений решена относительно недавно, или в регионах, где задача распознавания решалась для высокой пороговой магнитуды, и число таких событий там пока невелико (Анды и Камчатка).

Учитывая, что материал проверки был довольно значительный, можно предположить, что процентное соотношение успехов и ошибок в обсуждаемых прогнозах в целом не будет сильно изменяться в дальнейшем.

Как видно из результатов проверки, использованный подход к определению мест возможного возникновения сильных землетрясений обеспечивает качество, которое в наибольшей степени зависит от следующих факторов:

- достоверность схемы МСР;
- адекватность характеристик узлов, используемых для их классификации, природе прогнозируемого явления;
- достаточность обучающей выборки  $\mathbf{V}_0$ .

Оценить достоверность схем МСР весьма затруднительно. Хотя методика МСР в значительной степени формализована, некоторый субъективизм в ней присутствует. Это прежде всего относится к местоположению поперечных линеаментов. Независимой объективной оценкой достоверности схем МСР является попадание эпицентров сильных землетрясений в морфоструктурные узлы. С этой точки зрения схемы МСР, использованные для разработки прогнозов, следует признать вполне удовлетворительными.

Выбор геолого-геофизических характеристик узлов, на основе которых проводится классификация узлов – наиболее ответственный этап в данной методике. Набор характеристик, применяемых для распознавания узлов, всегда ограничен возможностью их равноценного определения для каждого узла в пределах изучаемой территории, как правило, очень обширной по площади. Поэтому многие данные инструментальных геофизических, космогеодезических, геохимических и других наблюдений не привлекались для классификации узлов, хотя, возможно, и могли быть полезными. Заметим, что многих современных данных инструментальных наблюдений просто не существовало в период разработки обсуждаемых прогнозов. В ходе работ по прогнозу сформировался набор характеристик узлов, которые отражают интенсивность и контрастность новейших движений, а также уровень раздробленности земной коры в районе узлов. Эти характеристики измеряются по топографическим, геологическим картам и схемам МСР, поэтому могут быть определены практически в любом районе мира. Во всех изученных регионах [5–20] было установлено, что высокосейсмичные узлы характеризуются интенсивными и/или контрастными новейшими тектоническими движениями в сочетании с показателями повышенной раздробленности коры. Недавние результаты моделирования динамики блоковой структуры и сейсмичности показали, что повышенная раздробленность среды – необходимое условие для возникновения сильных землетрясений [30]. Таким образом, *особенности высокосейсмичных узлов, выявленные при их эвристическом прогнозировании, подтверждаются данными моделирования.*

Размер обучающей выборки  $\mathbf{V}_0$  в рассматриваемых нами работах составлял один-два десятка объектов. Как показывают результаты проверки, этого оказывается достаточно для получения надежной классификации узлов. Напомним, что нетривиальность и устойчивость классификации узлов многократно проверялись в ходе решения каждой задачи распознавания

мест возможного возникновения сильных землетрясений [1, 5–20] с помощью априорных контрольных экспериментов (“сейсмическая история”, “сейсмическое будущее”, “перенос критериев сейсмичности” и др.). Позитивные результаты проверки прогнозов подтверждают *эффективность методов контроля по материалу обучения, использованных при решении этих задач.*

Проведенная проверка показывает, что в рассмотренных регионах прогнозы мест возникновения сильных землетрясений являются достаточно надежными. Перспективы повышения качества прогноза в рамках данной методики связаны с решением следующих задач:

- совершенствование формализации методики МСР, включая разработку способов машинного анализа исходной геолого-геоморфологической информации [31];
- пополнение набора характеристик узлов, которые используются при распознавании и тестировании новых характеристик, основанных на данных современных инструментальных геофизических наблюдений;
- совершенствование методов априорного контроля устойчивости и неслучайности классификации узлов при распознавании.

Работа выполнена при частичной поддержке Международного научно-технического центра (грант 1293-99) и Департамента геологических наук Корнельского университета в рамках проекта Национального научного фонда США (грант EAR-9804859).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // ДАН СССР. 1972. Т.202, № 6. С.28–35.
2. Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука, 1967. 320 с.
3. Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Ранцман Е.Я. Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии. М.: Наука, 1977. С.33–49. (Вычисл. сейсмология; Вып. 10).
4. Ранцман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука, 1979. 170 с.
5. Бхатия С.С., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Рао М.Н., Филимонов М.Б., Четти Т.Р.К. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVIII. Гималаи ( $M \geq 6.5$ ) // Проблемы прогноза землетрясений и интерпретация сейсмологических данных. М.: Наука, 1992. С.71–83. (Вычисл. сейсмология; Вып. 25).
6. Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Косообоков В.Г., Ранцман Е.Я., Саллантен Ж. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мест возможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // Теория и анализ сейсмологической информации. М.: Наука, 1985. С.139–154. (Вычисл. сейсмология; Вып. 18).
7. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. X. Места землетрясений  $M \geq 7.75$  на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений. М.: Наука, 1982. С.56–67. (Вычисл. сейсмология; Вып. 14).
8. Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1984. № 1. С.20–23.
9. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 174 с.
10. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных. М.: Наука, 1973. С.107–133. (Вычисл. сейсмология; Вып.6).
11. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы // Машинный анализ цифровых сейсмических данных. М.: Наука, 1974. С.3–40 (Вычисл. сейсмология; Вып.7).
12. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Ранцман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. III. Случай, когда границы дизъюнктивных узлов неизвестны // Машинный анализ цифровых сейсмических данных. М.: Наука, 1974. С.41–58. (Вычисл. сейсмология; Вып.7).
13. Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф., Ранцман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Условия возникновения сильных землетрясений (Калифорния и некоторые другие регионы) // Исследование сейсмичности и моделей Земли. М.: Наука, 1976. С.3–91. (Вычисл. сейсмология; Вып.9).

14. Горшков А.И., Капуто М., Кейлис-Борок В.И., Офицерова Е.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IX. Италия,  $M \geq 6.0$  // Теория и анализ сейсмологических наблюдений. М.: Наука, 1979. С.3–17. (Вычисл. сейсмология; Вып.7).
15. Горшков А.И., Жидков М.П., Раницман Е.Я., Тумаркин А.Г. Морфоструктура Малого Кавказа и места землетрясений,  $M \geq 5.5$  // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1991. N 6. С.30–38.
16. Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzman E., Rotain I., Soloviev A. Pattern recognition of earthquake-prone areas in Italy // Phys. Earth Planet. Inter. 1980. Vol.21. P.305–320.
17. Cisternas A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A., Kossobokov V., Lambert M., Rantsman E., Sallantin J., Saldano H., Soloviev A., Weber C. A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the eastern Alps // Ann. Geophys. 1985. Vol.3, N 2. P.249–270.
18. Bhatia S.C., Chetty T.R.K., Filimonov M., Gorshkov A., Rantsman E., Rao M.N. Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan arc region // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet Sci.). 1992. Vol.101, N 4. P.369–385.
19. Gelfand I., Guberman Sh., Izvekova M., Keilis-Borok V., Rantsman E. Criteria of high seismicity, determined by pattern recognition // Tectonophysics. 1972. Vol.13. P.415–422.
20. Gelfand I., Guberman Sh., Keilis-Borok V., Knopoff L., Press F., Rantsman E., Rowtain I., Sadovsky A. Pattern recognition applied to earthquake epicentres in California // Phys. Earth Planet. Inter. 1976. Vol.11. P.227–283.
21. Gabrielov A., Keilis-Borok V.I., Jackson D.D. Geometric incompatibility in a fault system // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 1996. Vol.93, N 9. P.3838–3842.
22. Гласко М.П., Раницман Е.Я. О современной блоковой структуре равнинно-платформенной территории (на примере Истринского морфоструктурного узла) // ДАН СССР. 1989. Т.33, N 6. С.1345–1348.
23. Гласко М.П., Раницман Е.Я. О морфоструктурных узлах – местах активизации современных рельефообразующих процессов // Геоморфология. 1992. N 4. С.53–61.
24. Раницман Е.Я. Морфоструктурное районирование Западно-Сибирской платформы по формализованным признакам в связи с локальным прогнозом месторождений нефти и газа // Геоморфология. 1989. N 1. С.30–39.
25. Гвишиани А.Д., Горшков А.И. О связи эндогенного оруденения с результатами распознавания сейсмоопасных пересечений линеаментов // ДАН СССР. 1989. Т.307, N 2. С.328–332.
26. Горшков А.И., Жидков М.П. Распознавание мест возникновения крупных обвально-оползневых дислокаций (Малый Кавказ) // ДАН. 1997. Т.356, N 6. С.789–791.
27. Горшков А.И., Жидков М.П. Распознавание крупных обвально-оползневых дислокаций в связи с проблемой оценки сейсмогеологической опасности // Физика Земли. 1998. N 3. С.92–95.
28. Губерман Ш.А., Ротвайн И.М. Проверка результатов прогноза мест возникновения сильных землетрясений (1974–1984гг.) // Изв. АН СССР. Физика Земли. 1986. N 12. С.72–73.
29. Global Hypocenter Data Base (GHDB), 2000. CD-ROM and its updates. NEIC/USGS, USA. Denver: Colorado. 2000.
30. 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. Seismology. 1997. Vol 1, N 2. P.151–160.
31. Горшков А.И., Кандоба И.Н., Сафронович Е.Л., Сладков И.В. Автоматизированный анализ геолого-геоморфологической информации при морфоструктурном районировании // Вопросы геодинамики и сейсмологии. М.: ГЕОС, 1998. С.336–347. (Вычисл. сейсмология; Вып.30).