

УДК 550.341

## РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ. XIX. ГИМАЛАИ, $M \geq 7.0$

С.С.Бхатия, М.Н.Рао, Т.Р.К.Четти

*Национальный институт геофизических исследований, Индия*

Е.Я.Ранцман

*Институт географии Российской академии наук*

А.И.Горшков, М.Б.Филимонов, Н.В.Шток

*Международный институт теории прогноза землетрясений  
и математической геофизики Российской академии наук*

Цель работы – определить в пределах горного пояса Гималаев места, где возможно возникновение землетрясений с магнитудой  $M \geq 7.0$ . Эта задача решается на основе схемы морфоструктурного районирования Гималаев. Объекты изучения – 50-километровые окрестности точек пересечения осей морфоструктурных линеаментов, с которыми, как установлено ранее, связаны эпицентры землетрясений с  $M \geq 6.5$ . Классификация пересечений линеаментов Гималаев для оценки возможности возникновения землетрясений с  $M \geq 7.0$  проведена с помощью процедуры переноса критериев сейсмичности. Для этого были использованы критерии сейсмичности для  $M \geq 7.0$ , полученные ранее при распознавании пересечений линеаментов горного пояса Анд Южной Америки. В результате переноса критериев из 96 пересечений линеаментов Гималаев 36 были классифицированы как высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$ . Все пересечения линеаментов, в окрестности которых известны землетрясения с  $M \geq 7.0$ , были определены как высокосейсмичные для указанной магнитуды. С целью контроля достоверности полученного результата на территории Гималаев были определены участки максимальной концентрации выделившейся сейсмической энергии. Установлено, что в зонах наибольшей концентрации этой энергии расположены пересечения линеаментов, в которых возможно возникновение землетрясений с  $M \geq 7.0$ .

## RECOGNITION OF EARTHQUAKE PRONE AREAS. XIX. THE HIMALAYA, $M \geq 7.0$

S.C.Bhatia, M.N.Rao, T.R.K.Chetty

*National Geophysical Research Institute, India*

E.Ya.Rantsman

*Institute of Geography Russian Academy of Sciences*

A.I.Gorshkov, M.B.Filimonov, N.V.Shtock

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

We aim recognition of earthquake-prone areas ( $M \geq 7.0$ ) in the Himalyan mountain belt. The solution to this problem is based on morphostructural zoning of this area. The analyzed patterns are 50-km neighborhoods of morphostructural lineament intersections associated,

as it was previously shown, with  $M \geq 6.5$  epicenters. The classification procedure for the recognition was used with traits of seismicity developed for the case of the Andes in the South America. Using this criteria we classified 36 lineament intersection out of 96 as highly seismic ( $M \geq 7.0$ ). All intersections with  $M \geq 7.0$  earthquakes in the chosen neighborhoods were identified as highly seismic. To control the reliability of the classification so obtained we determined areas with maximum released seismic energy. We showed that earthquake-prone intersections are located within these areas.

## ВВЕДЕНИЕ

Статья продолжает исследования по выделению высокосейсмичных мест в Гималаях, начатые в работах [1, 2], где на основе схемы морфоструктурного районирования с помощью алгоритма распознавания "Кора-3" были определены пересечения морфоструктурных линеаментов, в которых возможны землетрясения с  $M \geq 6.5$ . Цель данной работы – определить пересечения линеаментов, вблизи которых возможны землетрясения с  $M \geq 7.0$ . Рассматриваются 96 пересечений морфоструктурных линеаментов, установленных при проведении морфоструктурного районирования Гималаев, и к которым приурочены эпицентры известных в регионе сильных землетрясений. Морфоструктурное районирование Гималаев подробно описано в [1, 2].

Гималаи характеризуются высоким уровнем сейсмичности. За последние 150 лет здесь известно восемь землетрясений с  $M \geq 7.0$ . В связи со строительством в Гималаях крупных гидроэлектростанций с высокими плотинами большой интерес представляет выделение мест, в которых возможно возникновение землетрясений больших магнитуд.

Небольшое число землетрясений с  $M \geq 7.0$  не позволяет сформировать материал обучения для решения задачи распознавания высокосейсмичных пересечений линеаментов относительно указанной магнитуды. Поэтому в настоящей работе классификация пересечений линеаментов Гималаев на высокосейсмичные ( $B$ ) и низкосейсмичные ( $H$ ) для  $M \geq 7.0$  производится путем переноса критериев сейсмичности, полученных при распознавании пересечений линеаментов Анд Южной Америки для той же пороговой магнитуды [3]. Использование критериев сейсмичности Анд обуславливается сходством современной морфоструктуры Анд и Гималаев, сформировавшейся в обоих случаях в зонах коллизии крупных литосферных плит.

Процедура переноса критериев не позволяет оценить надежность получаемой классификации с помощью ранее разработанных контрольных экспериментов применительно к задачам распознавания мест возможных землетрясений [4]. Поэтому в данной работе с целью контроля результатов предпринята попытка сопоставить полученную классификацию пересечений линеаментов на высоко- и низкосейсмичные с участками максимальной концентрации сейсмической энергии в Гималаях, выделенными по методике [5]. Эта методика позволяет определить наименьшую площадь, на которой выделилась наибольшая часть общей средней сейсмической энергии данного региона.

## ПЕРЕНОС КРИТЕРИЕВ СЕЙСМИЧНОСТИ АНД НА ГИМАЛАИ

При решении задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясения с  $M \geq 6.5$  в Гималаях для формирования материала обучения рассматривались коровые землетрясения, параметры которых приведены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Коровые землетрясения Гималаев с  $M \geq 6.5$

Дата	Координаты		$M$	Номер ближайшего пересечения
	$\varphi$ , N	$\lambda$ , E		
26.08.1833	27.50	86.50	7.5	57
18.05.1852	27.00	88.00	6.5	68
30.05.1885	34.60	74.38	7.0	4
04.04.1905	32.30	76.25	8.0	17
28.02.1906	32.00	77.00	7.0	18
14.10.1911	31.00	80.50	6.8	32
03.02.1915	29.50	91.50	7.1	75
28.08.1916	30.00	81.00	7.5	39
27.05.1936	28.50	83.50	7.0	49
04.06.1945	30.30	80.00	6.5	35
22.06.1945	32.60	75.90	6.5	9
29.07.1947	28.80	93.70	7.7	90
16.08.1950	27.48	92.64	6.7	85
18.11.1950	27.73	94.59	6.7	88
12.03.1951	28.19	94.49	6.5	89
22.04.1951	29.21	94.30	6.5	91
23.02.1954	27.80	91.07	6.5	77
04.09.1954	28.30	83.08	6.7	49
29.07.1960	26.90	90.30	6.5	78
06.03.1966	31.50	80.50	6.5	32
19.01.1975	32.45	78.43	6.8	28
29.07.1980	29.59	81.09	6.6	38
20.08.1988	26.78	86.61	6.5	56

Эпицентры всех рассматриваемых землетрясений приурочены к местам пересечения линеаментов. Их удаление от точек пересечения осей линеаментов не превышает 50 км.

Как видно из табл. 1, в Гималаях лишь вблизи восьми пересечений линеаментов (NN 4, 17, 18, 39, 49, 57, 75, 90) известны землетрясения с  $M \geq 7.0$ . Такого количества событий недостаточно для формирования обучающей выборки высокосейсмичного класса, чтобы решать задачу распознавания для  $M \geq 7.0$ . Поэтому для классификации пересечений линеаментов в Гималаях на высоко- и низкосейсмичные для  $M \geq 7.0$  была использована процедура переноса критериев сейсмичности. Она заключается в использовании этих критериев, установленных при распознавании мест возможных землетрясений в одном регионе, для идентификации высокосейсмичных мест в другом.

Необходимым условием применения этой процедуры является однотипность объ-

ектов распознавания и общность геолого-геоморфологических параметров, используемых для их классификации. В Андах и Гималаях в качестве объектов распознавания рассматривались пересечения осей морфоструктурных линейментов, описанные единым набором параметров.

Классификация пересечений линейментов Гималаев проведена по характерным признакам (критериям сейсмичности), установленным в результате классификации пересечений линейментов Анд. При этом в критериях сейсмичности Анд использовались пороги дискретизации параметров, установленные в [1, 2] для тех же параметров при распознавании в Гималаях.

Критерии сейсмичности для  $M \geq 7.0$  в Андах Южной Америки были получены в [3] на основе следующих морфометрических и морфоструктурных параметров:

$H_{\max}$  – максимальная высота рельефа в окрестности пересечения,

$H_{\min}$  – минимальная высота рельефа в окрестности пересечения,

$\Delta H$  – размах высот,

$R_1$  – расстояние от пересечения до ближайшего линеймента I ранга,

$R_2$  – то же, для линеймента II ранга,

$H_r$  – высший ранг линеймента в окрестности пересечения.

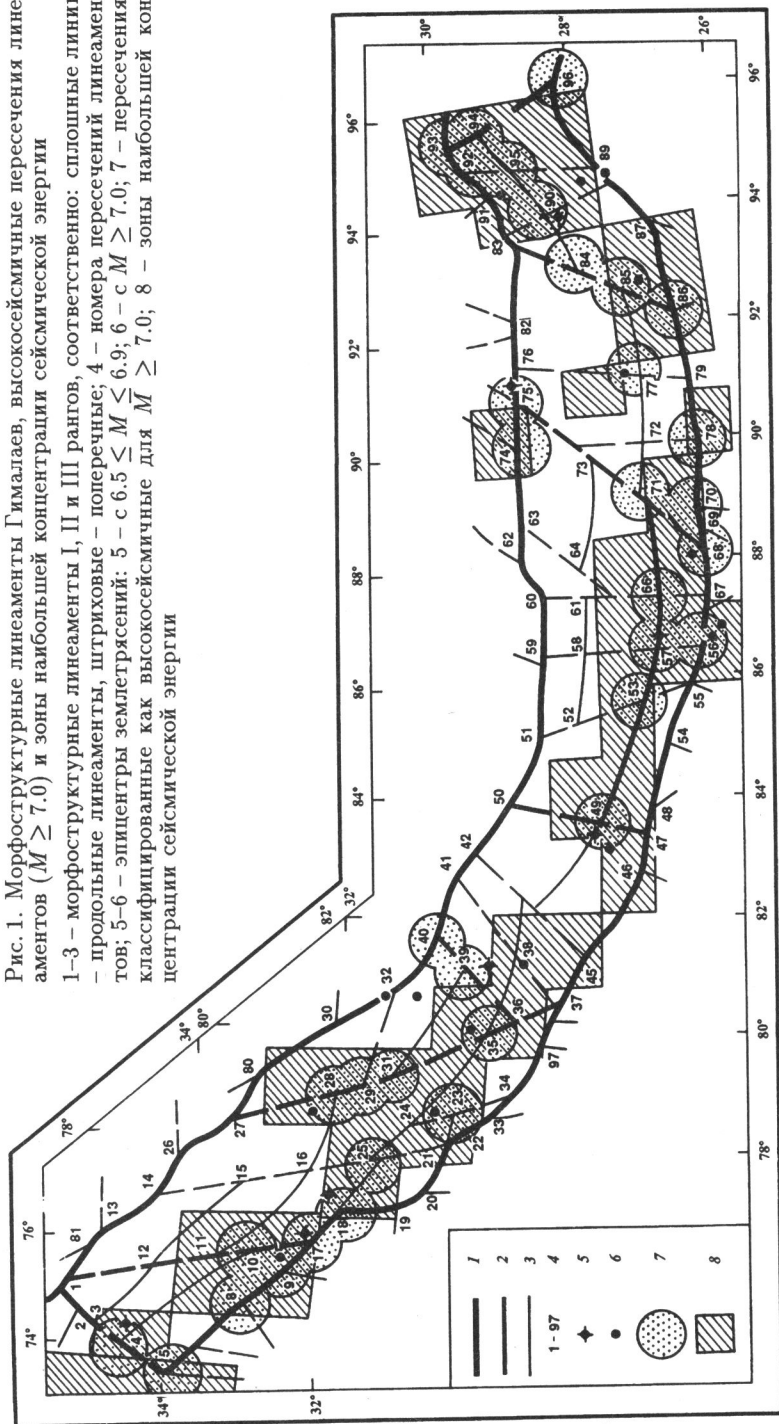
В табл. 2 приведены характерные признаки (критерии сейсмичности) высокосейсмичных ( $B$ ) и низкосейсмичных ( $H$ ) пересечений линейментов, установленные при распознавании в Андах.

ТАБЛИЦА 2. Критерии сейсмичности Анд для  $M \geq 7.0$

Класс	Параметр пересечения линейментов					
	$H_r$	$H_{\max}$ , м	$H_{\min}$ , м	$R_2$ , км	$R_1$ , км	$\Delta H$ , м
$B$			<300	<50		>4400
				<120	<67	>4400
	I или II					>4400
$H$	II или III			>120		<4400
		<3600			>67	<4400
			>300	>50		
	I		>300	>120		
			>300	>50		

По этим признакам была проведена классификация пересечений линейментов Гималаев. К классу  $B$  (для  $M \geq 7.0$ ) относились пересечения, удовлетворяющие условию:  $(V_B - V_H) \geq 1$ , где  $V_B$  и  $V_H$  – количество признаков классов  $B$  и  $H$  из табл. 2 соответственно, которыми обладает данное пересечение линейментов. Таким образом, как потенциально высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$  были классифицированы следующие 36 пересечений линейментов в Гималаях: NN 4, 6, 8, 9, 10, 17, 18, 23, 25, 28, 29, 31, 35, 39, 40, 49, 53, 56, 57, 66, 68, 70, 71, 74, 75, 77, 78, 84, 85, 86, 90, 92, 93, 94, 95, 96. Их местоположение показано на рис. 1.

Рис. 1. Морфоструктурные линзаменты Гималаев, высокосейсмичные пересечения линзаментов ( $M \geq 7.0$ ) и зоны наибольшей концентрации сейсмической энергии  
 1-3 - морфоструктурные линзаменты I, II и III рангов, соответственно: сплошные линии - продольные линзаменты, штриховые - поперечные; 4 - номера пересечений линзаментов; 5-6 - эпицентры землетрясений: 5 - с  $6.5 \leq M \leq 6.9$ ; 6 - с  $M \geq 7.0$ ; 7 - пересечения, классифицированные как высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$ ; 8 - зоны наибольшей концентрации сейсмической энергии



В результате переноса критериев все пересечения, где известны землетрясения с  $M \geq 7.0$ , а также большинство пересечений, вблизи которых находятся эпицентры землетрясений с  $M \geq 6.5$ , классифицированы как высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$  (см. рис. 1).

В работах [1, 2] к классу *B* для  $M \geq 6.5$  было отнесено 48 пересечений линейментов. В данной работе 36 пересечений, в которых возможны землетрясения с  $M \geq 7.0$ , составляют подмножество 48 пересечений, отнесенных ранее к классу *B* для  $M \geq 6.5$ , что свидетельствует о непротиворечивости обоих результатов.

Местоположение и морфоструктурные особенности пересечений, отнесенных к классу *B* для  $M \geq 7.0$ , отвечает тем же закономерностям, которые были отмечены в работе [1] при анализе расположения пересечений линейментов, классифицированных как *B* для  $M \geq 6.5$ . В обоих случаях абсолютное большинство высокосейсмичных пересечений включает линейменты высших (I или II рангов), что указывает на высокую степень современной тектонической активности этих линейных зон, разделяющих наиболее крупные элементы земной коры: горные страны и мегаблоки. Из пересечений класса *B* для  $M \geq 7.0$  восемнадцать расположены на линейментах I ранга, отделяющих Гималаи от сопредельных горных стран другого генезиса или облика рельефа, а также от равнинных территорий Индийской платформы. Тринадцать пересечений класса *B* расположено на линейментах II ранга, преимущественно поперечных, вдоль которых при проведении морфоструктурного районирования [1, 2] были отмечены наибольшие смещения осевого гребня Гималаев (линейменты 27–37; 68–75 и 83–86). Высокосейсмичными оказались все пересечения (NN 49, 53, 57, 66 и 71 на рис. 1) на продольном линейменте II ранга 49–71, который в Непальских Гималаях отделяет наиболее приподнятый участок осевого хребта от передового хребта Махабхарат. Пять пересечений класса *B* (NN 23, 25, 77, 90 и 95) сформированы линейментами только III ранга.

Большинство высокосейсмичных пересечений, связанных с линейментами I ранга, расположено на линейменте 6–96, который отделяет горное сооружение Гималаев от аккумулятивных равнин Предгималайского прогиба, заложенного на северном краю Индийской плиты. Эти пересечения сконцентрированы на западном участке линеймента (NN 6, 8, 9, 17, 18) и в его центральной части (NN 56, 68, 69, 70, 78). На отрезке линеймента между пересечениями N 19 и N 55 все пересечения отнесены к классу *H* для  $M \geq 7.0$ . Напомним также, что ранее [1, 2] эти пересечения (за исключением N 19 и N 21) были отнесены к классу *H* и для  $M \geq 6.5$ . Это противоречит результатам К.Н. Хаттри, который в работе [6], основываясь на идее сейсмического цикла, дифференцировал зону сочленения Гималаев с Индийской плитой по степени сейсмического потенциала. Участок зоны сочленения, соответствующий отрезку линеймента I ранга между пересечениями N 17 и N 54, им определен как область наивысшего сейсмического потенциала, в которой возможны сильнейшие разрушительные землетрясения. Согласно результатам, полученным в данной работе (а также в [1, 2]), в пределах зоны наивысшего сейсмического потенциала, выделяемой К.Н. Хаттри, лишь в самой западной ее части, в пересечениях N 17 и N 18, возможны землетрясения с  $M \geq 7.0$ , а в пересечениях N 19 и N 22 возможны землетрясения с  $6.5 \leq M < 7.0$ . Магнитуда землетрясений, возможных вблизи пересечений линейментов (NN 33, 34, 97, 37, 45, 46, 47, 48, 54, 55), расположенных в этой зоне, не может превышать 6.5. Более

точная оценка сейсмического потенциала зоны сочленения Гималаев с Индийской плитой требует проведения дополнительных исследований, включая детальный морфоструктурный анализ этой зоны.

### СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ЛИНЕАМЕНТОВ С ОБЛАСТЯМИ НАИБОЛЬШЕЙ КОНЦЕНТРАЦИИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Сопоставление проводилось с целью выяснения пространственной корреляции областей наибольшей концентрации сейсмической энергии в Гималаях с местоположением пересечений линеаментов класса *B* для  $M \geq 7.0$  в результате переноса критериев сейсмичности.

Расчет наибольшей концентрации энергии требует использования максимально полного каталога для всей рассматриваемой территории. Необходимые данные были получены путем компиляции трех каталогов: NEIC, ISC, и IMD (Indian Meteorological Department), однако в них для 40% событий, относящихся к изучаемому региону, отсутствуют данные о магнитудах. Для определения этих данных был использован алгоритм, позволяющий оценить величину магнитуды землетрясения по числу сейсмостанций, на которых оно было зарегистрировано. С этой целью была составлена обучающая выборка землетрясений (рис. 2), для которых значения магнитуд совпадают во всех трех использованных каталогах. Аппроксимация проведена автоматически с помощью степенной регрессионной функции.

Для изучения концентрации энергии в Гималаях регион был разделен на три области: Западные, Центральные и Восточные Гималаи (см. рис. 1). За границу между Западными и Центральными Гималаями был принят поперечный линеамент II ранга 27–37, а за границу между Центральными и Восточными Гималаями

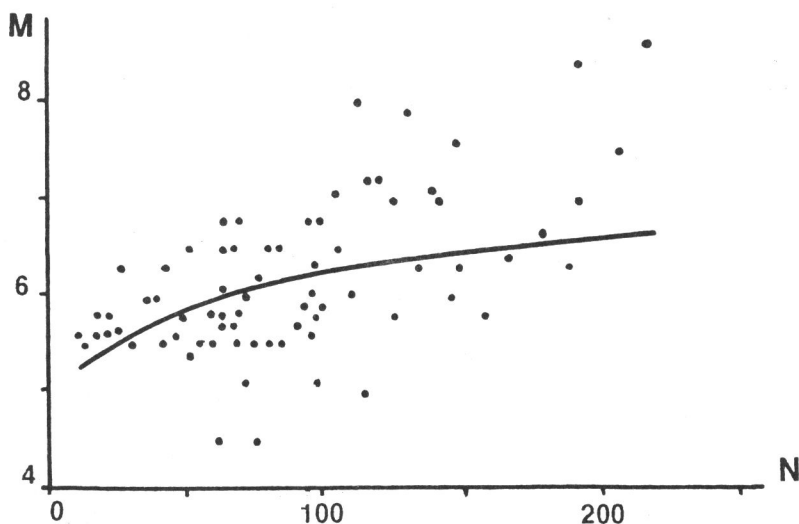


Рис. 2. Зависимость значения магнитуды  $M$  от числа станций  $N$ , зарегистрировавших землетрясение

– поперечный линеамент II ранга 68–75. Каждая из областей была разделена на элементарные площадки, при выборе размера которой согласно [5] требовалось, чтобы ее размер был не меньше, чем размер очага наибольшего землетрясения в этой области. Кроме того, от размера площадки зависит детальность проводимого анализа. С другой стороны, число площадок должно быть большим для проведения по ним достаточно надежного осреднения.

С учетом перечисленных факторов рассматривались площадки размером  $40 \times 50$  км. Затем для каждой площадки подсчитывалось число событий в ней и вычислялось суммарное значение сейсмической энергии. Для пересчета магнитуды в энергию использовалась формула из [7]:  $\log E = 2.4m_b - 1.2$ . Результаты расчетов представлены на рис. 1, на котором группы площадок, где выделилось более 80% суммарной сейсмической энергии, заштрихованы.

Видно, что в целом места наибольшей концентрации энергии формируют зону сложной конфигурации, протягивающуюся преимущественно вдоль южного макросклона Гималайского хребта, включая и значительные отрезки зоны его сочленения с Индийской плитой. При этом абсолютное большинство пересечений линеаментов, классифицированных как высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$ , расположены в пределах оконтуренной зоны наибольшей концентрации сейсмической энергии. Это подтверждает, что в результате переноса критериев сейсмичности Анд на Гималаи, в последнем регионе как высокосейсмичные были выделены те пересечения линеаментов, которые действительно характеризуются наиболее высоким уровнем сейсмической активности.

*Благодарности.* Исследования А.И. Горшкова и Е.Я. Ранцман были поддержаны Государственным Департаментом США по программе "Человек и Биосфера" (грант 1753-300201).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. 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. 274–284. (Вычисл. сейсмология; Вып.25).
2. Bhatia S.C., Chetty T.R.K., Filimonov M.B., Gorshkov A.I., Rantsman E. Ya., Rao M.N. Identification of potential areas for the occurrence of strong earthquakes in Himalayan arc region // Proc. Indian Acad. Sci. (Earth Planet. Sci). Vol.101, No.4. 1992. P. 369–385.
3. Жидков М.П., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVII. Общие критерии высокой сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки // Компьютерный анализ геофизических полей. М.: Наука, 1990. С. 274–284. (Вычисл. сейсмология; Вып.23).
4. Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Ранцман Е.Я. и др. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука, 1988. 175 с.
5. Petrosyan A.L., Pisarenko V.F., Shtock N.V. A study in the spatial structure of seismicity. Proceedings 4th International Symposium on the Analysis of Seismicity and Seismic Risk. Vol. 1. Bechynne: 1989. P. 29–36.
6. Khattri K.N. Great earthquakes, seismicity gaps and potential for earthquake disaster along the Himalayan plate boundary // Tectonophysics. 1987. Vol. 138. P. 79–92.
7. Касагара К. Механизм землетрясений. М.: Мир, 1985. 380 с.