

## ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ МЕСТА СИЛЬНЫХ ( $M \geq 7.0$ ) ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В ЭЛЛИНИДАХ (ГРЕЦИЯ)

© 2020 г. А. И. Горшков<sup>1, \*</sup>, О. В. Новикова<sup>1</sup>, И. Гаудемер<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт физики Земли Парижа, г. Париж, Франция

\*E-mail: gorshkov@mitp.ru

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 24.06.2019 г.

Для территории Эллинид, расположенных в южной части Балканского полуострова, определены геолого-геоморфологические критерии мест, в которых возможно возникновение землетрясений с  $M \geq 7.0$ . В качестве сейсмогенерирующих структур рассматриваются пересечения зон морфоструктурных линеаментов, которые были определены методом морфоструктурного районирования. Геолого-геоморфологические параметры были единообразно определены для всех пересечений линеаментов. Установлено, что эпицентры землетрясений с  $M \geq 7.0$  приурочены к пересечениям линеаментов. Те пересечения, с которыми связаны наблюдаемые землетрясения  $M \geq 7.0$ , использованы для обучения алгоритма распознавания образов “Кора-3”. На основе геолого-геоморфологических параметров алгоритмом распознавания были найдены характерные признаки, по которым все пересечения линеаментов были разделены на высоко (**В**) и низкосейсмичные (**Н**) относительно пороговой магнитуды  $M_0 = 7.0$ . В результате к высокосейсмичным были отнесены все эти пересечения, а также еще 24 пересечения, в которых события с  $M \geq 7.0$  ранее не наблюдались. В частности, такие пересечения распознаны на острове Эвбея, где западная ветвь Северо-Анатолийского разлома подступает к берегам центральной Греции. Еще одна группа **В**-пересечений расположена в центральной части Коринфского залива – наиболее тектонически активной области региона, в которой однако землетрясения  $M \geq 7.0$  до сих пор не зафиксировано. Характерные признаки **В**- и **Н**-пересечений (критерии сейсмичности) сформированы морфометрическими параметрами. Интервалы значений этих параметров, присущие **В**-пересечениям, косвенно свидетельствуют о процессах опускания и растяжения, доминирующих в областях расположения таких пересечений.

*Ключевые слова:* морфометрические параметры, пересечения линеаментов, алгоритм распознавания, метод распознавания образов.

DOI: 10.31857/S0002333720010032

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Данная работа продолжает цикл исследований по определению мест возможного возникновения сильных землетрясений с помощью методов распознавания образов. Это направление развивается в ИТПЗ РАН с 1990 г., а ранее, с 70-х гг. XX в., в ИФЗ РАН. Основы методологии были сформулированы И.М. Гельфандом, В.И. Кейлис-Бороком и Е.Я. Ранцман [Гельфанд и др., 1972], предложивших гипотезу о приуроченности эпицентров сильных землетрясений (с магнитудой  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – заданный порог) к местам пересечений морфоструктурных линеаментов, которые являются с помощью специальной методики *морфоструктурного районирования* (МСР), изложенной в работах [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977; Ранцман, 1979; Gorshkov et al., 2003]. Гипо-

теза о приуроченности эпицентров была подтверждена как статистическим анализом взаимного расположения эпицентров и пересечений морфоструктурных линеаментов, проведенным А.Д. Гвишиани и А.А. Соловьевым [1981], так и непосредственной проверкой результатов распознавания по данным о землетрясениях, которые произошли в регионах, изученных с помощью данного подхода, после публикации результатов распознавания [Горшков и др., 2001; Горшков, 2010; Соловьев и др., 2015]. Результаты последней проверки для всех 26 ранее изученных регионов [Gorshkov, Novikova, 2018] показали, что около 90% землетрясений рассматривавшихся магнитуд произошли в пересечениях линеаментов, а 86% таких событий связаны с пересечениями, которые были распознаны как высокосейсмичные. Отмеченные при проверках нарушения гипотезы

могут быть связаны с ошибками как в регистрации места и силы землетрясений, так и в определении местоположения пересечений.

Рассматриваемый регион — один из самых сейсмичных в Средиземноморье — включает южную часть Балканского полуострова, принадлежащую Греции. Высокая сейсмичность изучаемой территории обусловлена сложной геодинамической обстановкой, создаваемой взаимодействием разномасштабных Евразийской, Африканской, Адриатической, Эгейской и Анатолийской континентальных плит. По данным [Parazachos et al., 2000; Makropoulos, Burton, 1981] за период с 1444 г. здесь произошло 19 событий с  $M \geq 7.0$ . Максимальные магнитуды отмечены при землетрясении в 1867 г. ( $M_w = 7.4$ ) на острове Кефалиния в Ионическом море и при Пелопонесском землетрясении в 1886 г. ( $M_w = 7.3$ ) на юго-западе Греции [Parazachos et al., 2000].

Исследования по оценке сейсмической опасности Греции, основанные, как правило, на вероятностных подходах, активно развиваются в последние десятилетия как для всей территории, так и для отдельных участков, наиболее часто подвергавшихся сейсмическим воздействиям [Ambraseys, Finkel, 1993; Ambraseys, Jackson, 1997; Burton et al., 2003; ЕАК, 2003; Papadopoulos et al., 2002; Tselentis, Danciu, 2010]. С этой же целью в регионе активно ведется исследование и картирование активных разломов для изучения их связи с конкретными сейсмическими событиями [Bernard et al., 2006; Boccaletti et al., 1997; Briole et al., 2000; Ganas et al., 2004; Chousianitis et al., 2013; Jackson et al., 1982; Kokkalas et al., 2007; Pavlides et al., 2002; 2007; Tsimi et al., 2007; <http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html>].

Цель данной работы — определить места возможного возникновения мест землетрясений с  $M \geq 7.0$  в Эллинидах. Ранее данная методология применялась к изучаемой территории для определения **В**-пересечений относительно магнитудного порога  $M_0 = 6.5$  на основе схемы морфоструктурного районирования (МСР) в масштабе 1 : 2500000, включавшей обширный регион от Балканского полуострова на западе до Армянского нагорья в Закавказье на востоке [Гельфанд и др., 1974]. В отличие от той работы мы решаем задачу распознавания **В**-пересечений для более высокого порога  $M_0 = 7$  на основе более детальной схемы МСР, составленной в масштабе 1 : 1000000.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОБЪЕКТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ И ИХ ПАРАМЕТРЫ

Предметом анализа в работе являются пресеечения морфоструктурных линеаментов, местоположение которых в Эллинидах определено в результате МСР [Алексеевская и др., 1977; Ранц-

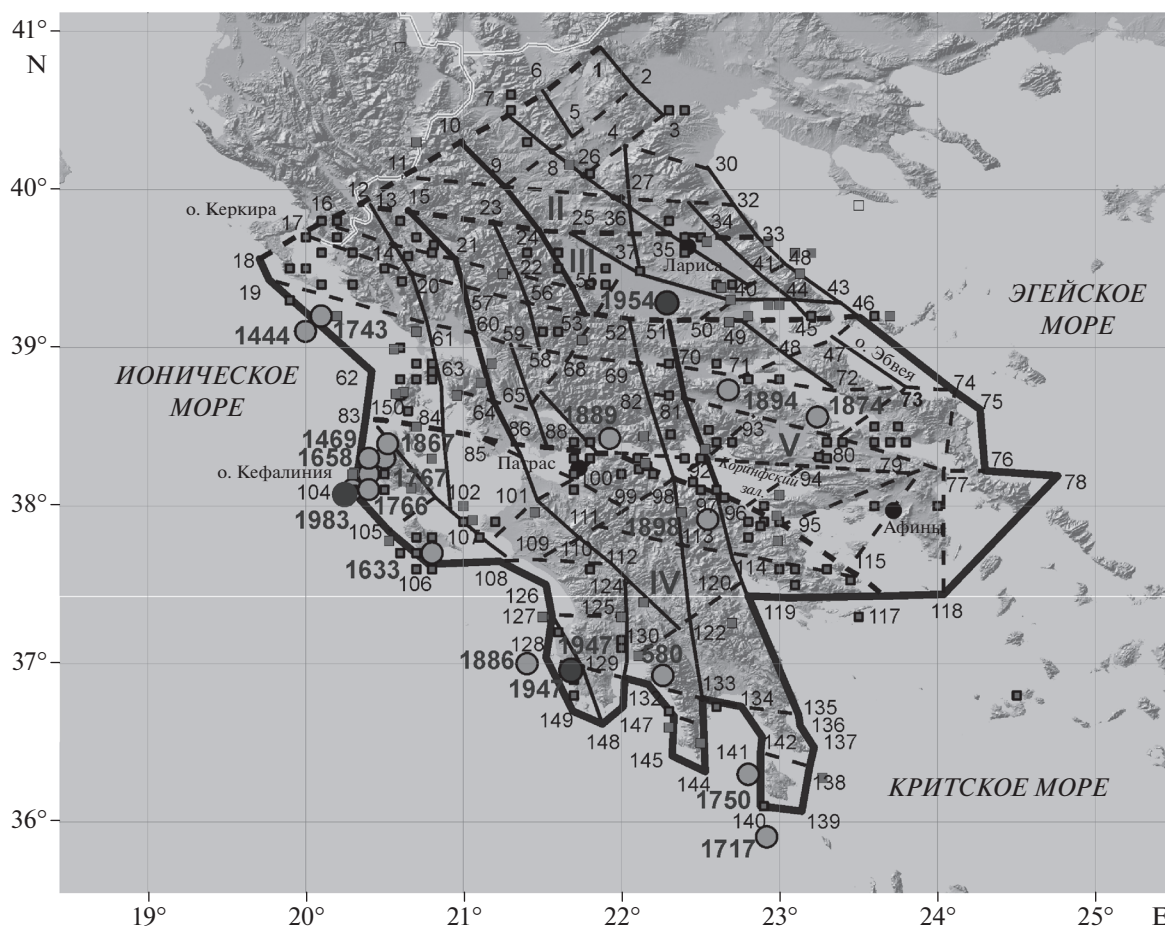
ман, 1979], проведенного в масштабе 1 : 1000000 (рис. 1).

### 2.1. Морфоструктурное районирование Эллинид

МСР основано на представлении о иерархическом блоковом строении земной коры, которое обуславливает возникновение сейсмичности за счет взаимодействия блоков [Садовский, Писаренко, 1991; Keilis-Borok, 1990]. На схемах МСР определяются блоки трех иерархических уровней. Низший уровень (третий ранг) состоит из блоков, для которых характерны близкие значения информативных признаков рельефа (уровень высот и ориентация линейных форм рельефа). Границы блоков проводятся там, где резко и существенно меняется значение хотя бы одного признака. Блоки объединяются в мегаблоки, представляющие второй уровень иерархии. Если значения информативных признаков от одного блока к другому изменяются монотонно, то границы мегаблоков проводятся там, где монотонность нарушается. Самая крупная единица районирования первого ранга — горная страна — территория единого облика рельефа и одного типа процесса горообразования. Линеаменту присваивается высший ранг морфоструктур, которые он разделяет.

Современная структура и конфигурация горного пояса Эллинид создана сложным взаимодействием Африканской плиты с Евразийской и расположенными между ними Адриатической, Эгейской и Анатолийской микроплитами [McKenzie, 1970]. Горное сооружение Эллинид простирается в крутом северо-западном направлении вдоль берегов Ионического моря. Эллиниды разделяют на северные, представленные горами Пиндос, и южные, занимающие полуостров Пелопоннес (см. рис. 1). Они разделены Коринфским заливом, заполняющем зону молодого четвертичного рифта [Argitjo et al., 1996]. В восточном направлении горные хребты северных Эллинид (Внешние Эллиниды) резко снижаются, замещаясь разрозненными невысокими хребтами, которые чередуются с внутриворонными и прибрежными впадинами. Структурно эти области пониженного рельефа относятся к Внутренним Эллинидам, простирающимся в восточном направлении до Эгейского моря [Kilias et al., 2002].

Линеаменты первого ранга отделяют горную страну Эллинид от прилегающих крупномасштабных геоструктур первого ранга. На западе, востоке и юге линеаменты первого ранга отделяют горное сооружение Эллинид от глубоководных впадин Ионического, Эгейского и Критского морей, соответственно (рис. 1). Зоны этих линеаментов трассируются вдоль континентального склона и включают крупные тектонические разломы [Kilias et al., 2002].



**Рис. 1.** Схема морфоструктурного районирования Эллинид. Линиями показаны линейменты. Толщина линий соответствует рангу линейментов: самые толстые – первый ранг; средней толщины – второй ранг; тонкие – третий ранг. Сплошными линиями показаны продольные линейменты, пунктирными – поперечные. Черными кружками показаны эпицентры землетрясений с  $M \geq 7.0$  после 1900 г., светлыми – эпицентры землетрясений с  $M_w \geq 7.0$  до 1900 г. Темные и светлые квадратики обозначают эпицентры землетрясений с  $6.0 \leq M_w < 6.99$  после и до 1900 г. соответственно. I–V номера мегаблоков; 1 – 150 номера пересечений линейментов.

Линейменты второго ранга ограничивают территориальные единицы второго ранга – мегаблоки. Разделение горной страны на мегаблоки обусловлено отмеченными выше особенностями рельефа Эллинид. Выделено пять мегаблоков I–V (рис. 1), которые различаются уровнем высот и простиранием составляющих их крупных элементов рельефа. Мегаблоки I (горы Пиндос) и IV (хребты Пелопоннеса) выделены в пределах Внешней зоны Эллинид. В мегаблоке I преобладают линейно вытянутые хребты север-северо-западного простирания, а в мегаблоке простирание хребтов Пелопоннеса становится близмеридиональным). Мегаблоки II, III и V, характеризующиеся пониженным рельефом, выделены в зоне Внутренних Эллинид. Мегаблок III включает обширную межгорную впадину Лариса. Мегаблок V (Пелопоннес) отделен от остальных мегаблоков поперечным линейментом 2-го ранга, который трасируется по наиболее тектонически активному юж-

ному борту Коринфского залива [Agrijo et al., 1996]. Продольные линейменты 2-го ранга 10–53 и 51–96 (рис. 1) отделяют мегаблоки Внешних Эллинид (I и IV) от мегаблоков Внутренних Эллинид (II, III и IV).

Линейменты третьего ранга являются границами блоков. Они маркируют места резких изменений высоты и простирания крупных элементов рельефа. Определена достаточно плотная сеть поперечных линейментов 3-го ранга северо-восточного и близширотного простирания, которые секут доминирующее север-северо-западное простирание горных хребтов Эллинид (рис. 1). Это согласуется с геологическими данными о широком распространении в регионе “антиэллинидских” разломных дислокаций [Goldsworthy et al., 2002].

В результате МСР выделено 150 пересечений линейментов (рис. 1). Далее 139 из них рассматриваются в качестве объектов распознавания, по-

**Таблица 1.** Параметры пересечений линеаментов и пороги дискретизации

Параметры	Пороги дискретизации	
<b>Морфометрические параметры</b>		
Максимальная высота рельефа, м ( $H_{\max}$ )	1143	1974
Минимальная высота рельефа, м ( $H_{\min}$ )	–106	
Размах высот, м ( $\Delta H$ ) ( $H_{\max} - H_{\min}$ )	1670	2183
Расстояние между точками $H_{\max}$ и $H_{\min}$ , км ( $L$ )	27	38
Градиент высот, ( $\Delta H/L$ )	51	74
<b>Геологический параметры</b>		
Доля четвертичных отложений в % в 30-км окрестности пересечения, ( $Q$ )	20	
<b>Геометрия линеаментно-блоковой структуры</b>		
Высший ранг линеамента в пересечении, (ВР)	2	
Число линеаментов, формирующих пересечение, (ЧЛ)	2	
Расстояние до ближайшего линеамента 1-го ранга, км, (P1)	22	84
Расстояние до ближайшего линеамента 2-го ранга, км, (P2)	30	
Расстояние до ближайшего пересечения, км, (Pп)	19	24
<b>Сочетание элементов рельефа в пересечении (Мор)</b>		
1 – горы и равнина (г/р)	2	4
2 – предгорья и равнина (пр/р)		
3 – горы и предгорья (г/пр)		
4 – горы и горы (г/г)		
5 – предгорья (пр)		
6 – континентальный склон (кс)		

сколькоруковые землетрясения  $M_w \geq 7.0$  приурочены к местам пересечения линеаментов (рис. 1).

## 2.2. Параметры объектов распознавания

Опыт работ по определению мест возможного возникновения сильных землетрясений в различных сейсмоактивных регионах показал, что одним из важнейших условий успешного решения этой задачи является использование адекватного набора геолого-геофизических параметров, описывающих объекты распознавания [Горшков, 2010]. Для этого обычно используются геолого-геофизические данные, которые косвенно отражают интенсивность тектонических движений и раздробленность земной коры. Они включают морфометрические показатели рельефа земной поверхности, особенности геометрии сети линеаментов, а также данные о гравитационных аномалиях. В последнее время в таких работах стали рассматриваться магнитные аномалии [Соловьев и др., 2016]. Здесь были использованы параметры (табл. 1), которые содержат информацию о контрастности и интенсивности новейших тектонических движений, представленную данными о высотах рельефа, сочетаниях типов рельефа и площади четвертичных отложений в пределах окрестностей пересечений, а также данные о гео-

метрии линеаментно-блоковой структуры, характеризующие раздробленность окрестностей пересечений на основе сведений о числе и рангах линеаментов, формирующих пересечение, о расстояниях до соседних пересечений и границ блоков.

Для определения значений параметров были использованы топографические и геологические карты, а также схема МСР. Значения параметров измерялись в круге радиусом 30 км с центром в точке пересечения линеаментов.

Используемый в работе алгоритм распознавания “Кора-3” [Бонгард, 1967; Гвишиани и др., 1988; Gorshkov et al., 2003; Горшков, 2010] применяется к объектам в виде бинарных векторов. Исходные векторы значений параметров, соответствующие объектам распознавания, были преобразованы в бинарные векторы с помощью процедур дискретизации и кодировки, которые подробно описаны в работе [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976; Гвишиани и др., 1988; Gorshkov et al., 2003; Горшков, 2010]. В результате дискретизации значения параметров преобразуются в компоненты бинарных векторов, указывающих на то, к какому сегменту дискретизации относится значение параметра.

### 3. РАСПОЗНАВАНИЕ ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ ( $M \geq 7.0$ ) ПЕРЕСЕЧЕНИЙ ЛИНЕАМЕНТОВ

Землетрясения с  $M \geq 7.0$  зарегистрированы в окрестностях сравнительно небольшой части пересечений морфоструктурных линеаментов, выделенных в регионе (рис. 1). Задача – определить критерии, по которым высокосейсмичные пересечения (класс **В**) отличаются от низкосейсмичных (класс **Н**) относительно магнитудного порога  $M_0 = 7.0$  на основе геолого-геофизической информации о них. Задача решается методами распознавания образов [Бонгард, 1967] с помощью алгоритма с обучением “Кора-3” [Гельфанд и др., 1972; Gelfand et al., 1972]. Объектами распознавания являются пересечения линеаментов, каждое из которых описано вектором геолого-геофизических параметров (табл. 1). В результате распознавания все пересечения изучаемого региона разделяются на те, в окрестности которых возможны землетрясения с  $M \geq 7.0$ , и те, в окрестности которых возможны лишь события меньших магнитуд. Это разделение производится алгоритмом на основе решающего правила, определяемого на этапе обучения.

*Материал обучения* для алгоритма “Кора-3” формируется на основе информации о сейсмичности изучаемого региона. Рассмотрены коровые землетрясения с  $M \geq 7.0$ , включая исторические. Эпицентры этих событий показаны на рис. 1 по данным каталогов [Papazachos et al., 2000; 2010] и базы данных “Active faults of the broader Aegean region in the Greek database of seismogenic sources” [<http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html>]. Использованные каталоги землетрясений содержат сведения о землетрясениях за период от 550 г. до нашей эры до настоящего времени. По макросейсмическим данным магнитуды землетрясений в каталогах определены моментные значения магнитуд  $M_w$ . На основе этих каталогов было выбрано 19 событий с  $M_w \geq 7.0$ , эпицентры и годы возникновения которых показаны на рис. 1 и рис. 2.

139 пересечений линеаментов составили множество объектов распознавания. Материал обучения класса **В** составили 19 пересечений, в 30-километровой окрестности которых расположены эпицентры землетрясений с  $M_w \geq 7.0$ . 56 пересечений вблизи эпицентров землетрясений с  $6.0 \leq M_w \leq 6.99$  относились к подмножеству **X**, объекты которого коррелируют с событиями близкими к рассматриваемому порогу магнитуд. Эти объекты не использовались алгоритмом “Кора-3” при определении решающего правила на этапе обучения, но разделялись на классы **В** и **Н** на этапе классификации. Остальные 64 пересечения составили материал обучения класса **Н**.

*Результат распознавания.* Решающее правило (табл. 2) представляет собой два набора характерных признаков: характерные признаки класса **В** (или **В**-признаки) и характерные признаки класса **Н** (или **Н**-признаки), а также порог голосования  $\Delta$ . Объект распознавания относится к классу **В**, если разность между числом **В**-признаков и числом **Н**-признаков, которыми он обладает, не превосходит  $\Delta$ . Найденные признаки при пороге голосования  $\Delta = 1$  представлены в табл. 2, а результат распознавания показан на рис. 2.

В характерные признаки вошли следующие параметры: максимальная высота рельефа в окрестности пересечения ( $H_{\max}$ ), минимальная высота рельефа в окрестности пересечения ( $H_{\min}$ ),  $\Delta H = H_{\max} - H_{\min}$ , расстояние между точками  $H_{\max} - H_{\min}$  ( $L$ ), процент площади окрестности пересечения, покрытой рыхлыми четвертичными породами ( $Q$ ), расстояние от пересечения до ближайшего линеамента 2-го ранга ( $P2$ ) и то же расстояние до 1-го ранга ( $P1$ ), а также расстояние до ближайшего пересечения ( $P_{\text{пер}}$ ). Еще одна характеристика ( $Mop$ ) отражает сочетание типов рельефа в окрестности пересечения. Устойчивость полученной классификации пересечений на классы **В** и **Н** была проверена серией контрольных экспериментов, описанных в работе [Гвишиани и др., 1988]. В ходе экспериментов не более 10% объектов основного результата, представленного на рис. 2, изменяли свою принадлежность к классам **В** или **Н**. Согласно эмпирическому правилу, обоснованному в работе [Гвишиани и др., 1988], это свидетельствует об устойчивости полученной классификации.

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Сильные землетрясения в материковой части Греции местные исследователи связывают с отдельными активными разломами [Briole et al., 2000; Ganas et al., 2004; Chousianitis et al., 2013; Jackson et al., 1982; Kokkalas et al., 2007; Pavlides et al., 2002; 2007; Tsimi et al., 2007]. На западе региона наиболее сильные землетрясения связаны с морским трансформным разломом Кефалония (линеамент первого ранга 62–104 на рис. 1). Использованный в данной работе подход показал, что сильные землетрясения региона приурочены к местам пересечения линеаментов. В этом нет глубинного противоречия, поскольку зоны линеаментов, установленные в результате МСР (рис. 1), в большинстве своем полностью или частично включают тектонические разломы, в том числе и активные, которые известны в регионе [Goldsworthy et al., 2002; <http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html>]. Однако карты активных разломов всегда неполны, поскольку такие разломы идентифицируются обычно с учетом сейсмичности и для отдельных регионов, где произошло

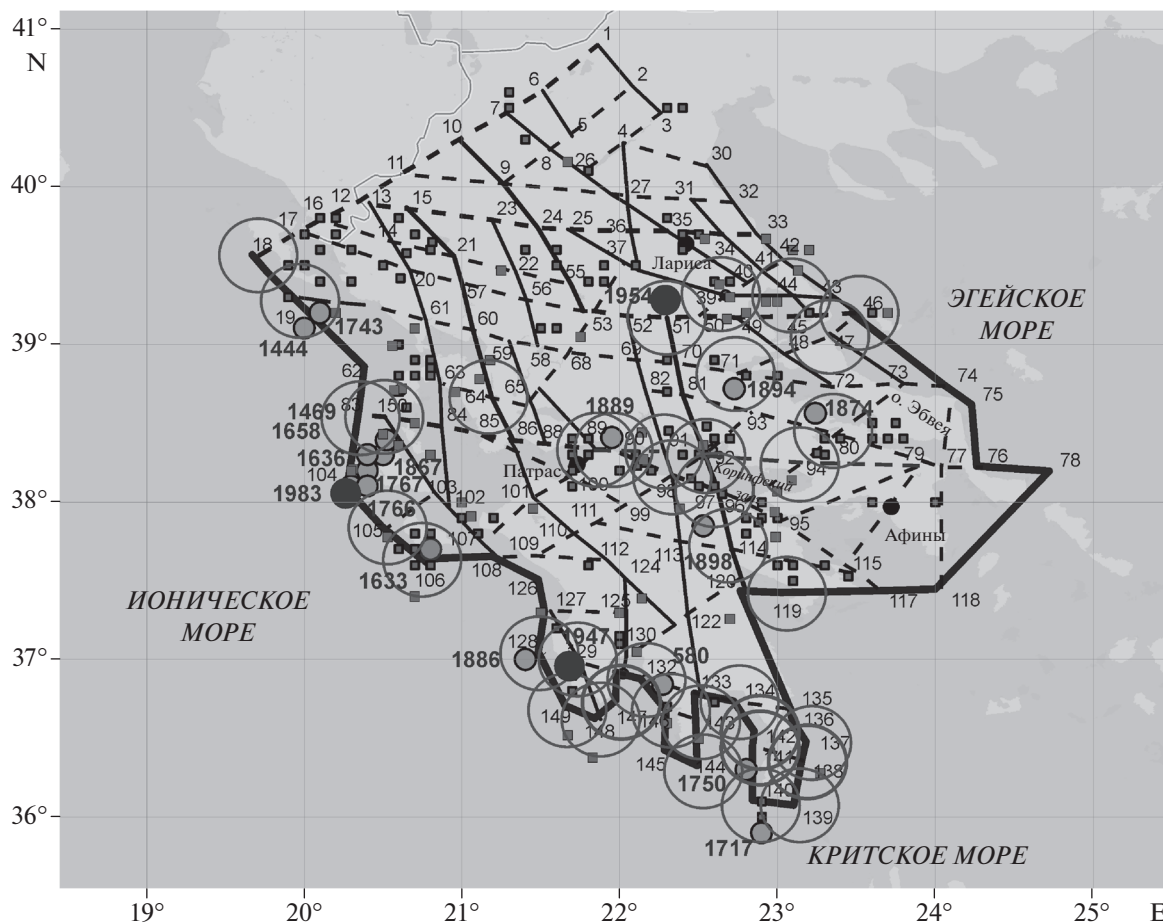


Рис. 2. Схема морфоструктурного районирования Эллинид и пересечения линейментов, отнесенные к классу В для  $M_w \geq 7.0$ : Кругами отмечены высокосейсмические пересечения для  $M_w \geq 7.0$ . Остальные обозначения те же, что и на рис. 1.

землетрясение с выходом разлома на земную поверхность. Период надежной регистрации сейсмичности ограничен десятками лет. Для Греции по данным [Pavlidis et al., 2010] надежная регистрация начинается с 1970-ых. При проведении МСР исследуемый регион изучается по единым правилам по всей площади и без учета сейсмичности. Поэтому схемы МСР более полно отражают потенциальные сейсмогенерирующие структуры данного региона.

Как видно из рис. 2, все пересечения, с которыми коррелируют землетрясения  $M \geq 7.0$ , отнесены алгоритмом распознавания к высокосейсмичному классу. Кроме того, к классу В отнесено 11 пересечений из обучения низкосейсмичного класса Н и 13 пересечений из материала экзамена Х, содержавшего пересечения, вблизи которых расположены эпицентры с  $6.0 \leq M \leq 6.99$ .

Распознанные В-пересечения оконтуривают несколько высокосейсмичных зон, в большинстве из которых землетрясения с  $M \geq 7.0$  уже происходили. В частности, это относится к группам В-пересечений, распознанных на континенталь-

ном склоне Ионического моря и южного берега полуострова Пелопоннес. Но выявлены также зоны, сформированные В-пересечениями в областях, где до сих пор землетрясения с  $M \geq 7.0$  не отмечались. Такие В-пересечения распознаны на линейментах, ограничивающих рифтовую зону Коринфского залива. Это указывает на высокий сейсмический потенциал этого района, повышенный уровень тектонической активности которого отмечается многими исследователями [Briole et al., 2000; Kokkalas et al., 2007; Tsimi et al., 2007]. Другая группа В-пересечений (№№ 44, 46 и 47) выявлена в районе острова Эвбея, где западное продолжение Северо-Анатолийского разлома подступает к греческому побережью.

Поскольку значительная часть линейментов согласуется с активными разломами, наличие на таких линейментах распознанных В-пересечений позволяет судить о потенциале соответствующего активного разлома. В частности, распознанные В-пересечения №№ 90 и 97 (рис. 2) расположены на линейменте, соответствующему разлому Псатопиргес, сейсмический потенциал которого ак-

Таблица 2. Характерные признаки В- и Н-пересечений (решающее правило)

№	$H_{\max}$ , м	$H_{\min}$ , м	$L$ , км	$\Delta H$ , м	$\Delta H/L$	$Q$ , %	Мор	$P1$ , км	$P2$ , км	$P_{\text{пер}}$ , км
<b>В-признаки</b>										
1				> 2183						≤19
2	>1143				>51					>24
3	>1143			> 2183						>19
4			>38				Не г/р или рп/р Не пр или кс	>84		≤19
5	≤1974									
6			>27		≤74	>20				
7		≤-106		>1670		≤20				
8	>1143			> 2183	≤74					
<b>Н-признаки</b>										
1		>-106							≤30	>19
2	>1143	>-106							≤30	
3	>1143	>-106						>84		
4		>-106	>27							
5		>-106					г/р или пр/ /р			
6		>-106		>1670						
7		>-106								
8	>1974	>-106				≤20				

тивно дебатировалось [Sokos et al., 2012]. Наши результаты указывают на высокий потенциал этого разлома, подтверждая аналогичные выводы, сделанные для него в работе [Vassilakis et al., 2011].

Большинство распознанных В-пересечений по своему местоположению согласуются с сейсмогенными зонами греческой базы данных “Active faults of the broader Aegean region in the Greek database of seismogenic sources” [Pavlidis et al., 2007; <http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html>]. В этой базе сейсмогенные зоны не градуированы по сейсмическому потенциалу, сообщается только, что он достаточно высокий [Pavlidis et al., 2007]. Результаты распознавания предоставляют информацию для оценки сейсмического потенциала этих зон относительно  $M \geq 7.0$ . Там, где в эти зоны попадают В-пересечения, землетрясения могут достигать и превышать магнитуду 7. Соответственно, сейсмогенные зоны, в которых есть пересечения линеаментов, но они не были распознаны как высокосейсмичные для  $M \geq 7.0$ , могут быть отнесены к областям более низкого потенциала. Это относится к нескольким сейсмогенным зонам, которые на рис. 2 маркируются пересечениями:

- 3, 4 и 26,
- 73 и 74,
- 76,
- 101 и 107.

Таким образом, результаты работы предоставляют информацию для разделения сейсмогенных зон греческой базы данных по степени их сейсмического потенциала.

Характерные признаки (табл. 2) показывают, что для В-пересечений характерны не “малые” значения максимальной высоты ( $H_{\max} > 1143$  м), “малые” значения минимальной высоты ( $H_{\min} \leq -106$  м), а также “большие” значения размаха высот ( $\Delta H > 2183$  м) и не “большие” значения градиента высот ( $\Delta H/L \leq 74$ ) в сочетании с “большими” значениями площади четвертичных отложений ( $Q > 20$ ). “Большой” размах высот свидетельствует о контрастности рельефа в окрестностях В-пересечений. Отобранные алгоритмом интервалы перечисленных параметров свидетельствуют о пониженном положении окрестностей В-пересечений в обстановке контрастного рельефа и устойчивого опускания, о чем свидетельствуют “большие” значения  $Q$ . Эти интервалы параметров могут объясняться условиями растяжения, которые доминируют как в Эгейском бассейне, так на материковой части Греции [Armijo et al., 1996].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при частичной поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ), проект № 18-55-45004.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Раницман Е.Я.* Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис–Борока В.И. // Вычисл. сейсмология. Вып. 10. 1977. С. 33–49.
- Бонгард М.М.* Проблема узнавания. М.: Наука. 1967. 320 с.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А.* О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линейментов на территории Южной Америки. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис–Борока В.И. и Левшина А.Л. // Вычисл. сейсмология. Вып. 13. 1981. С. 46–50.
- Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А.* Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука. 1988. 176 с.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я.* О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы. Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис–Борока В.И. // Вычисл. сейсмология. Вып. 7. 1974. С. 3–40.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Кнопов Л., Пресс Ф.С., 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. Кейлис–Борока В.И. // Вычисл. сейсмология. Вып. 9. 1976. С. 3–91.
- Горшков А.И., Кособоков В.Г., Раницман Е.Я., Соловьев А.А.* Проверка результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений с 1972 по 2000 г. Проблемы динамики литосферы и сейсмичности / Под ред. Кейлис–Борока В.И. // Вычисл. сейсмология. Вып. 32. 2001. С. 48–57.
- Горшков А.И.* Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе // Вычисл. сейсмология. Вып. 40. 2010. 472 с.
- Раницман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука. 1979. 170 с.
- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В.* Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Физика Земли. 2014. № 2. С. 3–20.
- Соловьев А.А., Горшков А.И., Соловьев А.А.* Применение данных по литосферным магнитным аномалиям в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 21–27.
- Active faults of the broader Aegean region in the Greek database of seismogenic sources. <http://eqgeogr.weebly.com/database-of-active-faults.html>
- Armijo R., Meyer B., King G.C.P., Rigo A., Papanastassiou D.* Quaternary evolution of the Corinth Rift and its implications for the Late Cenozoic evolution of the Aegean // Geophys. J. Int. 1996. V. 126. № 1. P. 11–53.
- Bernard P., Lyon-Caen H., Briole P., Deschamps A. et al.* Seismicity, deformation and seismic hazard in the western rift of Corinth: New insights from the Corinth Rift Laboratory (CRL) // Tectonophysics. 2006. V. 426. P. 7–30.
- Boccaletti M., Caputo R., Mountrakis D., Pavlides S., Zouros N.* Paleoseismicity of the Souli Fault, Western Greece // J. Geodyn. 1997. V. 24. P. 117–127.
- Briole P., Rigo A., Lyon-Caen H., Ruegg J.C., Papazissi K., Mitsakaki C., Balodimou A., Veis G., Hatzfeld D., Deschamps A.* Active deformation of the Corinth rift, Greece: results from repeated Global Positioning System surveys between 1990 and 1995 // J. Geophysical Research. 2000. V. 105. № 11. P. 25 606–25 625. <https://doi.org/10.1029/2000JB900148>
- Caputo R., Chatzipetros A., Pavlides S., Sboras S.* The Greek Database of Seismogenic Sources (GreDaSS): state-of-the-art for northern Greece // Annals of Geophysics. 2012. V. 55. № 5. <https://doi.org/10.4401/ag-5168>
- Chousianitis K., Ganas A., Gianniou M.* Kinematic interpretation of present-day crustal deformation in central Greece from continuous GPS measurements // J. Geodynamics. 2013. V. 71. P. 1–13.
- EAK, 2003. Greek Seismic Zonation. Official Governmental Gazette 1154, Athens, August 2003 (in Greek).
- Ganas A., Pavlides S.B., Sboras S., Valkaniotis S., Papaioannou S., Alexandris G.A., Plessa A., Papadopoulos G.A.* Active fault geometry and kinematics in Parnitha Mountain, Attica, Greece // J. Structural Geology. 2004. V. 26. № 11. P. 2103–2118.
- Gelfand I.M., Guberman Sh., Izvekova M.L., Keilis-Borok V.I., Ranzman E.Ia.* Criteria of high seismicity determined by pattern recognition // Tectonophysics. 1972. V. 13. № 1–4. P. 415–422.
- Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman I.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M.* Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // Phys. Earth Planet. Inter. 1976. V. 11. P. 227–283.
- Goldsworthy M., Jackson J., Haines J.* The continuity of active fault systems in Greece // Geophys. J. Int. 2002. V. 148. P. 596–618.
- Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A.* Recognition of Earthquake-Prone Areas. Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction / Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (eds). Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2003. P. 239–310.
- Gorshkov A., Novikova O.* Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the ArcMap // Acta Geophysica. 2018. V. 66. № 5. P. 843–853.
- Kiliass A.A., Tranos M.D., Orozco M., Alonso-Chaves F.M., Soto J.I.* Extensional collapse of the Hellenides: A Review // Rev. Soc. Geol. Espana. 2002. V. 15. № 3–4. P. 129–139.
- Kokkalas S., Pavlides S., Koukouvelas I., Ganas A., Stamatoopoulos L.* Paleo-seismicity of the Kaparelli fault (eastern Corinth Gulf): evidence for earthquake recurrence and fault behaviour // Bollettino della Società Geologica Italiana. 2007. V. 126. № 2. P. 387–395.
- McKenzie D.P.* Plate Tectonics of the Mediterranean Region // Nature. 1970. V. 226. P. 239–243.



- Makropoulos K.C., Burton P.W.* A catalogue of seismicity in Greece and adjacent areas // *Geophysical J. Royal Astronomical Society*. 1981. V. 65. P. 741–762.
- Papazachos B.C., Comninakis P.E., Karakaisis G.F., Karakostas B.G., Papaioannou Ch.A., Papazachos C.B., Scordilis E.M.* 2000. A catalogue of earthquakes in Greece and surrounding area for the period 550BC–1999 <http://geohazards.cr.usgs.gov/iaspei/europe/greece/the/catalog.htm>
- Papazachos B.C., Comninakis P.E., Scordilis E.M., Karakaisis G.F., Papazachos C.B.* A catalogue of earthquakes in the Mediterranean and surrounding area for the period 1901–2010. Publications of the Geophysics Laboratory, University of Thessaloniki. 2010.
- Pavlidis S.B., Papadopoulos G., Ganas A.* The fault that caused the Athens September 1999  $M_s = 5.9$  earthquake: field observations // *Nat. Hazards*. 2002. V. 27. № 1–2. P. 61–85.
- Pavlidis S.B., Valkaniotis S., Chatzipetros A.* Seismically capable faults in Greece and their use in seismic hazard assessment. Proceedings of 4th Int. Conf. Earthq. Geotech. Eng. June 25–28. 2007. Thessaloniki. Paper n. 1609.
- Pavlidis S., Caputo R., Sboras S., Chatzipetros A., Papathanasiou G., Valkaniotis S.* The Greek catalogue of active faults and database of seismogenic sources // *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2010. V. XLIII. № 1. P. 486–494.
- Sokos E., Zahradník J., Kiratzi A., Janský J., Gallovič F., Novotný O., Kostecký J., Serpetsidaki A., Tselentis G.A.* The January 2010 Efpalio earthquake sequence in the western Corinth Gulf (Greece) // *Tectonophysics*. 2012. V. 530–531. P. 299–309. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2012.01.005>
- Tsimi Ch., Ganas A.I., Soulakellis N., Kairis O., Valmis S.* Morphotectonics of the Psathopyrgos active fault, western Corinth rift, Central Greece // *Bulletin of the Geological Society of Greece*. 2007. V. XXXX, Proceedings of the 11th International Congress, Athens, May, 2007.
- Vassilakis E., Royden L., Papanikolaou D.* Kinematic links between subduction along the Hellenic trench and extension in the Gulf of Corinth, Greece: a multidisciplinary analysis // *Earth and Planetary Science Letters*. 2011. V. 303. № 1–2. P. 108–120. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.12.054>

## POTENTIAL PLACES OF STRONG ( $M \geq 7.0$ ) EARTHQUAKES IN HELLENIDES (GREECE)

A. I. Gorshkov<sup>a,\*</sup>, O. V. Novikova<sup>a</sup>, and I. Gaudemer<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Federal State Budgetary Institution of Science Institute of the Theory of Earthquake Prediction and Mathematical Geophysics of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Physics of the Earth of Paris, Paris, France*

\*E-mail: [gorshkov@mitp.ru](mailto:gorshkov@mitp.ru)

For the territory of the Hellenides, located in the southern part of the Balkan Peninsula, the geological and geomorphological criteria for places where earthquakes with  $M_w \geq 7.0$  may occur are determined. Intersections of morphostructural lineaments, which were determined by the morphostructural zoning method, are considered as seismogenic structures. Geological and geomorphological parameters were uniformly determined for all intersections of lineaments. On their basis, using the Kora-3 pattern recognition algorithm, a decisive rule was found that made it possible to divide all lineament intersections by high (H) – and low-seismic (L) relative to threshold magnitude  $M_0 = 7.0$ . The intersections associated with the observed earthquakes  $M_w \geq 7.0$ , used to learn the algorithm. As a result, all these intersections were attributed to the highly seismic ones, as well as 24 more intersections in which the events of  $M_w \geq 7.0$  not previously observed. In particular, such intersections are recognized on Evia Island, where the western branch of the North-Anatolian fault approaches the shores of central Greece. Another group of H-intersections is located in the central part of the Corinthian Gulf - the most tectonically active area of the region, in which, however, no  $M_w \geq 7.0$  earthquake has been recorded. Characteristic features of H- and L-intersections (seismicity criteria) are formed by morphometric parameters. The intervals of the values of these parameters, characteristic of H-intersections, indirectly indicate the processes of subsiding and extension, which dominate in the areas of the location of such intersections.

*Keywords:* Hellenides, morphostructural zoning, pattern recognition.