

## ПРОБЛЕМА РАСПОЗНАВАНИЯ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ: АКТУАЛЬНЫЙ ОБЗОР

© 2020 г. А. Д. Гвишиани<sup>1,3</sup>, А. А. Соловьев<sup>2</sup>, Б. А. Дзедобов<sup>1,4</sup>, \*

<sup>1</sup>Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

<sup>2</sup>Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

<sup>3</sup>Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

<sup>4</sup>Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ, Россия

\*E-mail: b.dzeboev@gcras.ru

Поступила в редакцию 25.04.2019 г.

После доработки 17.06.2019 г.

Принята к публикации 24.06.2019 г.

Статья посвящена анализу почти полувековой истории развития применения алгоритмов распознавания образов с целью решения проблемы определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Этот подход получил название ERA (Earthquake-Prone Areas). Рассмотрены применяемые алгоритмы распознавания образов, исследуемые регионы и методы оценки достоверности получаемых результатов, включая теорию динамических и предельных задач распознавания. Представлен также разработанный в последнее время альтернативный метод решения проблемы путем выделения сгущений эпицентров землетрясений. Этот метод основан на принципах Дискретного Математического Анализа (ДМА) и реализован в виде алгоритмической системы FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Сравнение результатов, полученных с помощью подхода ERA и системы FCAZ, демонстрирует хорошее согласие, что является дополнительным аргументом в пользу их достоверности. Намечены перспективы дальнейшего развития и совместного применения подхода ERA и системы FCAZ и создания на этой основе единого метода системного анализа с включением искусственного интеллекта. В случае успеха этот метод должен найти применение при оценке сейсмической опасности и планировании сейсмостойкого строительства.

*Ключевые слова:* места сильных землетрясений, распознавание образов, система FCAZ, системный анализ, искусственный интеллект, оценка сейсмической опасности.

DOI: 10.31857/S0002333720010044

### МЕТОД ERA

Сильные землетрясения, как правило, могут происходить не на всей территории сейсмоактивного региона. При оценке сейсмической опасности одной из важнейших задач является определение мест, в которых возможно возникновение сильного землетрясения. Эффективным инструментом решения этой задачи является распознавание образов.

Принципиальная возможность использования методов и алгоритмов распознавания образов для определения потенциально высокосейсмичных мест впервые была обоснована выдающимся математиком И.М. Гельфандом с соавторами в 1972 г. [Гельфанд и др., 1972; Gelfand et al., 1972]. Разработанный ими подход в последующем получил название ERA (Earthquake-Prone Areas) [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014]. Отметим, что при этом, как правило, рассматриваются ко-

ровые землетрясения, но имеются примеры успешного применения метода ERA и в случае достаточно глубоких землетрясений.

За прошедшие с момента его создания почти 50 лет метод ERA был применен для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в ряде горных стран мира. Апостериорные оценки достоверности результатов распознавания, полученные на базе анализа расположения эпицентров сильных землетрясений, которые произошли в рассмотренных регионах после получения для них этих результатов, стали подтверждением эффективности использования распознавания образов для выделения потенциально высокосейсмичных территорий.

Метод ERA получил развитие в фундаментальных работах академиков АН СССР И.М. Гельфанда и В.И. Кейлис-Борока [Кейлис-Борок, 1968; Гельфанд и др., 1972; 1973в; Алексеевская и др.,

1977; Гвишиани и др., 1980б; Gelfand et al., 1972; Alekseevskaya et al., 1977; и др.), академик РАН А.Д. Гвишиани [Гвишиани и др., 1982; 1984б; 1987б; 1988а; Гвишиани, Кособоков, 1981; Соловьев и др., 2014; Gvishiani, 1982; и др.], член-корр. РАН А.А. Соловьева [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014; 2016; Горшков и др., 2017; Кособоков, Соловьев, 2018; Gorshkov et al., 2003а; и др.], известных советских и российских ученых Ш.А. Губермана, М.П. Жидкова, В.Г. Кособокова, А.И. Горшкова, В.А. Гурвича, Е.Я. Ранцман, И.М. Ротвайн [Гельфанд и др., 1973б; Ранцман, 1979; Гвишиани и др., 1980б; 1988а; Кособоков, 1982; Кособоков, Соловьев, 1982; Гвишиани, Кособоков, 1983; Гвишиани, Гурвич, 1992; Соловьев и др., 2016; Кособоков, Соловьев, 2018; Gorshkov et al., 2003а; Gorshkov, Novikova, 2018; и др.] и др. Активное участие в развитии ЕРА приняли крупные иностранные геофизики, сейсмологи, геологи и математики: члены национальной академии наук США Ф. Пресс и Л. Кнопофф [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976; и др.], французские ученые А. Систернас, Ж. Боннин, Э. Филип, К. Вебер и Ж. Саллантен [Вебер и др., 1981; 1985; 1986б; Гвишиани и др., 1984а; 1987а; 1988а; и др.], члены национальной академии наук Италии М. Капуто и Дж. Панца [Горшков и др., 1979; Caputo et al., 1980; Gorshkov et al., 2000; 2003б; и др.] и другие. Метод ЕРА создавался и совершенствовался в Институте физики земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, Объединенном институте физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Международном институте теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (в настоящее время – Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН) и Геофизическом центре РАН.

В классической постановке Гельфанда–Кейлиса–Борока задача ЕРА формулируется следующим образом. Определить в рассматриваемом сейсмоактивном регионе места возможного возникновения сильных (с магнитудой  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – заданный порог) землетрясений. Причем поиск таких мест осуществляется среди выделенных в регионе объектов распознавания, в качестве которых рассматриваются морфоструктурные узлы или пересечения морфоструктурных линеаментов, полученные в результате морфоструктурного районирования региона. Множество объектов распознавания  $W$  необходимо разделить на два непересекающихся класса: класс  $B$ , состоящий из объектов, в окрестностях которых возможны сильные землетрясения, и класс  $H$ , состоящий из объектов, где такие землетрясения не могут происходить. Для выполнения этой классификации применяется алгоритм распознавания образов с обучением, использующий определенную на основе информации о сейсмичности региона обучающую выборку  $W_0$ , состоящую из двух

непересекающихся подмножеств:  $B_0$ , содержащего объекты, априорно отнесенные к классу  $B$ , и  $H_0$ , содержащего представителей класса  $H$ . Результатом применения алгоритма распознавания является решающее правило, на основании которого объект из  $W$  может быть отнесен к классу  $B$  или  $H$ , и сама классификация объектов.

### Морфоструктурное районирование

В качестве объектов распознавания [Гельфанд и др., 1972; 1973а] было предложено использовать морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов. Последние выделяются в рамках морфоструктурного районирования (МСР) территории. Авторство этого метода принадлежит видному геоморфологу Елизавете Яковлевне Ранцман [Ранцман, 1979; Ранцман, Гласко, 2004]. В сотрудничестве с математиками удалось превратить МСР в метод системного анализа, формализовав его приложение к конкретному региону и обеспечив воспроизводимость результатов [Алексеевская и др., 1977; Габриэлов и др., 1977; 1982; Alekseevskaya et al., 1977].

Суть МСР состоит в разделении рассматриваемой территории на систему иерархически упорядоченных районов, обладающих определенной степенью однородности морфоструктур. МСР, как и любое районирование, подразумевает объединение объектов, обладающих схожими признаками и их численными показателями, и их отделение от объектов, характеризующихся иными признаками или их показателями [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977]. Под понятием “морфоструктура”, введенным в геоморфологию академиком АН СССР И.П. Герасимовым [Герасимов, 1946; Ранцман, 1979], понимается совокупность проявлений в рельефе тектонических движений земной коры (в том числе хребты, котловины и др.) [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977].

В ходе проведения МСР выделяются морфоструктуры трех рангов [Гвишиани и др., 1988а; Ранцман, 1979; Ранцман, Гласко, 2004]:

- горная страна (I-ый ранг) – территория с единым типом процесса горообразования и определенным обликом рельефа; соседние территории обладают или другим типом горообразования, или другим обликом рельефа (при том же типе горообразования);
- горные страны подразделяются на мегаблоки (II-ой ранг) – области, в пределах которых все численные показатели изменяются закономерно, а при переходе через границу закономерность нарушается;
- мегаблоки подразделяются на блоки (III-ий ранг) – области, в пределах которых все численные показатели изменяются без резких

скачков, а при переходе за границы области происходит резкое значительное изменение хотя бы одного из численных показателей.

Морфоструктурными линеаментами объявляются линейные зоны, разграничивающие горные страны, мегаблоки и блоки. Линеаментам присваивается ранг, равный наивысшему рангу разделяемых им морфоструктур [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977]:

- линеаменты I-ого ранга – границы горных стран;
- линеаменты II-ого ранга – границы мегаблоков;
- линеаменты III-ого ранга – границы блоков.

Линеаменты подразделяются на продольные, поперечные и главные сдвиги [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977]:

- продольный линеамент – параллелен основному простиранию крупных элементов рельефа, в его зоне выражены вертикальные движения, все продольные линеаменты следуют вдоль границ крупных элементов рельефа;
- поперечный линеамент – ориентирован косо или вкрест основному простиранию крупных элементов рельефа, характер тектонических движений в его зоне трудно устанавливаем, все поперечные линеаменты выражены прерывистыми формами;
- главный сдвиг – ориентирован косо относительно крупных элементов рельефа, но представляет собой зоны крупных разломов, в которых происходят крупномасштабные горизонтальные перемещения (выделяется только в случае, когда горизонтальные тектонические движения создают самостоятельные крупные элементы рельефа).

Морфоструктурным узлом называется область, возникшая вследствие пересечения или причленения двух или более линеаментов (как правило, продольных и поперечных). В узлах формируется мелкоблоковая структура, отраженная на дневной поверхности мозаичным сочетанием различных ландшафтов, почвенного покрова, горных пород и др. [Ранцман, Гласко, 2004]. Установление точных границ узлов является трудоемкой процедурой, реализуемой исключительно с использованием данных, являющихся результатом специальных полевых исследований.

В случае отсутствия таких данных в качестве узлов берутся некоторые окрестности пересечений линеаментов. Как правило, в качестве таких окрестностей рассматриваются круги с центрами в точке пересечения осей морфоструктурных линеаментов [Алексеевская и др., 1977; Alekseevskaya et al., 1977]. При решении задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясений выбор радиуса таких кругов (окрестностей пере-

сечений линеаментов) зависит от пороговой магнитуды  $M_0$  сильных землетрясений.

Развитие метода морфоструктурного районирования проходило в несколько этапов. Первоначально (70-е годы) работы по МСР проводились исключительно в интересах метода ЕРА. Аргументом в пользу использования данных о рельефе при распознавании мест возможного возникновения сильных землетрясений является предположение о непосредственной связи расположения крупных элементов рельефа с горообразовательными тектоническими движениями, захватывающими глубины, на которых формируются очаги коровых землетрясений [Гвишиани и др., 1988а].

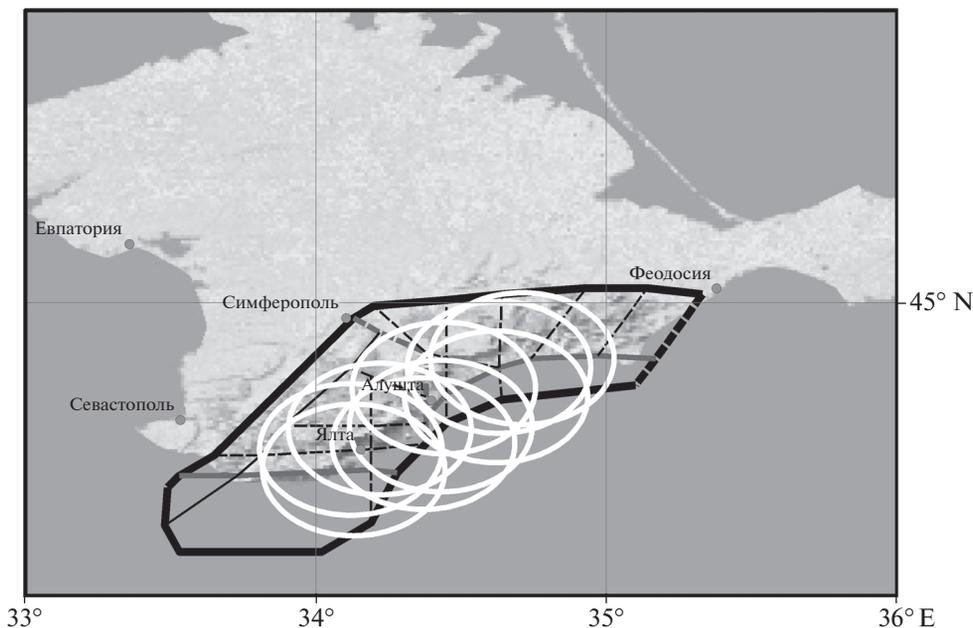
На втором этапе (80-е годы) схемы МСР также использовались для распознавания мест крупных залегающих углеводородов. На третьем этапе (90-е годы) было установлено, что районы пересечений линеаментов характеризуются повышенным числом аварийных событий [Ранцман, Гласко, 2004].

Для построения схем МСР используются данные о рельефе, геологии, структуре и глубинном строении изучаемого региона, а также результаты дешифрирования космоснимков Земли. Принципы и методика морфоструктурного районирования подробно изложены в работах [Герасимов, Ранцман, 1973; Алексеевская и др., 1977; Габриэлов и др., 1977; Ранцман, 1979; Гвишиани и др., 1988а; Ранцман, Гласко, 2004; Alekseevskaya et al., 1977].

На рис. 1 показана схема МСР полуострова Крым [Соловьев и др., 2017]. Многочисленные другие примеры МСР сейсмоопасных регионов будут показаны в следующем разделе статьи.

### **Приуроченность эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов**

Подход ЕРА базируется на гипотезе о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов [Гельфанд и др., 1973а; Кособоков, Соловьев, 2018]. При этом под приуроченностью здесь понимаются достаточно малые расстояния между пересечениями и эпицентрами. Такая приуроченность выглядит вполне очевидной, когда эпицентры всех сильных землетрясений в регионе расположены внутри кругов некоторого радиуса с центрами в точках пересечений линеаментов, а площадь, покрытая этими кругами, является достаточно малой по сравнению с площадью всего изучаемого региона [Гвишиани и др., 1988а]. Так, например, приуроченность визуально очевидна в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье [Горшков и др., 2018; Дзобоев и др., 2019]. В то же время морфоструктурная сеть может быть настолько густой (например, Кавказ [Соловьев и др., 2016]), что объединение кругов, содержащих эпицентры



**Рис. 1.** Схема морфоструктурного районирования полуострова Крым (толстые черные линии – линеаменты I-го ранга; средние серые – II-го ранга, тонкие черные – III-го ранга; сплошными линиями показаны продольные линеаменты, пунктирными – поперечные) и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  (белые круги).

сильных землетрясений, покрывает почти весь регион. Для проверки статистической значимости гипотезы о приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям был разработан специальный алгоритм [Гвишиани, Соловьев, 1980], впервые примененный для сравнительного анализа положений эпицентров сильных землетрясений и пересечений линеаментов на территории Южной Америки.

### Векторные объекты распознавания в пространстве геолого-геофизических данных

Алгоритм распознавания образов, используемый в подходе ЕРА [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010; Gorshkov et al., 2003а], представляет собой дихотомию с обучением [Бонгард, 1967]. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений выполняется на базе векторного представления объектов распознавания в пространстве геолого-геофизических и геоморфологических характеристик.

Выделенные в рамках МСР объекты распознавания описываются единым набором характеристик. Эти характеристики должны быть априорно связаны с принципиальной возможностью отражать специфику мест высокой сейсмичности. Для каждого региона подбираются и измеряются соответствующие наборы характеристик, которые также будем называть параметрами [Гвишиани и др., 2013а; Gvishiani et al., 2013]. Как правило, используемые характеристики отражают степень

тектонической активности в окрестностях объектов распознавания. За годы развития ЕРА сформировался достаточно устойчивый список характеристик, используемых для распознавания в различных сейсмоактивных регионах [Дзедоев и др., 2019]. Все характеристики можно условно разбить на три группы [Гвишиани и др., 1988а]:

- характеристики, описывающие контрастность и интенсивность тектонических движений, – параметры, связанные с высотами рельефа, сочетаниями типов рельефа, площадью рыхлых толщ;
- характеристики, описывающие степень тектонической раздробленности, – параметры, описывающие линеаментную структуру в окрестности объектов;
- характеристики, описывающие глубинную неоднородность, – гравитационные и геомагнитные параметры. Отметим, что идея использовать геомагнитные параметры в подходе ЕРА принадлежит А.Д. Гвишиани, а эффективность использования литосферных магнитных аномалий впервые была показана в работе [Соловьев и др., 2016].

В окрестностях объектов распознавания измеряются значения используемых характеристик. Необходимо отметить, что в случае морфоструктурных узлов под окрестностью понимается область, ограниченная его границами, а в случае пересечений осей морфоструктурных линеаментов – область, ограниченная кругом заданного радиуса с центром в точке пересечения линеаментов. Очевидно, что узлы могут иметь различные размеры

окрестностей и площадь окрестности может использоваться в качестве одной из характеристик. После вычисления значений характеристик каждому объекту распознавания ставится в соответствие вектор с действительными компонентами, элементами которого являются значения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик, описывающих объект.

Алгоритмы дихотомии, реализующие блок распознавания в методе ЕРА, оперируют объектами, представленными векторами с двоичными компонентами. Преобразование исходных векторов, описывающих объекты, в бинарные векторы выполняется с помощью процедур дискретизации и кодировки [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010; Gorshkov et al., 2003а].

Основополагающей частью распознавания в классическом методе ЕРА является формирование и выполнение обучения. Обучаясь на векторах сформированного материала обучения, алгоритм дихотомии находит их характерные признаки (*B*- и *H*-признаки). Затем все множество объектов *W* экзаменуется на основе этих признаков. Задается значение порога голосования  $\Delta$ , и объекты, у которых разность между числом *B*-признаков и числом *H*-признаков, которыми они обладают, не меньше, чем порог  $\Delta$ , относятся к классу *B* [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010; Gorshkov et al., 2003а].

Подчеркнем, что в подходе ЕРА ставится не только задача распознать дизъюнктивные морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линеаментов, в окрестностях которых возможно возникновение сильных землетрясений, но и задача получения геолого-геоморфологического описания таких мест, т.е. выявление критериев высокой сейсмичности для рассматриваемого региона. Как это делается – описано ниже.

### Семейство алгоритмов “Голосование по Набору Признаков”

В начале 1980-х возможности блока распознавания метода ЕРА были существенно расширены благодаря исследованиям А.Д. Гвишиани, В.А. Гурвича, в которых было введено понятие алгоритма ГНП (Голосование по Набору Признаков) [Гвишиани, Гурвич, 1983а; 1983б; 1992; и др.], определенного как строгая математическая конструкция. Класс алгоритмов ГНП включает в себя достаточно широкое семейство алгоритмов классификации с обучением. Для алгоритмов класса ГНП является возможным вывести условия, позволяющие аналитически контролировать достоверность результата в предельной задаче распознавания.

При этом для некоторого подкласса (ГНП с нормальными весами) выполнение этих условий допускает конструктивную проверку. Таким образом, алгоритмы класса ГНП естественно ис-

пользовать как блок распознавания образов при решении предельных задач распознавания. В частности, для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений [Гвишиани, Гурвич, 1992], т.к. последняя является именно такой предельной задачей [Гвишиани, Гурвич, 1983а].

Для определения класса алгоритмов ГНП введем следующие обозначения:

- $w \in W$  – множество объектов распознавания;
- $B_0$  и  $H_0$  – материалы обучения классов *B* и *H* соответственно;
- $\Omega_n$  – множество бинарных векторов длины *n*;
- $\Phi : W \rightarrow \Omega_n$  – заданное отображение (кодировка объектов).

Пусть некоторый признак *r*, характерный для класса *B*, есть подмножество в  $\Omega_n$ . Рассмотрим набор признаков  $U = \{r_1, \dots, r_N\}$  и будем считать, что объект *w* обладает признаком *r*, если  $\Phi(w) \in r$ .

Пусть  $\Phi^{-1}(r) \subseteq W$  – множество объектов, обладающих признаком *r*, а  $\sigma = (\sigma_1, \dots, \sigma_N) = (\sigma(r_1, W_0), \dots, \sigma(r_N, W_0))$  – числовой вектор весов признаков зависящих от материала обучения  $W_0 = B_0 \sqcup H_0$ .

Алгоритмы класса ГНП решают вопрос отнесения объекта  $w \in W$  к классу *B* или *H* путем голосования по набору признаков *U*. Результат голосования  $F(w)$  определяется как сумма весов всех признаков, которыми обладает объект *w* и зависит от  $\Phi(w)$ :  $F(w) = \sum_{r \in U: \Phi(w) \in r} \sigma(r, W_0)$ .

Пусть  $\Delta$  некоторый порог голосования. Объект *w* относится к классу *B*, если  $F(w) \geq \Delta$  и к классу *H*, если  $F(w) < \Delta$ . Тем самым, для задания конкретного алгоритма класса ГНП необходимо задать набор признаков *U* и вектор весов  $\sigma = \sigma(W_0)$ . В таком случае  $\Delta$  будет единственным свободным параметром алгоритма [Гвишиани, Гурвич, 1992].

### Алгоритмы распознавания образов, используемые в подходе ЕРА

Как правило, в классическом подходе ЕРА для распознавания мест возможного возникновения землетрясений используются алгоритмы “Кора-3” [Вайнцвайг, 1973; Гвишиани и др., 1988а; Gorshkov et al., 2003а], “Подклассы” [Гельфанд и др., 1976; Кособоков, Ротвайн, 1977; Gelfand et al., 1976; и др.] и “Правило Хемминга” [Гвишиани, Кособоков, 1981; Кособоков, 1982; Гвишиани, Гурвич, 1992; и др.]. Как показано в работе [Гвишиани, Гурвич, 1992], все эти алгоритмы входят в класс алгоритмов ГНП, описанных в предыдущем пункте.

Наиболее простым из перечисленных трех алгоритмов является “Правило Хемминга”. Его применение состоит из двух этапов. На первом этапе строится ядро класса  $B$ . Оно представляет собой двоичный вектор, компоненты которого более “типичны” соответствующим компонентам двоичных векторов из обучающей выборки  $B_0$ , чем из обучающей выборки  $H_0$ . На этом завершается обучение алгоритма. На втором этапе вычисляется расстояние Хемминга  $\rho$  от каждого двоичного вектора, соответствующего объекту распознавания, до ядра класса  $B$ . В итоге к классу  $B$  относят объекты, для которых  $\rho \leq \Delta$  ( $\Delta$  – заданный порог). Все остальные объекты относят к классу  $H$  [Гвишиани и др., 1980а; 1988а; Кособоков, 1982]. По сути, порог  $\Delta$  является единственным свободным параметром алгоритма.

Наиболее часто используемым в ЕРА алгоритмом по-прежнему является алгоритм “Кора-3” [Бонгард, 1967], созданный М.М. Бонгардом и соавторами для решения задач медицинской диагностики еще в 60-х гг. прошлого века. Этот алгоритм нашел применение также и в других прикладных задачах (классификация водоносных и нефтеносных пластов, поиск нефтяных и урановых месторождений) [Бонгард и др., 1966; Бонгард, 1967; Вайнцвайг, 1973; Гвишиани, Гурвич, 1992; Ранцман, Гласко, 2004].

Алгоритм “Кора-3”, так же как и алгоритм “Правило Хемминга”, состоит из двух этапов. На первом из них выполняется обучение. На базе объектов, входящих в обучающие выборки  $B_0$  и  $H_0$ , формируются наборы признаков, характерных для этих выборок. Признак  $A$  определяется с помощью 6-ти чисел: три целых числа  $j, k, l$  ( $1 \leq j \leq k \leq l \leq L$ , где  $L$  – длина бинарных векторов, описывающих объекты распознавания) и три бинарных числа  $\delta_1, \delta_2, \delta_3$ , принимающих значения 0 или 1. По определению, объект (бинарный вектор)  $\omega = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_L)$  обладает признаком  $A$ , если значение булевой функции  $f(A, \omega^i) = (\delta_1 \equiv \omega_j^i) \& (\delta_2 \equiv \omega_k^i) \& (\delta_3 \equiv \omega_l^i)$  равно 1.

Для определения характерных признаков задаются четыре порога  $S_1, C_1, S_2$  и  $C_2$ , которые являются параметрами алгоритма. Признак называется характерным признаком класса  $B$ , если число объектов из обучающей выборки  $B_0$ , которые им обладают, не меньше чем порог  $S_1$ , а число объектов из обучающей выборки  $H_0$ , которые им обладают, не больше чем порог  $C_1$ . Соответственно, признак называется характерным признаком класса  $H$ , если число объектов из обучающей выборки  $H_0$ , которые им обладают, не меньше чем порог  $S_2$ , а число объектов из обучающей выборки  $B_0$ , которые им обладают, не больше чем порог  $C_2$ .

Для характерных признаков вводятся отношения подчиненности и эквивалентности. Харак-

терный признак  $A$  является подчиненным по отношению к другому характерному признаку  $B$  того же класса, если все объекты из множества обучения этого класса, которые обладают признаком  $A$ , обладают также признаком  $B$  и есть хотя бы один объект из множества обучения, который обладает признаком  $B$ , но не обладает признаком  $A$ . Два характерных признака эквивалентны, если ими обладают одни и те же объекты соответствующего множества обучения. При формировании окончательных наборов характерных признаков классов  $B$  и  $H$ , ( $B$ -признаков и  $H$ -признаков) алгоритм исключает подчиненные признаки, а из группы эквивалентных оставляет только один признак.

На втором этапе выполняется классификация всех объектов из множества  $W$  на основе  $B$ - и  $H$ -признаков с помощью еще одного параметра алгоритма – порога голосования  $\Delta$ . Объект распознавания относится к классу  $B$ , если разность между числами  $B$ -признаков и  $H$ -признаков, которыми он обладает, не меньше порога  $\Delta$ . В результате множество  $W$  разделяется на два класса  $B$  и  $H$ .

Алгоритм “Подклассы” является предложенной Ш.А. Губерманом модификацией алгоритма “Кора-3” и позволяет проводить распознавание в случае, когда материал обучения  $B_0$  разбит на подмножества (“подклассы”). Впервые этот алгоритм применялся в исследовании [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976] при распознавании высокосейсмичных зон в Калифорнии, где в качестве объектов распознавания использовались точки на разломах, а подклассы, на которые было разбито  $B_0$ , состояли из объектов, расположенных в окрестностях эпицентров уже известных сильных землетрясений. Другими словами, для каждого из таких эпицентров формируется подкласс, состоящий из объектов, находящихся в окрестности этого эпицентра, а затем объединение этих подклассов образует множество  $B_0$ . Если какой-то объект попадает в несколько подклассов, то он входит во множество  $B_0$  несколько раз в составе тех подклассов, в которые он попал. По сравнению с алгоритмом “Кора-3” меняется определение характерного признака класса  $B$ : с порогом  $S_1$  сравнивается не число объектов из  $B_0$ , обладающих признаком, а число подклассов, обладающих им (по определению, подкласс обладает признаком, если хотя бы один входящий в него объект обладает этим признаком).

На разных этапах развития подхода ЕРА для распознавания использовались и другие алгоритмы: “Expert Communication (EC)” [Sallantin, 1983], “Правило Байеса” [Гвишиани, Кособоков, 1981], различные версии алгоритма “Кора-3” [Гельфанд и др., 1976; и др.] и другие.

Особое место в блоке распознавания образов метода ЕРА занимает созданный в 1983 г. извест-

ным французским математиком Жаном Саллантенем (Jean Sallantin) алгоритм “ЕС” [Sallantin, 1983]. В рамках советско-французского проекта “Распознавание сильных и значительных землетрясений в регионах умеренной сейсмичности — Альпы, Большой Кавказ, Пиренеи” [Вебер и др., 1985; 1986а; 1986б; Гвишиани и др., 1987а; Cisternas et al., 1985; Gvishiani et al., 1987] французские участники предложили выполнить независимое изучение этих регионов методами распознавания образов. При этом использовались как различные принципы определения объектов распознавания (на основе МСР и отрезки разломов неотектонической схемы региона), так и принципиально отличные алгоритмические блоки ЕРА (“Кора-3” и “ЕС”). Независимое распознавание (dual recognition) подтвердило достоверность обоих подходов, т.к. результаты оказались достаточно близки. По результатам советско-французского проекта в 1988 г. в издательстве “Наука” была опубликована монография [Гвишиани и др., 1988а].

Отличием алгоритма “Правило Байеса” от описанных алгоритмов является то, что он не нуждается в двоичном представлении объектов распознавания, но остается необходимой процедура дискретизации, т.е. компоненты векторов, соответствующих объектам, должны принимать конечное число значений. Для построения решающего правила алгоритма необходимо задать априорную вероятность принадлежности объекта классу  $B$  и порог  $\Delta$  [Гвишиани и др., 1980а]. Для векторов, представляющих объекты, на основе обучающих выборок вычисляются оценки вероятностей их принадлежности классам  $B$  и  $H$ . Объекты, у которых разность этих оценок не меньше  $\Delta$ , относятся к классу  $B$ , а остальные объекты относятся к классу  $H$ .

### Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений

Алгоритмические основы подхода ЕРА были разработаны в 1972 г. в процессе решения задачи распознавания алгоритмом “Кора-3” дизъюнктивных узлов Востока Средней Азии (Тянь-Шань и Памир), в пределах которых возможно возникновение землетрясений с  $M \geq 6.5$  [Гельфанд и др., 1972; 1973а; Gelfand et al., 1972]. В результате удалось определить ряд новых узлов, в которых землетрясения с  $M \geq 6.5$  еще не происходили, но могут произойти в будущем.

Позже распознавание в этом же регионе было выполнено вновь алгоритмом “Кора-3” с использованием в качестве объектов распознавания пересечений линеаментов [Жидков, Кособоков, 1978; Жидков и др., 1980]. Результаты распознавания по узлам [Гельфанд и др., 1972; 1973а] и по пересечениям [Жидков, Кособоков, 1978] оказались хорошо согласованными. В последующем в этом регионе произошло 9 землетрясений с  $M \geq 6.5$ .

Эпицентры восьми из них расположены в узлах, отнесенных к классу  $B$  в 1972–1978 гг. Более того, два эпицентра расположены в узлах, в которых землетрясения с  $M \geq 6.5$  ранее не были известны [Горшков и др., 2001; Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018]. Отметим, что в работах [Гельфанд и др., 1972; 1973б; Gelfand et al., 1972] для региона впервые были определены критерии высокой сейсмичности на языке использовавшихся в исследовании геолого-геофизических характеристик. На рис. 2 показаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  из работы [Жидков, Кособоков, 1978].

Работы [Гельфанд и др., 1972; 1973а; Gelfand et al., 1972] положили начало уже почти 50-летнему циклу публикаций, посвященных решению методом ЕРА задач распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений в различных горных странах мира. Результаты этих исследований опубликованы, в основном, в сборнике “Вычислительная сейсмология”, советских и российских журналах “Физика Земли” (“Известия АН СССР. Сер. Физика Земли”), “Доклады Академии наук” (“ДАН СССР”) и “Вулканология и сейсмология”, а также ведущих иностранных журн. “Tectonophysics”, “Physics of the Earth and Planetary Interiors”, “Pure and Applied Geophysics”, “Geophysics”, “Annales Geophysicae”, “International J. Geophysics”, “J. Seismology and Earthquake Engineering” и др. Распознаванию методом ЕРА посвящен ряд монографий [Ранцман, 1979; Гвишиани и др., 1988а; Гвишиани, Гурвич, 1992; Ранцман, Гласко, 2004; Горшков, 2010; Dubois, Gvishiani, 1998; Gvishiani, Dubois, 2002; и др.]. Результаты распознавания мест будущих сильных землетрясений опубликованы в виде глав в монографиях [Gorshkov et al., 2003а; Gvishiani et al., 2019; и др.], вышедших в издательстве Springer. В разные годы исследователями задачи ЕРА защищены три докторские и восемь кандидатских диссертаций.

В 1973 г. с помощью алгоритма “Кора-3” было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  в объединенном регионе Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья. В качестве объектов распознавания рассматривались морфоструктурные узлы [Гельфанд и др., 1974а]. В 1974 г. распознавание для этого региона было проведено с использованием других объектов распознавания — пересечений осей морфоструктурных линеаментов [Гельфанд и др., 1974б]. На рис. 3 показаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  из работы [Гельфанд и др., 1974б].

В 1975 г. в работе [Жидков и др., 1975] результаты [Гельфанд и др., 1974а] и [Гельфанд и др., 1974б] были сопоставлены друг с другом. В результате были получены независимые классификации пересечений линеаментов в подрегионах

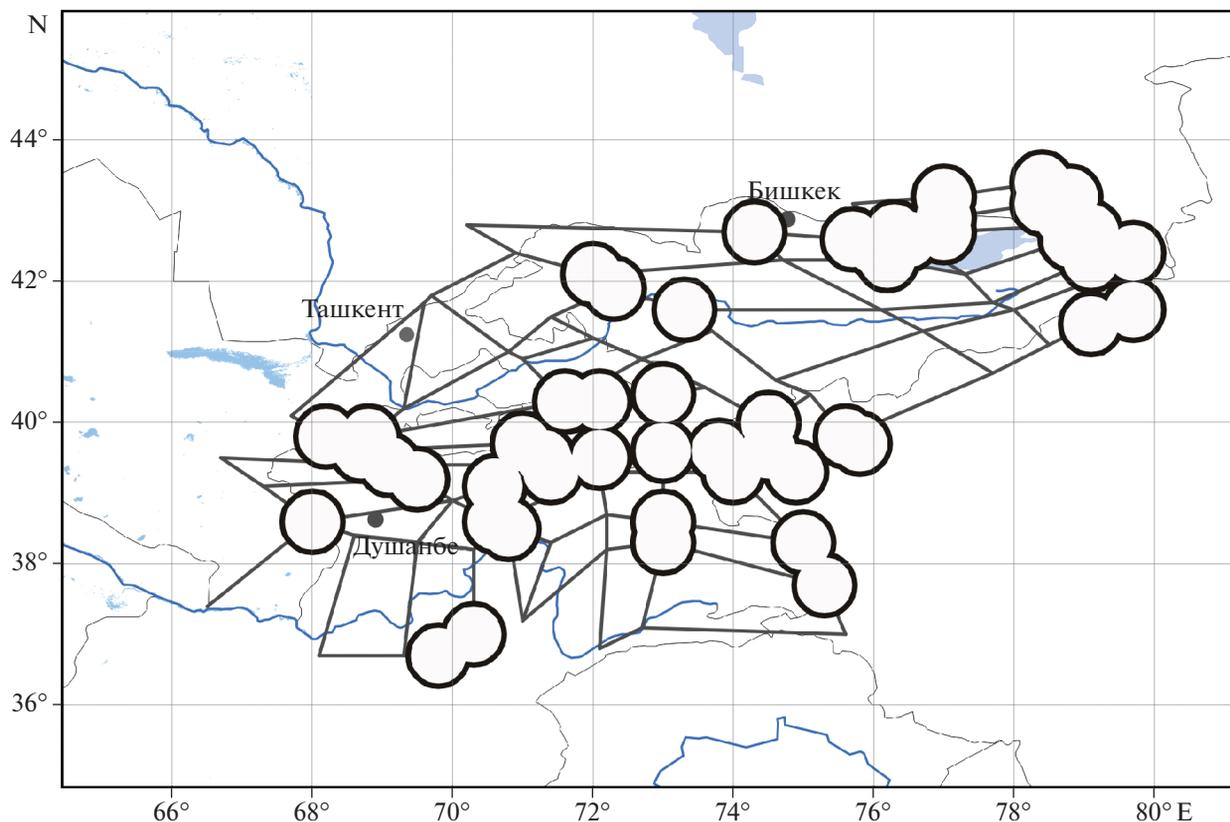


Рис. 2. Схема линеаментов Тянь-Шаня и Памира и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  (око­турены жирными линиями) [Жидков, Косо­боков, 1978; Соловьев и др., 2014].

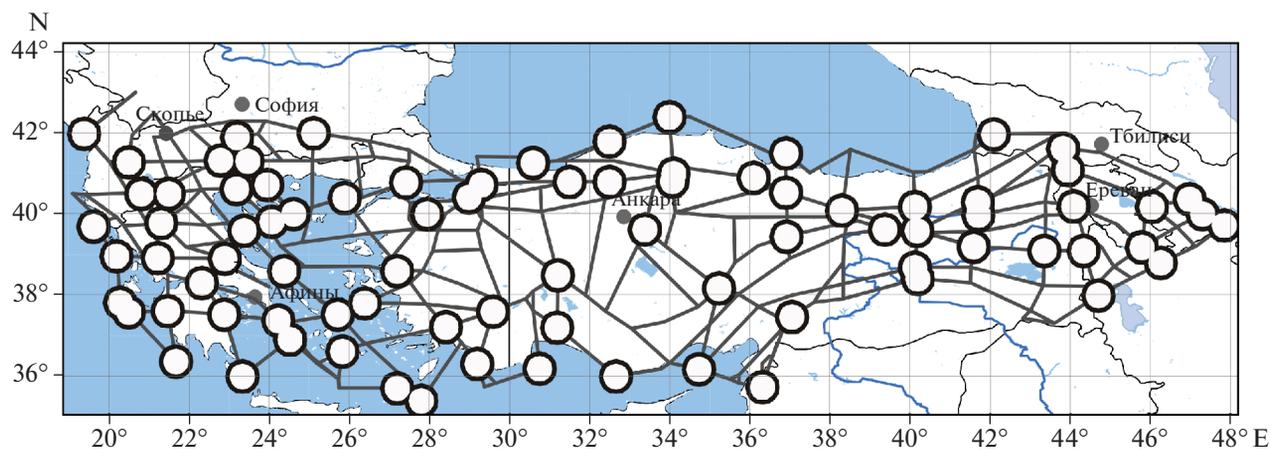


Рис. 3. Схема линеаментов и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  [Гельфанд и др., 1974б; Соловьев и др., 2014] (око­турены жирными линиями) в объединенном регионе Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья.

объединенного региона. Отметим, что результаты [Жидков и др., 1975; Гельфанд и др., 1974а] хорошо согласуются. В работе [Жидков и др., 1975] наряду с алгоритмом “Кора-3” использовался и алгоритм “Подклассы”.

В 1977 г. для рассматриваемого объединенного региона было выбрано новое значение порога  $M_0 = 7.0$  [Косо­боков, Ротвайн, 1977]. В качестве объектов алгоритм “Подклассы” [Косо­боков, Ротвайн, 1977] использовал пересечения линеа-

ментов, отнесенные в работе [Гельфанд и др., 1974б] к классу *B* при пороге  $M_0 = 6.5$ .

Анализ, выполненный в работах [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018], показывает высокий уровень достоверности результата, полученного в работе [Гельфанд и др., 1974б]. После публикации [Гельфанд и др., 1974б] в рассматриваемом регионе произошло 31 землетрясение с  $M \geq 6.5$ . Эпицентры 28 из них расположены в узлах, распознанных как высокосейсмичные. При этом 8 эпицентров расположены в узлах, в которых ранее землетрясения с  $M \geq 6.5$  не происходили.

Во второй половине 70-х гг. в рамках советско-американской геолого-геофизической программы, выполнявшейся АН СССР и Геологической службой США (USGS), к развитию подхода ЕРА подключились известные американские геофизики Ф. Пресс (F. Press, в последующем президент Национальной академии наук США в 1981–1993 гг.) и Л. Кнопоф (L. Knopoff). Распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  в Калифорнии и на прилегающих территориях было выполнено советско-американской группой ученых в 1976 г. с использованием алгоритмов “Кора-3” и “Подклассы” [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976]. Со стороны АН СССР в проекте участвовал Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта, а с американской – UCLA Университет Калифорнии в Лос-Анджелесе.

В этом исследовании независимо рассматривались два типа объектов распознавания: точки на крупных геологических разломах, взятые с равномерным шагом, и пересечения морфоструктурных линеаментов. В работах [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976] были подтверждены два важных факта: приуроченность эпицентров землетрясений с  $M \geq 6.5$  к пересечениям морфоструктурных линеаментов и существование в Калифорнии поперечных линеаментов. Это удалось показать путем сопоставления результатов распознавания, полученных в работах [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976], с использованием объектов разного типа. В 1977 г. для рассматриваемого региона было выполнено распознавание алгоритмом “Кора-3” с использованием гравитационных аномалий [Артемьев и др., 1977]. Результаты [Гельфанд и др., 1976; Артемьев и др., 1977; Gelfand et al., 1976] хорошо согласуются.

В работе [Кособоков, Ротвайн, 1977] критерии мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 7.0$ , полученные алгоритмом “Подклассы” для объединенного региона Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Армянского нагорья, были успешно применены к определению высокосейсмичных зон на территории Калифорнии. Все известные на тот момент землетрясения с  $M \geq 7.0$  были расположены в выявленных таким новым распознаванием окрестностях объектов. После опубли-

кования в 1976 г. результатов [Гельфанд и др., 1976; Gelfand et al., 1976] в регионе произошло 14 землетрясений с  $M \geq 6.5$ . Эпицентры 13 расположены в окрестностях объектов отнесенных к классу *B*. При этом 4 землетрясения произошли в районе, где сильные землетрясения ранее не происходили [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018].

В 1979 г. советско-итальянской группой ученых проведено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  на территории Апеннинского полуострова [Горшков и др., 1979; Caputo et al., 1980]. Для распознавания использовался алгоритм “Подклассы” и пересечения линеаментов в качестве объектов распознавания. Результаты распознавания в Италии настолько хорошо подтвердились последующей сейсмичностью, как в других регионах. После опубликования результатов [Горшков и др., 1979; Caputo et al., 1980] на территории изучаемого региона Италии произошло 11 землетрясений с  $M \geq 6.0$ . Эпицентры 7 из них расположены в окрестностях пересечений линеаментов, отнесенных к классу *B*. При этом в окрестности одного пересечения землетрясения с  $M \geq 6.0$  ранее не происходили [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018]. Эпицентры 4 землетрясений оказались вне окрестностей высокосейсмичных пересечений. Это может быть объяснено [Соловьев и др., 2014] недостатками схемы МСР Апеннинского полуострова, построенной совместно с итальянскими коллегами.

В 1980–1982 гг. было проведено формализованное морфоструктурное районирование горного пояса Анд [Габриэлов и др., 1982]. При этом, приуроченность эпицентров землетрясений с  $M \geq 7.0$  к пересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки оказалась неочевидной, и ее наличие было обосновано с использованием специально разработанного алгоритма [Гвишиани, Соловьев, 1980]. На основе этого было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 7.75$  на Тихоокеанском побережье Южной Америки [Гвишиани, Соловьев, 1981; Гвишиани и др., 1982; Гвишиани, Соловьев, 1982]. Для распознавания использовался алгоритм “Кора-3” и пересечения линеаментов, полученные методом МСР, примененным с некоторыми дополнениями по сравнению с предыдущими работами. А именно, в дополнение к трем рангам линеаментов введены линеаменты высшего ранга – океанический желоб и материковый склон. В схему линеаментов включены линейные зоны, подходящие к горному поясу Анд со стороны океана и платформы, введен новый тип горообразования – современная геосинклиналь [Габриэлов и др., 1982]. В работе [Жидков и др., 1990] было выполнено независимое распознавание для меньшего магнитудного порога  $M_0 = 7.0$ .

После опубликования результатов [Гвишиани и др., 1982] в регионе произошло 7 землетрясений с  $M \geq 7.75$ . Положения их эпицентров дают аргументы в пользу достоверности полученного результата. Эпицентры пяти из них расположены в окрестностях пересечений линеаментов, расположенных как опасные, при этом два из них — в районах, где сильные землетрясения ранее не происходили [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018].

В 1978–1980 гг. было выполнено распознавание мест возможного возникновения сильнейших ( $M \geq 8.2$ ) землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса [Гвишиани и др., 1978; 1980a]. Аргументом в пользу выбора этого региона для исследований явились его масштаб и высочайший уровень сейсмической активности. Так, до выполнения распознавания за первые три четверти XX века в пределах Тихоокеанского сейсмического кольца произошло 80% от общего количества землетрясений мира с  $M \geq 8.2$  [Гвишиани и др., 1980a]. Тихоокеанский сейсмический пояс включает несколько зон субдукции океанических плит под обрамляющие континенты.

Целью исследований [Гвишиани и др., 1978; 1980a] являлось выявление в Тихоокеанском поясе сегментов, где могут возникать землетрясения с  $M \geq 8.2$ , и определение общих критериев таких сегментов. Следует заметить, что Тихоокеанский пояс неоднороден по характеру и истории основных разломов, а, следовательно, и по условиям возникновения землетрясений [Гвишиани и др., 1980a]. По этой причине у исследователей не было уверенности в существовании общих критериев мест сильнейших землетрясений всего региона. Однако аргументом в пользу их существования стала высказанная В.И. Кейлис-Бороком гипотеза о том, что распознанные в различных регионах критерии высокой сейсмичности могут обладать универсальными инвариантами. Гипотеза базировалась на опыте переноса критериев сейсмичности между регионами [Гельфанд и др., 1973в; Кособоков, Ротвайн, 1977].

В качестве объектов распознавания в Тихоокеанском сейсмическом поясе брались точки на кривой, трассирующей оси глубоководных желобов и подножия континентальных склонов, образующих пояс. Распознавание проводилось алгоритмом “Кора-3” в работе [Гвишиани и др., 1978], алгоритмами “Правило Хемминга”, “Кора-3” и “Правило Байеса” в работе [Гвишиани и др., 1980a]. Достоверность результатов распознавания была подтверждена, в том числе, успешным переносом выявленных критериев высокой сейсмичности Тихоокеанского пояса на территорию Альпийского пояса и Южно-Антильского региона [Кособоков, 1980]. В работе [Гвишиани, Кособоков, 1983] с помощью специально разработанного

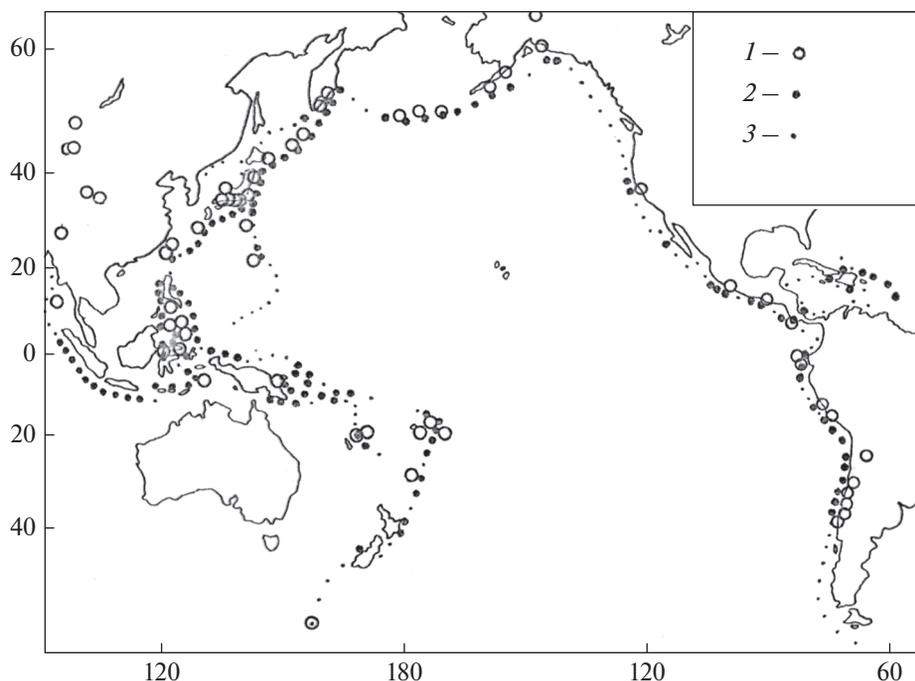
математического аппарата обосновано, что для Тихоокеанского пояса наибольшей статистической значимостью обладает результат ЕРА для пороговой магнитуды  $M_0 = 8.0$ , полученный с помощью алгоритма распознавания “Правило Хемминга”. На рис. 4 показан основной результат распознавания из работы [Гвишиани и др., 1978].

В работе [Гвишиани и др., 1984б] построена схема МСР Тихоокеанского побережья полуострова Камчатка и выполнен перенос на этот регион критериев высокой сейсмичности ( $M_0 = 7.75$ ), полученных для горного пояса Анд Южной Америки [Гвишиани и др., 1982]. Объекты распознавания Камчатки, отнесенные к классу *B* на основе переноса критериев, содержат в своих окрестностях эпицентры всех ранее произошедших коровых инструментальных землетрясений с  $M \geq 7.75$ . После [Гвишиани и др., 1984б] на Камчатке произошло одно землетрясение с  $M \geq 7.75$ , и его эпицентр расположен в окрестности объекта из класса *B*.

В начале 80-х годов прошлого века в рамках соглашения о сотрудничестве между АН СССР и Национальным центром исследований Франции (CNRS) успешно развивалось советско-французское сотрудничество по исследованиям в области сейсмогенезиса [Гвишиани и др., 1984а], научное руководство которым осуществляли директора Московского и Парижского институтов физики Земли М.А. Садовский и Ж. Жобер. Ядром этого сотрудничества стал проект распознавания мест возможного возникновения сильных и значительных землетрясений в трех областях Альпийского орогенного пояса Евразии, обладающих умеренным уровнем сейсмичности: на Большом Кавказе, в Западных Альпах и Пиренеях. По результатам этих исследований в 1988 г. опубликована монография [Гвишиани и др., 1988а].

Целью проекта был поиск общих признаков мест возможного возникновения значительных ( $M \geq 5.0$ ) землетрясений в трех рассматриваемых регионах. В проекте участвовали Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта АН СССР, Институт географии АН СССР, Институты физики Земли Парижа и Страсбурга, Бюро по геологии и минералогии Франции, Университет Монпелье. Французские ученые А. Систернас, К. Вебер, Э. Филип, Ж. Саллантен, П. Годфруа, работая в едином коллективе с возглавляемыми А.Д. Гвишиани советскими геофизиками, геоморфологами и математиками, сыграли важную роль в успешном выполнении проекта.

В 1981–1986 гг. внимание исследователей было нацелено на распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 5.0$  в Западных Альпах. В работе [Вебер и др., 1981] по комплексу геолого-геофизических и геоморфологических данных была построена схема МСР, обоснована приуроченность эпицентров сильных землетря-



**Рис. 4.** Тихоокеанский сейсмический пояс. Основной вариант распознавания мест возникновения сильнейших ( $M \geq 8.2$ ) землетрясений из работы [Гвишиани и др., 1978]: 1 – эпицентры землетрясений с  $M \geq 8.2$ ; 2 – объекты распознавания, отнесенные к классу В; 3 – отнесенные к классу Н.

сений к окрестностям пересечений морфоструктурных линеаментов. В работе [Горшков и др., 1982] методом ЕРА было выполнено распознавание с помощью алгоритма “Кора-3” для пересечений осей линеаментов в качестве объектов распознавания. Результат согласовывался с расположением эпицентров исторических землетрясений.

В работах [Вебер и др., 1985; Cisternas et al., 1985] результат работы [Горшков и др., 1982] был существенно уточнен. В этих работах был применен дуальный подход. Задача в Западных Альпах независимо решалась коллективами из СССР и Франции. Первые проводили ЕРА-распознавание, используя те же объекты и алгоритм, что и в работе [Горшков и др., 1982]. Набор характеристик, описывающих объекты, был несколько расширен.

Французская группа заменила МСР неотектонической схемой (НТС). Объекты распознавания определялись как равновеликие участки разломов НТС. Их векторное представление представлялось в основном значениями тектонических характеристик.

Несмотря на принципиальные различия в подходах результаты, полученные советской и французской группами, достаточно хорошо согласовались. На рис. 5 показаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 5.0$  из работ [Вебер и др., 1985; Cisternas et al., 1985], распознанные советскими учеными.

В работе [Вебер и др., 1986а] было продолжено развитие дуального подхода: выполнено распознавание алгоритмом “Кора-3” для определенных на основе НТС объектов, векторное описание которых состояло из характеристик, использованных ранее французскими учеными в работе [Вебер и др., 1985]. Результат оказался близким к результату, ранее полученному советской группой [Вебер и др., 1985; Cisternas et al., 1985].

Результат распознавания в Альпах [Вебер и др., 1985; Cisternas et al., 1985] характеризуется высокой степенью достоверности. После его опубликования в Западных Альпах произошло 6 землетрясений с  $M \geq 5.0$ . Эпицентры 5 из них расположены в областях В. В одной из них сильные землетрясения ранее не происходили [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018].

В 1987 г. в работах [Гвишиани и др., 1987а; 1987в; Gvishiani et al., 1987] с помощью алгоритма “Кора-3” на базе пересечений линеаментов было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 5.0$  в Пиренеях. Достоверность распознавания подтверждается путем переноса критериев высокой сейсмичности с Пиренеев на Западные Альпы и наоборот, а также результатами распознавания в объединенном регионе – Пиренеи–Западные Альпы [Гвишиани и др., 1987а]. Согласно работам [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018] после 1987 г. на Пиренеях произошло 6 сильных землетрясе-

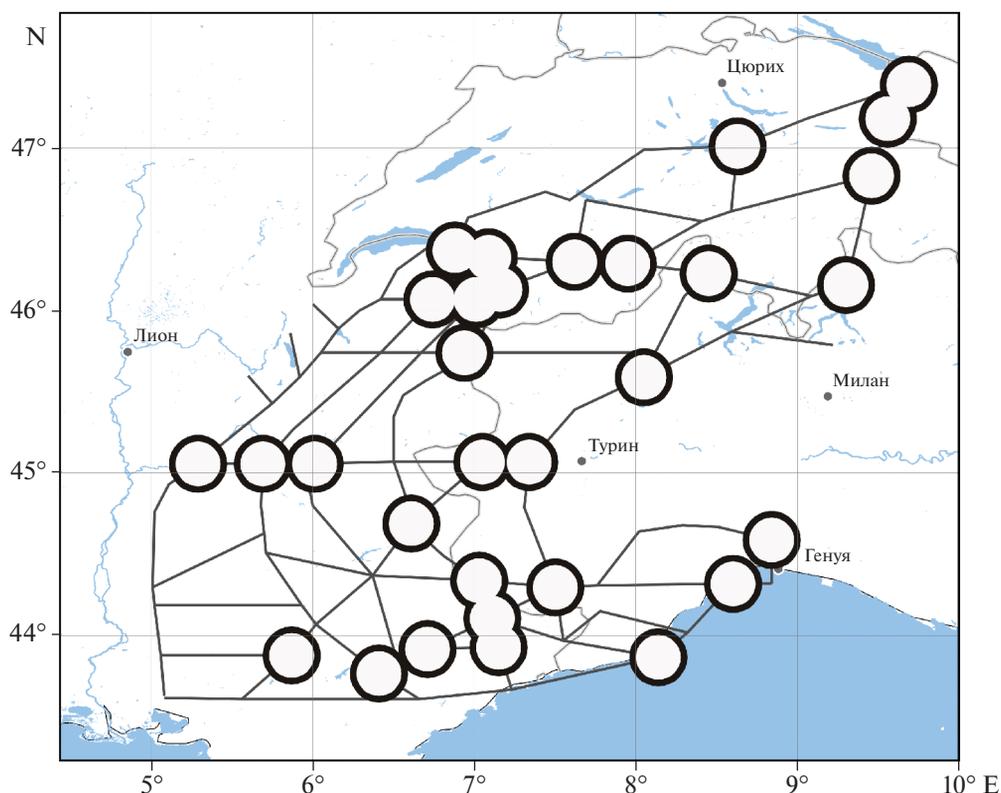


Рис. 5. Схема линеаментов Западных Альп и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 5.0$  [Вебер и др., 1985; Соловьев и др., 2014; Cisternas et al., 1985] (оконтурены жирными линиями).

ний. Эпицентры 5 расположены в окрестностях пересечений, отнесенных к классу *B*. Одно землетрясение произошло в районе, где землетрясения такой магнитуды ранее не наблюдались [Соловьев и др., 2014].

В 1986–1988 гг. было проведено распознавание для территории Большого Кавказа. В этом регионе задача решалась алгоритмом “Кора-3” для трех магнитудных порогов и двух типов объектов распознавания. В 1986 г. подход ЕРА применен к морфоструктурным узлам для пороговой магнитуды  $M_0 = 6.5$  [Гвишиани и др., 1986]. В 1987 г. классификация морфоструктурных узлов выполнена для  $M_0 = 5.5$  [Гвишиани и др., 1987б]. Наконец, в 1988 г. выполнена классификация пересечений осей морфоструктурных линеаментов для еще более низкой пороговой магнитуды  $M_0 = 5.0$  [Гвишиани и др., 1988а]. В 2001, 2014 и 2018 гг. в работах [Горшков и др., 2001; Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018] был проведен детальный анализ результата распознавания из работы [Гвишиани и др., 1988а]. Оказалось, что эпицентры всех 13 землетрясений с  $M \geq 5.0$ , произошедших на Большом Кавказе после 1988 г., располагаются вблизи пересечений линеаментов, распознанных как опасные. При этом 9 землетрясений произошли в окрестности пересечений, в

районе которых ранее такие землетрясения не были известны [Соловьев и др., 2014]. Таким образом, качество распознавания на Кавказе можно считать одним из самых высоких в истории применения ЕРА.

В целом, результаты советского-французского проекта оказались впечатляющими. Удачным переносом сформированных в каждом из трех регионов критериев сейсмичности на два других [Гвишиани и др., 1988а] и результатами распознавания в объединении четырех регионов Средиземноморской области [Гвишиани и др., 1988б] было показано, что в критериях сейсмичности, помимо региональной составляющей, содержатся и признаки, общие для всех рассмотренных регионов. В связи с этим в развитии ЕРА появилась надежда на возможность существования универсальных критериев повышенной сейсмичности.

Начиная с 1990 г. в блоке распознавания ЕРА стал применяться только алгоритм “Кора-3”, а в случае малого материала обучения выполнялся перенос критериев, полученных в сходном регионе. В качестве объектов распознавания в основном использовались пересечения осей морфоструктурных линеаментов.

В 1991 г. в работе [Горшков и др., 1991] построена МСР схема для Малого Кавказа и выполнено

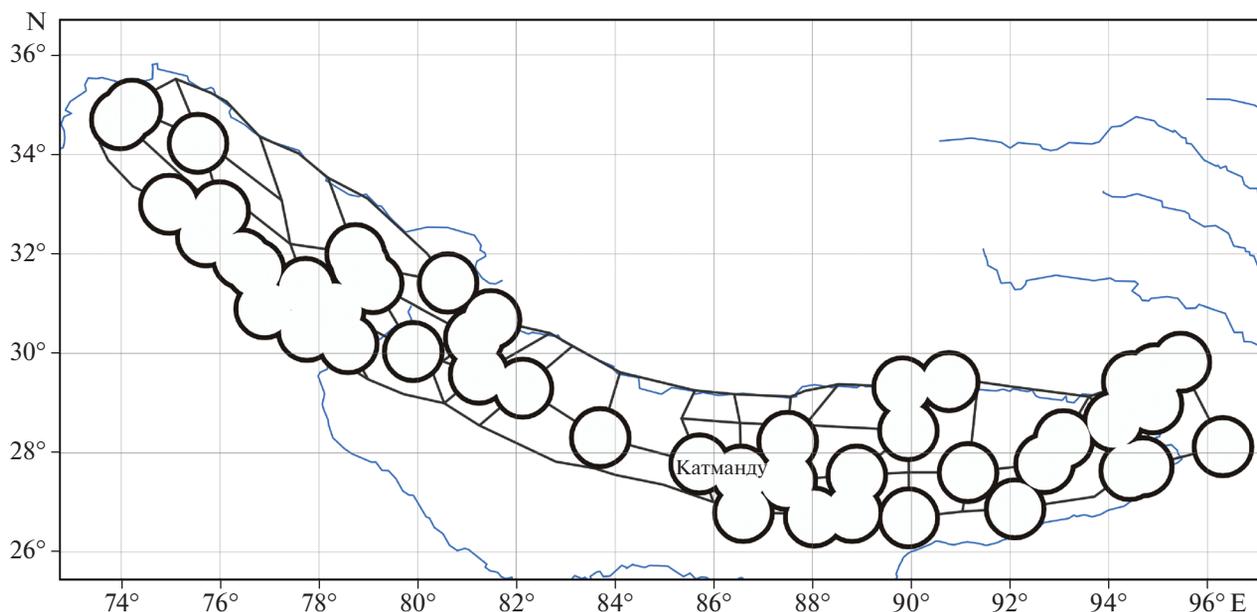


Рис. 6. Схема линеаментов Гималаев и места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  [Бхатия и др., 1992; Соловьев и др., 2014] (оконтурены жирными линиями).

распознавание мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 5.5$ .

Начиная с 1992 г. исследования ЕРА продолжились силами Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН. Ключевую роль в этих исследованиях играют А.И. Горшков и А.А. Соловьев. В 1992–1994 гг. амбициозной целью применения ЕРА стал регион Гималаев, который изучался российско-индийской группой ученых [Бхатия и др., 1992]. Была построена схема МСР и распознаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$ . Достоверность полученного результата изучалась в работе [Gorshkov et al., 2012], где был сделан вывод о целесообразности использования результатов распознавания при оценке сейсмической опасности. Согласно работам [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018] в Гималаях после публикации [Бхатия и др., 1992] до 2018 г. произошло 5 землетрясений с  $M \geq 6.5$ . Эпицентры трех из них расположены в окрестностях пересечений, распознанных как высокосейсмичные. При этом один эпицентр находится в окрестности пересечения, где ранее не было землетрясений с  $M \geq 6.5$  [Соловьев и др., 2014; Gorshkov, Novikova, 2018]. На рис. 6 показаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.5$  из работы [Бхатия и др., 1992].

В работе [Бхатия и др., 1994] метод ЕРА применен в Гималаях для пороговой магнитуды  $M_0 = 7.0$ . Из-за невозможности проведения обучения в силу малого количества землетрясений с  $M \geq 7.0$  в Гималаях классификация объектов на высоко- и

низкосейсмичные была выполнена путем переноса критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд Южной Америки, полученных для такой же пороговой магнитуды в 1990 г. [Жидков и др., 1990]. Результаты распознавания [Бхатия и др., 1992; 1994] достаточно хорошо согласуются.

В 2000 г. российско-итальянская группа ученых применила метод ЕРА в Карпато-Балканском горном поясе для пороговой магнитуды  $M_0 = 6.5$  [Gorshkov et al., 2000]. Как и в Гималаях [Бхатия и др., 1992], из-за малого количества землетрясений с  $M \geq 6.5$  и, соответственно, невозможности проведения обучения классификация объектов осуществлялась путем переноса критериев высокой сейсмичности региона Памир–Тянь-Шань, определенных для  $M \geq 6.5$  алгоритмом “Правило Хемминга” [Косообоков, 1982]. Эти же критерии были использованы для классификации объектов распознавания (пересечений линеаментов) в Туркмено-Хоранских горах (Копетдаг, Кучано-Мешхедская межгорная впадина, Эльбурс, Аладаг и Биналуд) для пороговой магнитуды  $M_0 = 6.5$  [Горшков и др., 2002]. Позже в этом регионе (Копетдаг–Аладаг–Биналуд) методом ЕРА было выполнено полномасштабное распознавание для  $M_0 = 6.0$  [Горшков, Новикова, 2012].

В 2002–2003 гг. в результате российско-итальянского сотрудничества метод ЕРА был применен для  $M_0 = 6.0$  в регионах: Альпы, полуостровная Италия, Балканы, Карпаты и Динариды [Gorshkov et al., 2002; 2003b], а затем в 2004 г. в Альпах и Динаридах [Gorshkov et al., 2004]. В работе [Gorshkov et al., 2004] также выполнено рас-

познавание в Динаридах для  $M_0 = 6.5$  путем переноса критериев высокой сейсмичности из региона Памир–Тянь-Шань [Кособоков, 1982].

В истории ЕРА несомненный интерес представляет работа [Горшков, Соловьев, 2009], в которой были распознаны места возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  в огромном регионе, включающем в себя четыре горных пояса Средиземноморья: Альпы, Динариды и северная часть Сербо-Македонского массива, Апенины и Сицилия (распознавание здесь было выполнено ранее [Gorshkov et al., 2002]), Карпаты и Балканиды. Распознавание проводилось отдельно для каждой горной страны. При этом в Карпатах и Балканидах по отмеченным выше причинам классификация объектов осуществлялась переносом критериев сейсмичности из Динарид [Горшков, Соловьев, 2009].

В 2010 г. в работе [Горшков, 2010] обобщены результаты многолетних исследований по распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском подвижном поясе от Пиренеев и Бетской Кордильеры на западе до Гималаев на востоке, а именно: Альпы и Динариды, Карпато-Балканский горный пояс, Апенины и Сицилия, Иберийская плита [Gorshkov et al., 2010], Туркмено-Хоранские горы, Эльбурс, Малый Кавказ, Гималаи.

На примере центральной части Русской платформы показана принципиальная возможность применения подхода ЕРА для распознавания сейсмоопасных районов на платформенных территориях и намечены возможности использования метода ЕРА для распознавания рудоносных узлов [Горшков, 2010].

Метод ЕРА был применен для пороговой магнитуды  $M_0 = 7.0$  в Черноморско-Каспийском регионе, включающем в себя Кавказ, Эльбурс и Копетдаг, межгорные Рионскую и Куринскую впадины, глубоководную Южно-Каспийскую котловину [Новикова, Горшков, 2018]. Важным для сейсмораионирования результатом стал тот факт, что в пределах Южно-Каспийской глубоководной котловины, характеризующейся более тонкой океанической корой, не было распознано мест, способных генерировать землетрясения с  $M \geq 7.0$ .

В 2015–2017 гг. дальнейшее развитие подхода ЕРА было стимулировано проектом Российского научного фонда (РНФ) № 15-17-30020 “Применение системного анализа для оценки сейсмической опасности в регионах России, включая Кавказ–Крым и Алтай–Саяны–Прибайкалье”, выполненного Геофизическим центром РАН. На примере Кавказа было впервые показано, что данные по литосферным магнитным аномалиям обладают высокой информативностью для определения мест возможного возникновения силь-

нейших, сильных и значительных землетрясений [Соловьев и др., 2016].

В работе [Горшков и др., 2017] построена схема МСР горной части полуострова Крым и определены места возможного возникновения сильных землетрясений с  $M \geq 6.0$  путем переноса критериев этого уровня сейсмичности с Кавказа [Соловьев и др., 2013; 2016]. В регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье построена схема МСР и проведено полноценное применение метода ЕРА для  $M_0 = 6.0$  [Горшков и др., 2018].

До 2015 г. значения используемых характеристик объектов распознавания измерялись вручную с бумажных карт. В 2015 г. в рамках реализации проекта РНФ создана автоматизированная система для измерения геолого-геофизических и геоморфологических характеристик объектов. Для этого был разработан инструмент геообработки для ГИС-системы компании Esri – ArcGIS. Основными достоинствами инструмента являются: автоматизация процесса, который раньше выполнялся вручную, большая точность измерений характеристик, удобство работы с цифровыми картами формата ГИС [Соловьев и др., 2018].

С точки зрения анализа успехов и неудач метода ЕРА представляет интерес работа [Gorshkov, Novikova, 2018], в которой для всех регионов, где применялся метод ЕРА, выполнен полный анализ расположения эпицентров землетрясений с  $M \geq M_0$ , где  $M_0$  – пороговая магнитуда в соответствующем регионе, произошедших после опубликования результатов распознавания. Оказывается, что 86% таких сильнейших, сильных и значительных землетрясений произошло в достаточных малых окрестностях пересечений осей морфоструктурных линейментов (или в морфоструктурных узлах), распознанных как высокосейсмичные. Это является одним из аргументов в пользу приводимых в работе [Peresan et al., 2015] положений о существенности вклада ЕРА в оценку сейсмической опасности территории.

В течение почти 50 лет истории развития метода ЕРА была создана и развита эффективная методика распознавания мест возможного возникновения землетрясений для различных пороговых магнитуд  $M_0$  в горных странах и на платформенных территориях. Полученные путем применения метода ЕРА результаты сегодня вносят существенный вклад в проведение сейсмического районирования, которое, в свою очередь, является одним из основных этапов оценки сейсмической опасности.

### Обучение по одному классу

Стартовым этапом в алгоритмах дихотомии, входящих в блок распознавания метода ЕРА, является формирование материала обучения. При

этом множество обучения состоит из двух непересекающихся подмножеств:  $B_0$  — объекты обучения высокосейсмичного класса  $B$  и  $H_0$  — объекты обучения низкосейсмичного класса  $H$  [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014]. Алгоритмы выявляют геолого-геофизические признаки, характерные для высоко- и низкосейсмичного классов. Затем, все множество объектов распознавания экзаменуется на обладание этими признаками. При их наличии объекты экзамена объявляются соответственно высоко- или низкосейсмичными [Гвишиани и др., 1988а].

Обучающая выборка  $B_0$  формируется из объектов распознавания, к которым приурочены достоверно определенные эпицентры ранее произошедших сильных (с  $M \geq M_0$ ) землетрясений. В случае использования в качестве объектов распознавания морфоструктурных узлов — это объекты, содержащие эпицентры сильных землетрясений, а в случае пересечений линеаментов — объекты, в некоторых окрестностях которых находятся эпицентры сильных землетрясений [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014]. Очевидно, что обучающая выборка  $B_0$  с большой вероятностью не содержит априорных ошибок.

Формирование аналогичного “чистого” материала обучения класса  $H$  затруднительно. В обучающую выборку  $H_0$  включаются либо все объекты, не вошедшие в  $B_0$ , либо объекты, в окрестностях которых известны лишь землетрясения с магнитудой  $M < M_0 - \delta$ , где  $\delta > 0$  и, как правило, имеет значение 0.5 или 1 [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014]. Очевидно, что такое определение выборки  $H_0$  не гарантирует невозможности возникновения сильных землетрясений в окрестностях входящих в него объектов, и часть объектов из  $H_0$  в результате классификации может быть отнесена к классу  $B$ . Заметим, что выделение таких объектов наряду с отнесенными к классу  $B$  объектами, не входившими в обучающую выборку, и является целью применения метода ЕРА. Использование  $H_0$  в качестве обучающей выборки класса  $H$  основано на предположении, что процент объектов из  $H_0$ , которые на самом деле принадлежат классу  $B$  сравнительно мал. Это предположение подтверждалось во всех случаях применения метода ЕРА, но невозможность получения “чистой” обучающей выборки класса  $H$  остается его недостатком.

В ходе работ над проектом РНФ № 15-17-30020 метод ЕРА получил развитие в виде создания нового алгоритма, примененного в блоке распознавания. Алгоритм получил название “Барьер” [Гвишиани и др., 2017а]. Принципиальным отличием “Барьера” от классических алгоритмов распознавания ЕРА является то, что обучение в нем ведется только по одной обучающей выборке  $B_0$ .

Задача алгоритма “Барьер” — определить характерные черты объектов из этой обучающей выборки и на их базе выявить объекты “похожие” на объекты из  $B_0$ . Говоря языком теории множеств, “Барьер” решает задачу построения в конечном множестве объектов его подмножества  $B$ , расширяющего единственный и достоверный класс обучения  $B_0$  [Гвишиани и др., 2017а].

Первоначальный вариант алгоритма “Барьер”, обладая несомненным преимуществом, состоящим в отсутствии необходимости обучающей выборки класса  $H$ , тем не менее, уступает классическим алгоритмам метода ЕРА, так как не выявляет геолого-геофизические характеристики высокосейсмичных объектов изучаемого региона [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014; Дзобоев и др., 2019]. Для количественной оценки вклада используемых геолого-геофизических характеристик в формирование класса  $B$  алгоритм “Барьер” был модифицирован. А именно были созданы вычислительные блоки алгоритма, позволяющие оценить, как средний вклад геолого-геофизических характеристик, так и их вклад через попадание в тройки “сильнейших” характеристик [Дзобоев и др., 2019]. Новая версия алгоритма получила название “Барьер-3”. Конструкция алгоритмов “Барьер” и “Барьер-3” устроена таким образом, что объекты обучения из  $B_0$  в конечной классификации всегда попадают в класс  $B$ . Подробное описание математической конструкции алгоритмов дано в работах [Гвишиани и др., 2017а; Дзобоев и др., 2019].

Алгоритм “Барьер-3” хорошо зарекомендовал себя при распознавании мест возможного возникновения землетрясений с  $M \geq 6.0$  в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье [Дзобоев и др., 2019] и на Кавказе. В обеих задачах в качестве объектов распознавания использовались пересечения морфоструктурных линеаментов. Ранее распознавание в этих регионах было выполнено алгоритмом “Кора-3” [Соловьев и др., 2016; Горшков и др., 2018]. Результаты, полученные с помощью двух разных алгоритмов, оказались достаточно близкими как в классификации пересечений линеаментов, так и в выявлении критериев высокой сейсмичности рассмотренных регионов [Дзобоев и др., 2019]. Согласованность результатов применения алгоритмов “Барьер-3” и “Кора-3” является аргументом в пользу их достоверности.

Результаты распознавания алгоритмом “Барьер-3” в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье использованы для оценки влияния Алтае-Саянской орогенной области на устойчивость структурно-тектонических блоков земной коры и сейсмическую опасность в зоне контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты. Это дало возможность сделать выводы в отношении устойчивости структурно-тектонических блоков

в этом районе, существенные для оценки возможности захоронения в них радиоактивных отходов [Дзобоев и др., 2019].

В работе [Дзобоев и др., 2019] выдвинута идея интерпретации объединения результатов распознавания, полученных алгоритмами “Барьер-3” и “Кора-3”, как нечеткого множества объектов, в окрестности которых возможно возникновение сильных землетрясений.

### ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ

В период широкого развития классического метода ЕРА в 80-е гг. XX в. на первый план выступила проблема обоснования достоверности распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений. С этой целью был предложен ряд контрольных экспериментов (например, [Гельфанд и др., 1976; Горшков и др., 1979; Гвишиани и др., 1988а; 2018; Горшков, 2010; Gelfand et al., 1976; Caputo et al., 1980]), а также создана содержательная математическая теория построения системы необходимых условий достоверности результата ЕРА [Гвишиани, 1982; Гвишиани и др., 1985; Гвишиани, Гурвич, 1982; 1983а; 1983б; 1984; 1992; Dubois, Gvishiani, 1998; Gvishiani, Dubois, 2002] на основе разработанной А.Д. Гвишиани дискретно-математической конструкции динамических и предельных задач распознавания. Отметим, что из самой постановки проблемы очевидна невозможность построения достаточных условий достоверности результата ЕРА. Проверка выполнения необходимых условий показала высокую степень достоверности результатов ЕРА, полученных ранее для многих регионов мира.

#### Динамические и предельные задачи распознавания

Динамичность задачи распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений заключается в том, что в ней классификация объектов распознавания  $w \in W$  на классы  $B$  и  $H$  — есть процесс, разворачивающийся во времени, т.е.  $B = B(t)$  и  $H = H(t)$ .

Дадим определение динамической задачи. Пусть  $t \in [T_0, T_1]$  — время ( $T_1 \leq \infty$ ), и в каждый момент времени  $t$  имеется разбиение  $W(t) = B(t) \amalg H(t)$ , т.е. существует отображение  $F(w, t) : W \times [T_0, T_1] \rightarrow \{B(t), H(t)\}$ . С течением времени объекты могут переходить из  $H(t)$  в  $B(t)$ . Если момент времени  $t$  фиксирован, то исходные данные динамической задачи составляет информация о поведении системы на отрезке времени  $[T_0, t]$ . Эта информация определяет материал обучения на момент времени  $t$ .

Пусть теперь фиксирован другой момент времени  $t'$ , причем  $t < t' < T_1$ . Тогда под решением динамической задачи для момента  $t'$  понимается распознавание классификации  $W(t') = B(t') \amalg H(t')$ , которая должна соответствовать функции  $F$  на множествах  $W \times [t', t]$  и  $W \times [T_0, t]$  [Гвишиани, Гурвич, 1983а; 1992].

Для переноса сделанного определения на случай  $t' \rightarrow \infty$  необходимо существование предела  $\lim_{t \rightarrow \infty} F(w, t) = F(w, \infty)$  (или  $\lim_{t \rightarrow \infty} (B(t) \amalg H(t))$ ). В этом случае  $W(t) = B(t) \amalg H(t)$  является прогнозом предельного состояния рассматриваемой системы при  $t \rightarrow \infty$ . Это приводит к классификации объектов распознавания, не зависящей от времени, что и является решением задачи прогноза мест возможного возникновения сильных землетрясений. Такая динамическая задача распознавания называется предельной [Гвишиани, Гурвич, 1983а; 1992]. В работе [Гвишиани, Гурвич, 1992] построены строгие достаточные условия корректности постановки предельной задачи распознавания.

В работах [Гвишиани, 1982; Гвишиани, Гурвич, 1982] введено условие стабильности классификации объектов (устойчивости во времени). Пусть, как и прежде,  $W$  и  $W_0 = B_0 \amalg H_0$  — множество объектов распознавания и материал обучения, а  $W = B \amalg H$  — результат классификации объектов на высоко- и низкосейсмичные, полученный некоторым алгоритмом. Эта классификация называется стабильной, если для каждого множества  $B' : B_0 \subseteq B' \subseteq B$  существуют свободные параметры алгоритма такие, что новая классификация  $W(B', H') = B_1 \amalg H_1$  совпадает с  $W = B \amalg H$ .

Сформулированное условие стабильности использовано для обоснования независимости от времени классификации пересечений линейных элементов в регионах Малой Азии и Эгейского бассейна ( $M_0 = 7.0$ ) [Гвишиани, 1982], полученных в работах [Кособоков, Ротвайн, 1977; Гвишиани, Кособоков, 1981], а также востока Средней Азии ( $M_0 = 6.5$ ) [Гвишиани, Гурвич, 1982], полученного в работе [Гвишиани, Кособоков, 1981]. В работе [Гвишиани, Гурвич, 1983а] сформулированы необходимые и достаточные условия для стабильности классификации, полученной алгоритмом класса ГНП [Гвишиани и др., 1985].

Выполнение условия стабильности, очевидно, говорит в пользу достоверности классификации. В работе [Гвишиани, Гурвич, 1984] показано, что классификация, неустойчивая в момент получе-

ния, может стать устойчивой в будущем. Такая ситуация имеет место в случае, когда достаточно мало объектов, распознанных как высокосейсмичные, уже проявили себя таковыми [Гвишиани и др., 1985]. В работе [Гвишиани, Гурвич, 1984] вводятся понятия локальной стабильности классификации и системы стабилизирующих множеств. С их помощью на примере Востока Средней Азии [Гельфанд и др., 1972; Гвишиани, Кособоков, 1981] построены условия стабилизации классификации со временем.

В работе [Гвишиани и др., 1985] с помощью алгоритма “Кора-3” получена корректная (т.е.  $V_0 \subseteq V$ ) классификация объектов восточной части Тихоокеанского подвижного пояса [Гвишиани и др., 1978; 1980а] для  $M_0 = 8.2$  и сформулированы строгие условия стабилизации этой классификации.

### Контрольные эксперименты

Наилучшим обоснованием достоверности результатов распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений является апостериорная проверка на основе данных о сильных землетрясениях рассматриваемого региона, то есть сравнение результата с расположением эпицентров таких землетрясений, произошедших после его получения. Но такая проверка может быть выполнена лишь по прошествии достаточно длительного времени после получения результата. Оценка достоверности классификации объектов на высоко- и низкосейсмичные непосредственно после ее получения осуществляется с помощью контрольных вычислительных экспериментов [Гельфанд и др., 1974а; 1976; Горшков и др., 1979; Гвишиани и др., 1988а; 2018; Горшков, 2010; Gelfand et al., 1976; Caputo et al., 1980]. В классическом методе ЕРА применяются следующие основные контрольные эксперименты.

- *Эксперимент “Сейсмическое будущее” (СБ)* [Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1988а; Gelfand et al., 1976] состоит в повторении полученной классификации объектов  $W = V \amalg H$ , используя в качестве обучающих выборок  $V_0$  и  $H_0$  множества  $V$  и  $H$ . Эксперимент считается удачным, если не более 5% от общего количества объектов распознавания меняют свою принадлежность по сравнению с исходной классификацией. Эксперимент проверяет стабильность классификации по отношению к сильным землетрясениям, которые могут произойти в будущем. В соответствии с работой [Гвишиани, Гурвич, 1984] эксперимент СБ выполняет проверку классификации на локальную стабильность, и, следовательно, его удачный исход есть необходимое условие для принятия полученного результата классификации в каче-

стве решения задачи ЕРА [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010].

- *Эксперимент “Сейсмическая история” (СИ)* [Гельфанд и др., 1976; Гвишиани и др., 1988а; Gelfand et al., 1976] выполняется путем отбрасывания эпицентров сильных землетрясений за последние  $t$  лет и исключения из  $V_0$  объектов, связанных с отброшенными землетрясениями. Эксперимент считается успешным, если в новой классификации исключенные объекты будут отнесены к классу  $V$ .

- *Эксперимент “Проверка устойчивости”* [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010] есть обобщение эксперимента СБ. В нем делается попытка повторить классификацию  $W = V \amalg H$ , используя в качестве обучающих выборок  $V_0$  и  $H_0$  подмножества  $V'_0 \subseteq V$  и  $H'_0 \subseteq H$ . Эксперимент считается удачным, если не более 10% от общего количества объектов меняют свою первоначальную классификацию.

- *Эксперимент “Скольльзящий контроль”* [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010] состоит в получении классификаций объектов распознавания обучаясь на материалах обучения  $V_0$  и  $H_0$ , в которых поочередно исключается по одному объекту. В получаемых в эксперименте классификациях все объекты из  $V_0$  (кроме, возможно, объекта исключенного в данном варианте распознавания) должны быть отнесены к классу  $V$ . Эксперимент считается удачным, если не более 20% объектов из обучающей выборки  $W_0$  изменили свою классификацию при их исключении из обучения.

- *Эксперимент “Голосование по совокупности эквивалентных признаков”* выполняется только в случае использования алгоритмов “Кора-3” или “Подклассы” [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010]. При их использовании результат классификации может зависеть от того, какие признаки из групп эквивалентных будут отобраны в наборы характерных признаков  $V$  и  $H$ . Эксперимент выполняется с целью выявления такой зависимости и считается успешным, если не более 5% объектов меняют классификацию при отборе других представителей групп эквивалентных признаков.

- *Эксперименты на рандомизированных данных* [Гвишиани, Кособоков, 1981; Гвишиани и др., 1988а] предназначены для оценки вероятности ошибки классификации и проверки ее неслучайности. В экспериментах выполняется последовательность классификаций, в которых материалы обучения  $V_0$  и  $H_0$  формируются случайным образом из всего множества объектов распознавания. Результат эксперимента считается тем лучше, чем в большем количестве классификаций со случайным материалом обучения имеет место отнесение к классу  $H$  объектов из  $V_0$ .

• *Эксперименты повторения результата* [Гвишиани и др., 1988а; Горшков, 2010] состоят в повторении результата классификации после изменения хода решения задачи, начиная с какого-либо этапа. Например, использование другого алгоритма классификации, других объектов распознавания, дополнительных характеристик объектов, информации об исторических сильных землетрясениях и т.д. Эксперимент считается удачным, если не более 20% объектов меняют свою классификацию.

### РАСПОЗНАВАНИЕ СИСТЕМОЙ FCAZ НА ОСНОВЕ ВЫДЕЛЕНИЯ СГУЩЕНИЙ ЭПИЦЕНТРОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

В методе ERA определение объектов распознавания (морфоструктурные узлы или пересечения осей морфоструктурных линейментов) и измерение их геолого-геофизических и геоморфологических характеристик представляет собой отдельную трудоемкую задачу. Для ее решения необходимо использовать данные, которые не всегда доступны для рассматриваемого региона, или ограничиваться характеристиками, для которых возможно единообразное определение их значений для каждого объекта распознавания в пределах изучаемой территории. Работы по составлению схемы МСР выполняются высококвалифицированными специалистами в большей степени вручную. Возможность использования выбранных объектов распознавания в методе ERA необходимо обосновывать для каждого региона отдельно.

Все это осложняет применимость метода на практике и вызывает необходимость разработки новых алгоритмических систем, позволяющих в большей мере автоматизировать процесс распознавания.

В 2013 г. в результате исследований А.Д. Гвишиани, С.М. Агаяна и Б.А. Дзебоева была разработана алгоритмическая система FCAZ (Formalized Clustering And Zoning) [Гвишиани и др., 2013б] на основе созданного в Геофизическом центре РАН оригинального подхода к анализу дискретных данных ДМА (Дискретный Математический Анализ) [Агаян и др., 2005; Гвишиани и др., 2008а; 2008б; 2008в; 2010; Gvishiani et al., 2004; Gvishiani, Dubois, 2002; Soloviev et al., 2012; и др.], основной вклад в разработку которого внес С.М. Агаян. FCAZ позволяет эффективно проводить распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на базе кластеризационного исследования эпицентров достаточно слабых землетрясений. Алгоритмическая система представляет из себя последовательное применение двух алгоритмов, названных DPS (Discrete Perfect Sets) [Гвишиани и др., 2013а; Дзебоев, 2017; Agayan et al., 2014; Dzeboev, Krasnoperov, 2018] и E<sup>2</sup>XТ [Гвишиани и др., 2013б].

DPS является оригинальным алгоритмом топологической фильтрации, входящим в блок “ДМА-кластеризация” [Гвишиани и др., 2002а; 2002б; Gvishiani, Dubois, 2002; и др.]. В конечном множестве  $X$  Евклидова пространства DPS выделяет области с заданным уровнем плотности  $\alpha$ . На выходе получается множество точек  $\alpha$ -плотное в каждой своей точке. Задача алгоритма DPS состоит в построении такого множества  $X(\alpha)$ , что его плотность будет не меньше уровня  $\alpha$  во всех своих точках. Подчеркнем, что алгоритм DPS эффективен в данной задаче потому, что он “притягивает” практически все рассматриваемые объекты в кластеры, не оставляя изолированных точек. Алгоритм E<sup>2</sup>XТ формализует построение однозначного отображения DPS-кластеров в плоские зоны ненулевой плоской меры, внутри и на границах которых возможно возникновение сильно землетрясения.

Отметим, что FCAZ работает только с сейсмическими характеристиками объектов распознавания — эпицентрами землетрясений [Гвишиани и др., 2013б; 2016]. До создания алгоритма E<sup>2</sup>XТ не существовало однозначно воспроизводимых методов перехода от распознанных конечных высокосейсмичных кластеров к соответствующим плоским зонам с точными границами, внутри которых возможно возникновение землетрясений искомой пороговой магнитуды.

В 2016 г. создана модифицированная версия системы FCAZ. Модификация заключается во включении блоков искусственного интеллекта в структуры алгоритмов DPS и E<sup>2</sup>XТ. Эти блоки позволили автоматизировать выбор оптимальных значений ряда входных параметров алгоритмов, чем сделали результат более объективным и воспроизводимым [Гвишиани и др., 2016].

Ранее с помощью системы FCAZ было выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений в горном поясе Анд Южной Америки [Гвишиани и др., 2016; Gvishiani et al., 2019], на Тихоокеанском побережье Камчатки [Дзебоев и др., 2018а] и Курильских островов ( $M_0 = 7.75$ ), в Калифорнии [Гвишиани и др., 2013а; Дзебоев и др., 2018б; Gvishiani et al., 2013] и на острове Сахалин ( $M_0 = 6.5$ ), в регионе Прибайкалье—Забайкалье ( $M_0 = 5.5, 5.75, 6.0$ ) [Гвишиани и др., 2017в], в регионе Алтай—Саяны ( $M_0 = 5.5$ ) [Гвишиани и др., 2018], на Кавказе ( $M_0 = 5.0$ ) [Гвишиани и др., 2013б; 2016; Гвишиани, Дзебоев, 2015; Gvishiani et al., 2013; 2019], а также на Крымском полуострове и северо-западе Кавказа ( $M_0 = 4.5, 5.0$ ) [Гвишиани и др., 2017б]. Достоверность полученных результатов оценена с помощью контрольных экспериментов типа “сейсмическая история” [Гвишиани и др., 2016], а также путем их сравнения с зонами, распознанными методом ERA [Гвишиани и др., 1988а; Соловьев и др., 2014].

При распознавании высокосейсмичных зон в регионе Прибайкалье–Забайкалье впервые было проведено последовательное FCAZ-распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений для нескольких магнитудных порогов в одном и том же сейсмоопасном регионе. Это удалось сделать за счет итерационного сужения множества объектов распознавания системы FCAZ. Зоны возможного возникновения землетрясений для данного магнитудного порога распознавались внутри зон, уже распознанных как опасные для меньшей пороговой магнитуды [Гвишиани и др., 2017в].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе полувекового развития и применения подхода ERA можно прийти к заключению, что он является эффективным средством для определения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Это подтверждается анализом данных о сильных землетрясениях, которые произошли в изученных регионах после получения соответствующих результатов. Другими аргументами в пользу достоверности ERA служат разработка и выполнение многочисленных контрольных экспериментов, позволяющих оценивать достоверность получаемых результатов, применение теории динамических и предельных задач распознавания, а также устойчивость результатов при применении различных алгоритмов распознавания, включая алгоритм “Барьер”, использующий обучающую выборку только высокосейсмичных объектов. Особое значение имеет опыт применения в одних и тех же регионах наряду с подходом ERA системы FCAZ. Результаты, полученные независимо с помощью этих двух принципиально отличающихся подходов, демонстрируют хорошее согласие и тем самым дают аргументы в пользу их достоверности.

На основе совместного применения подхода ERA и системы FCAZ открываются перспективы создания единого метода системного анализа для более глубокого изучения проблемы выделения мест возможного возникновения сильных землетрясений. Для создания такого метода необходимо разработать с помощью теории нечетких множеств [Агаян и др., 2005; Гвишиани и др., 2002а; 2002б; 2008а; 2008б; 2008в; 2010; Gvishiani et al., 2004; Soloviev et al., 2012] процедуры интегрирования воедино баз данных и знаний, построенных раздельно с помощью ERA и FCAZ. Конечным результатом этого могло бы стать создание автоматизированных методов интегрирования исходной информации и результатов исследований в единые базы данных и знаний.

Полученная в итоге интегральная база данных должна строиться таким образом, чтобы обеспечить эффективное извлечение из нее информа-

ции широким кругом пользователей, не имеющих специальной подготовки в области предмета исследования и системного анализа. В идеале запросы к базе данных могут формулироваться на неформальном языке человеческого общения с возможностью прямого голосового обращения. Встроенный в базу искусственный интеллект (ИИ) должен конвертировать запрос в ее формальный внутренний язык с дальнейшим представлением ответа на общедоступном содержательном языке. В качестве первого шага в этом направлении может рассматриваться создание в Геофизическом центре РАН ГИС-ориентированной базы данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма [Соловьев и др., 2018]. В дальнейшем ее планируется расширять путем включения данных по другим регионам.

Внедрение столь продвинутого сегодня ИИ имеет исключительную важность не только в вышеуказанном аспекте. Он также должен “отслеживать” все новые знания, последовательно полученные в решениях каждой следующей задачи распознавания мест возможного возникновения землетрясений в тех или иных регионах. Эти знания ИИ должен автоматически накапливать в единой базе данных ERA и FCAZ. При проведении исследований в новых регионах ИИ мог бы целенаправленно предоставлять исследователю выдержки из накопленной информации.

На основании опыта применения подхода ERA и системы FCAZ можно сделать заключение о необходимости непосредственного использования получаемых с их помощью результатов при оценке сейсмической опасности и, в частности, в целях сейсморайонирования. Для этого необходимо разработать подходы к преобразованию информации о положениях эпицентров возможных сильных землетрясений в оценки для конкретных мест рассматриваемого региона максимальной бальности, параметров сотрясаемости и рисков для населения и инфраструктуры. Это потребует дальнейшего развития методов ERA/FCAZ в направлении адаптации их результатов для использования в планировании сейсмостойкого строительства. Отдельные вопросы применения получаемых этими методами результатов для оценки сейсмической опасности и разработки мероприятий по сокращению ущерба от землетрясений рассмотрены в работах [Горшков, 1993; Panza et al., 2003; Peresan et al., 2011; 2015].

### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственных заданий Геофизического центра РАН и Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, утвержденных Минобрнауки России.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Гвишиани А.Д., Граева Е.М., Злотники Ж., Родкин М.В. Исследование морфологии сигнала на основе алгоритмов нечеткой логики // Геофизические исследования. 2005. № 1. С. 143–155.
- 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. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 10. 1977. С. 33–49.
- Артемьев М.Е., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VII. Использование гравитационных аномалий Буге для Калифорнии и смежных регионов // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 10. 1977. С. 19–32.
- Бонгард М.М., Вайнцвайг М.Н., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Смирнов М.С. Использование обучающейся программы для выявления нефтеносных пластов // Геология и Геофизика. 1966. № 6(II). С. 15–29.
- Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука. 1967. 320 с.
- Бхатия С.С., Горшков А.И., Раницман 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. Вычислительная сейсмология. Вып. 25. 1992. С. 71–83.
- Бхатия С.С., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Рао М.Н., Филимонов М.Б., Четти Т.Р.К., Шток Н.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIX. Гималаи,  $M \geq 7.0$  // Теоретические проблемы геодинамики и сейсмологии. М.: Наука. Вычислительная сейсмология. Вып. 27. 1994. С. 280–287.
- Вайнцвайг М.Н. Алгоритм обучения распознаванию образов “Кора”. Алгоритмы обучения распознаванию образов. М.: Сов. Радио. 1973. С. 8–12.
- Вебер К., Горшков А.И., Раницман Е.Я. Морфоструктурные ленимаменты и сильные землетрясения Западных Альп // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 14. 1981. С. 67–73.
- Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Ламбер С., Раницман Е.Я., Саллантен Ж., Сальдано А., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XII. Два подхода к прогнозу мест возможного возникновения сильных землетрясений в Западных Альпах // Теория и анализ сейсмической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 18. 1985. С. 139–154.
- Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Ламбер С., Соловьев А.А., Трусов А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIII. Неотектоническая схема Западных Альп.  $M \geq 5.0$  // Математические методы в сейсмологии и геодинамике / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 19. 1986а. С. 82–94.
- Вебер К., Гвишиани А.Д., Годфруа П., Горшков А.И., Кушнир А.Ф., Писаренко В.Ф., Систернас А., Трусов А.В., Цванг М.Л., Цванг С.Л. О классификации высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986б. № 12. С. 3–16.
- Габриэлов А.М., Горшков В.И., Раницман Е.Я. Опыт морфоструктурного районирования по формализованным признакам // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 10. 1977. С. 50–58.
- Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Жидков М.П. Формализованное морфоструктурное районирование горного пояса Анд // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 14. 1982. С. 38–56.
- Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Исследование мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса с помощью алгоритмов распознавания // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1978. № 8. С. 31–42.
- Гвишиани А.Д., Зелевинский А.В., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Распознавание мест возникновения сильнейших землетрясений Тихоокеанского пояса ( $M \geq 8.2$ ) // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 13. 1980а. С. 30–43.
- Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М., Садовский А.М. Прогноз мест возникновения сильных землетрясений. Сейсмическое районирование территории СССР. М.: Наука. 1980б. С. 45–47.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 13. 1980. С. 46–50.
- Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. К обоснованию результатов прогноза мест сильных землетрясений, полученных методами распознавания // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1981. № 2. С. 21–36.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. Исследование мест возможного возникновения землетрясений с магнитудой  $M \geq 7.75$  на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Докл. АН СССР. 1981. Т. 256. № 5. С. 1089–1093.
- Гвишиани А.Д. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. I. Юго-Восточная Европа и Малая Азия // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 8. С. 13–19.
- Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Устойчивость по времени прогноза мест сильных землетрясений. II. Восток Средней Азии // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 9. С. 30–38.
- Гвишиани А.Д., Соловьев А.А. К решению задачи прогноза мест возникновения сильных землетрясений на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1982. № 1. С. 86–87.
- Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. X. Места землетрясений магнитуды  $M \geq 7.75$

на Тихоокеанском побережье Южной Америки // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 14. 1982. С. 56–67.

Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. I. Условия стабильности для прогноза мест сильных землетрясений // Математические моделирование и интерпретация геофизических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 16. 1983а. С. 70–88.

Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Двойственные системы множеств и их приложения // Известия АН СССР. Техническая Кибернетика. 1983б. № 4. С. 31–39.

Гвишиани А.Д., Кособоков В.Г. О выборе магнитуды для классификации мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского сейсмического пояса // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 15. 1983. С. 74–80.

Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи распознавания образов. II. Стабилизирующие множества и локальная стабильность прогноза мест сильных землетрясений // Логические и вычислительные методы в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 17. 1984. С. 29–36.

Гвишиани А.Д., Саллантен Ж., Сальдано А., Систернас А., Соловьев А.А. Результаты советско-французских исследований по распознаванию высокосейсмичных зон в Западных Альпах // Докл. АН СССР. 1984а. Т. 275. № 6. С. 1353–1358.

Гвишиани А.Д., Жидков М.П., Соловьев А.А. К переносу критериев высокой сейсмичности горного пояса Анд на Камчатку // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1984б. № 1. С. 20–33.

Гвишиани А.Д., Гурвич В.А., Расцветаев А.Л. Динамические задачи распознавания образов. III. Исследование стабильности прогноза мест сильнейших землетрясений Тихоокеанского подвижного пояса // Теория и анализ сейсмологической информации / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 18. 1985. С. 117–127.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Раницман Е.Я. Морфоструктуры и места землетрясений Большого Кавказа // Изв. АН СССР. Сер. Физика Земли. 1986. № 9. С. 45–55.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г., Систернас А., Филип Э. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XIV. Пиренеи и Альпы,  $M \geq 5.0$  // Численное моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 20. 1987а. С. 123–135.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Жидков М.П., Раницман Е.Я., Трусов А.В. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XV. Морфоструктурные узлы Большого Кавказа,  $M \geq 5.5$  // Численное моделирование и анализ геофизических процессов / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 20. 1987б. С. 136–148.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Кособоков В.Г. Распознавание высокосейсмичных зон в Пиренеях // Докл. АН СССР. 1987в. Т. 292. № 1. С. 56–59.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев А.А. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука. 1988а. 176 с.

Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Тумаркин А.Г., Филимонов М.Б. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XVI. Общие критерии умеренной сейсмичности четырех регионов Средиземноморской области ( $M \geq 5.0$ ) // Проблемы сейсмологической информатики / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 21. 1988б. С. 211–221.

Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука. 1992. 360 с.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. О новом подходе к кластеризации // Кибернетика и системный анализ. 2002а. № 2. С. 104–122.

Гвишиани А.Д., Диаман М., Михайлов В.О., Гальдеано А., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Граева Е.М. Алгоритмы искусственного интеллекта для кластеризации магнитных аномалий // Физика Земли. 2002б. № 7. С. 13–28.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р. Дискретный математический анализ и мониторинг вулканов // Инженерная экология. 2008а. № 5. С. 26–31.

Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р. Геоинформационные технологии: методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. 2008б. № 2. С. 3–14.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Злотники Ж., Боннин Ж. Математические методы геоинформатики. III. Нечеткие сравнения и распознавание аномалий на временных рядах // Кибернетика и системный анализ. 2008в. Т. 44. № 3. С. 3–18.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Богоутдинов Ш.Р., Соловьев А.А. Дискретный математический анализ и геолого-геофизические приложения // Вестник Камчатской региональной организации “Учебно-научный центр”. Серия: Науки о Земле. 2010. № 2. С. 109–125.

Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Добровольский М.Н., Дзобоев Б.А. Объективная классификация эпицентров и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2013а. № 2. С. 44–57.

Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. О новом подходе к распознаванию мест возможного возникновения сильных землетрясений на Кавказе // Физика Земли. 2013б. № 6. С. 3–19.  
<https://doi.org/10.7868/S0002333713060045>

Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А. Оценка сейсмической опасности при выборе мест захоронения радиоактивных отходов // Горный журн. 2015. № 10. С. 39–43.  
<https://doi.org/10.17580/gzh.2015.10.07>

Гвишиани А.Д., Дзобоев Б.А., Агаян С.М. Интеллектуальная система распознавания FCAZm в определении мест возможного возникновения сильных землетрясений горного пояса Анд и Кавказа // Физика Земли. 2016. № 4. С. 3–23.  
<https://doi.org/10.7868/S0002333716040013>

- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзебоев Б.А., Белов И.О. Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // Докл. РАН. 2017а. Т. 474. № 1. С. 86–92. <https://doi.org/10.7868/S0869565217130175>
- Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Сергеева Н.А., Рыбкина А.И. Формализованная кластеризация и зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений на Крымском полуострове и Северо-Западе Кавказа // Физика Земли. 2017б. № 3. С. 33–42. <https://doi.org/10.7868/S0002333717030036>
- Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Белов И.О., Сергеева Н.А., Вавилин Е.В. Последовательное распознавание мест возможного возникновения значительных и сильных землетрясений: Прибайкалье–Забайкалье // Докл. РАН. 2017в. Т. 477. № 6. С. 704–710. <https://doi.org/10.7868/S0869565217360178>
- Гвишиани А.Д., Дзебоев Б.А., Сергеева Н.А., Белов И.О., Рыбкина А.И. Зоны возможного возникновения эпицентров значительных землетрясений в регионе Алтай-Саяны // Физика Земли. 2018. № 3. С. 18–28. <https://doi.org/10.7868/S000233371803002X>
- 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., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. I. Памир и Тянь-Шань // Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 6. 1973а. С. 107–133.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М. Определение критериев высокой сейсмичности с помощью алгоритмов распознавания // Вестник МГУ. 1973б. № 5. С. 78–84.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. Опыт переноса критериев высокой сейсмичности со Средней Азии на Анатолию и смежные регионы // Докл. АН СССР. 1973в. Т. 210. № 2. С. 327–330.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М. 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. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 7. 1974а. С. 3–40.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И.М. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. III. Случай, когда границы дизъюнктивных узлов неизвестны // Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 7. 1974б. С. 41–64.
- 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. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 9. 1976. С. 3–91.
- Герасимов И.П. Опыт геоморфологической интерпретации общей схемы геологического строения СССР. Проблемы физической географии. Т. 12. М.–Л.: изд-во АН СССР. 1946. С. 33–46.
- Герасимов И.П., Раницман Е.Я. Морфоструктура горных стран и их сейсмичность // Геоморфология. 1973. № 1. С. 3–18.
- Горшков А.И., Капуто М., Кейлис-Борок В.И., Офицера 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 / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 12. 1979. С. 3–17.
- Горшков А.И., Зелевинский А.В., Раницман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. XI. Западные Альпы,  $M \geq 5.0$  // Прогноз землетрясений и изучение строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 15. 1982. С. 67–73.
- 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. Сер. Физика Земли. 1991. № 6. С. 30–38.
- Горшков А.И. Использование результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений для задач сейсморайонирования (на примере Кавказа). Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. Вып. 1. М.: ИФЗ РАН. 1993. С. 207–216.
- Горшков В.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. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. 2001. С. 48–57.
- 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. Вычислительная сейсмология. Вып. 33. 2002. С. 129–140.
- Горшков А.И., Соловьев А.А. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений  $M \geq 6.0$  в горных поясах Средиземноморья // Вулканология и сейсмология. 2009. № 3. С. 71–80.
- Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе // Алгоритмы прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М.: КРАСАНД. Вычислительная сейсмология. Вып. 40. 2010. 472 с.
- Горшков А.И., Новикова О.В. Распознавание мест сильных землетрясений ( $M \geq 6.0$ ) в Каспийском регионе: Копетдаг–Аладаг–Биналуд // Геофизические исследования. 2012. Т. 13. № 1. С. 29–38.
- Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И. Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 21–27. <https://doi.org/10.7868/S0203030617060025>

- Горшков А.И., Соловьев А.А., Жарких Ю.И.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье // Докл. РАН. 2018. Т. 479. № 3. С. 333–335. <https://doi.org/10.7868/S0869565218090219>
- Дзедобоев Б.А.* О новом подходе к мониторингу сейсмической активности (на примере Калифорнии) // Докл. РАН. 2017. Т. 473. № 2. С. 210–213. <https://doi.org/10.7868/S0869565217080163>
- Дзедобоев Б.А., Агаян С.М., Жарких Ю.И., Красноперов Р.И., Барыкина Ю.В.* Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // Физика Земли. 2018а. № 2. С. 96–103. <https://doi.org/10.7868/S0002333718020084>
- Дзедобоев Б.А., Красноперов Р.И., Белов И.О., Барыкина Ю.И., Вавилин Е.В.* Модифицированная алгоритмическая система FCAZm и зоны возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений в Калифорнии // Геоинформатика. 2018б. № 2. С. 2–8.
- Дзедобоев Б.А., Гвишиани А.Д., Белов И.О., Татаринцев В.Н., Агаян С.М., Барыкина Ю.В.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе алгоритма с единственным чистым классом обучения: I. Алтай–Саяны–Прибайкалье.  $M \geq 6.0$  // Физика Земли. 2019. № 4. С. 33–47. <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47>
- Жидков М.П., Ротвайн И.М., Садовский А.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. IV. Высокосейсмичные пересечения Армянского нагорья, Балкан и бассейна Эгейского моря // Интерпретация данных сейсмологии и неотектоники / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 8. 1975. С. 53–70.
- Жидков М.П., Кособоков В.Г.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VIII. Пересечения линеаментов Востока Средней Азии // Вопросы прогноза землетрясений и строения Земли / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 11. 1978. С. 48–71.
- Жидков М.П., Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений на пересечениях линеаментов Памира и Тянь-Шаня. Сейсмические воздействия на гидротехнические и энергетические сооружения. М.: Наука. 1980. С. 63–69.
- 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. Вычислительная сейсмология. Вып. 23. 1990. С. 274–284.
- Кейлис-Борок В.И.* Сейсмология и логика // Некоторые прямые и обратные задачи сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 4. 1968. С. 317–350.
- Кособоков В.Г., Ротвайн И.М.* Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. VI. Магнитуда  $M \geq 7.0$  // Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 10. 1977. С. 3–18.
- Кособоков В.Г.* Опыт переноса критериев высокой сейсмичности ( $M \geq 8.2$ ) с Тихоокеанского пояса на Альпийский // Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 13. 1980. С. 44–46.
- Кособоков В.Г.* Распознавание мест сильных землетрясений востока Средней Азии и Анатолии методом Хемминга // Модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 14. 1982. С. 76–81.
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Анализ расположения эпицентров землетрясений с  $M \geq 5.5$  относительно пересечения морфоструктурных линеаментов востока Средней Азии // Математические модели строения Земли и прогноза землетрясений / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. Вычислительная сейсмология. Вып. 14. 1982. С. 74–76.
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А.* Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. Вып. 4. С. 53–88. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>
- Новикова О.В., Горшков А.И.* Высокосейсмичные пересечения морфоструктурных линеаментов Черноморско-Каспийского региона // Вулканология и сейсмология. 2018. № 6. С. 23–31. <https://doi.org/10.1134/S020303061806007X>
- Раницман Е.Я.* Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука. 1979. 172 с.
- Раницман Е.Я., Гласко М.П.* Морфоструктурные узлы – места экстремальных природных явлений. М.: Медиа-Пресс. 2004. 224 с.
- Соловьев А.А., Новикова О.В., Горшков А.И., Пиотровская Е.П.* Распознавание расположения потенциальных очагов сильных землетрясений в Кавказском регионе с использованием ГИС-технологий // Докл. РАН. 2013. Т. 450. № 5. С. 599–601. <https://doi.org/10.7868/S0869565213170222>
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0002333714020112>
- 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. <https://doi.org/10.7868/S0002333716050148>
- Соловьев А.А., Горшков А.И., Жарких Ю.И.* Морфоструктурное районирование горной части Крыма и места возможного возникновения сильных землетрясений // Вулканология и сейсмология. 2017. № 6. С. 21–27. <https://doi.org/10.7868/S0203030617060025>
- Соловьев А.А., Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Николов Б.П., Николова Ю.И.* ГИС-ориентированная база данных по оценке сейсмической опасности для регионов Кавказа и Крыма // Исследование Земли из космоса. 2018. № 5. С. 42–54. <https://doi.org/10.31857/S020596140003241-6>
- Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Dobrovolsky M.N.* Discrete perfect sets and their application in cluster analysis // Cybernetics and Systems Analysis. 2014. V. 50. Is. 2. P. 176–190. <https://doi.org/10.1007/s10559-014-9605-9>

- Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E.* Formal morphostructural zoning of mountain territories // *Geophysics*. 1977. 42(2). P. 227–233.
- Caputo M., Keilis-Borok V., Oficerova E., Ranzmsn E., Rotvain I., Soloviev A.* Pattern recognition of Earthquake-prone areas in Italy // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1980. V. 21. Is. 4. P. 305–320.  
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(80\)90135-1](https://doi.org/10.1016/0031-9201(80)90135-1)
- Cisternas A., Godefroy P., Gvishiani A., Gorshkov A., Kosobokov V., Lambert M., Ranzman E., Sallantin J., Saldano H., Soloviev A., Weber C.* A dual approach to recognition of earthquake prone areas in the Western Alps // *Annales Geophysicae*. 1985. V. 3. Is. 2. P. 249–270.
- Dubois J., Gvishiani A.* Dynamic Systems and Dynamic Classification Problems in Geophysical Applications. Paris: Springer-Verlag. 1998. 256 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-642-49951-7>
- Dzeboev B.A., Krasnoperov R.I.* On the monitoring of seismic activity using the algorithms of discrete mathematical analysis // *Russian J. Earth Sciences (RJES)*. 2018. V. 18. ES3003.  
<https://doi.org/10.2205/2018ES000623>
- 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. Vol. 13. Is. 1–4. P. 415–422.  
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(72\)90031-5](https://doi.org/10.1016/0040-1951(72)90031-5)
- Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman I.Ya., Rotvain I.M., Sadovsky A.M.* Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 1976. V. 11. Is. 3. P. 227–283.  
[https://doi.org/10.1016/0031-9201\(76\)90067-4](https://doi.org/10.1016/0031-9201(76)90067-4)
- Gorshkov A.I., Kuznetsov I.V., Soloviev A.A., Panza G.F.* Identification of future earthquake sources in the Carpatho-Balkan orogenic belt using morphostructural criteria // *Pure and Applied Geophysics*. 2000. V. 157. Is. 1-2. P. 79–95.  
<https://doi.org/10.1007/PL00001101>
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A.* Morphostructural zonation and preliminary recognition of seismogenic nodes around the Adria margin in peninsular Italy and Sicily // *Journal of Seismology and Earthquake Engineering*. 2002. V. 4. Is. 1. P. 1–24.
- Gorshkov A., Kossobokov V., Soloviev A.* Recognition of earthquake-prone areas / Eds. Keilis-Borok V., Soloviev A. *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer: Heidelberg. 2003a. P. 239–310.  
[https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3_6)
- Gorshkov A.I., Panza G.F., Soloviev A.A., Aoudia A.* Recognition of the strong earthquake-prone areas ( $M \geq 6.0$ ) within the mountain belts of Central-Europe // *Revue Roumaine de Geophysique*. 2003b. V. 47. P. 30–41.
- Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Panza G.F., Aoudia A.* Identification of seismogenic nodes in the Alps and Dinarides // *Societa Geologica Italiana. Bollettino*. 2004. V. 123. Is. 1. P. 3–18.
- Gorshkov A.I., Soloviev A.A., Jiménez M.J., García-Fernández M. and Panza G.F.* Recognition of earthquake-prone areas ( $M \geq 5.0$ ) in the Iberian Peninsula // *Rendiconti Lincei*. 2010. V. 21. Is. 2. P. 131–162.  
<https://doi.org/10.1007/s12210-010-0075-3>
- Gorshkov A., Novikova O., Parvez I.A.* Recognition of earthquake-prone areas in the Himalaya: validity of the results // *International J. Geophysics*. 2012.  
<https://doi.org/10.1155/2012/419143>
- Gorshkov A., Novikova O.* Estimating the validity of the recognition results of earthquake-prone areas using the Arc-Map // *Acta Geophysica*. 2018. V. 66. Is. 5. P. 843–853.  
<https://doi.org/10.1007/s11600-018-0177-3>
- Gvishiani A.D.* Prevision des tremblements de terre et stabilite de la classification // *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*. 1982. V. 294. Serie 11. P. 749–752. Presentee par Jean Coulomb.
- Gvishiani A., Gorshkov A., Kossobokov V., Cisternas A., Philip H., Weber C.* Identification of seismically dangerous zones in the Pyrenees // *Annales Geophysicae*. 1987. V. 5B. Is. 6. P. 681–690.
- Gvishiani A.D., Dubois J.O.* Artificial intelligence and dynamic systems for geophysical applications. Springer Berlin Heidelberg. 2002. 347 p.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-04933-4>
- Gvishiani A.D., Agayan S.M., Bogoutdinov Sh.R., Tikhotsky S.A., Hinderer J., Bonnin J., Diamant M.* Algorithm FLARS and recognition of time series anomalies // *System Research & Information Technologies*. 2004. Is. 3. P. 7–16.
- Gvishiani A., Dobrovolsky M., Agayan S., Dzeboev B.* Fuzzy-based clustering of epicenters and strong earthquake-prone areas // *Environmental Engineering and Management J.* 2013. V. 12. № 1. P. 1–10.  
<https://doi.org/10.30638/eemj.2013.001>
- Gvishiani A., Dzeboev B., Nekhoroshev S.* Recognition of Earthquake-Prone Areas for Seismic Hazard Evaluation // *Disaster and Risk Research: GADRI Book Series*. 2019.
- Panza G.F., Peresan A., Vaccari F., Romashkova L., Kosobokov V., Gorshkov A., Kuznetsov I.* Earthquake preparedness: the contribution of earthquake prediction and deterministic hazard research / A. Correig (ed.) *Terratremols I temporals de llevant: dos exemples de sistemes complexos*. Jornades Científiques de l'Institut d'Estudis Catalans, Secció de Ciències i Tecnologia, Barcelona. 2003. P. 91–116 (*Sèrie jornades científiques*; 15).
- Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F., Gorshkov A., Panza G.F.* Neo-deterministic seismic hazard and pattern recognition techniques: Time-dependent scenarios for North-Eastern Italy // *Pure and Applied Geophysics*. 2011. V. 168. Is. 3–4. P. 583–607.  
<https://doi.org/10.1007/s00024-010-0166-1>
- Peresan A., Gorshkov A., Soloviev A., Panza G.F.* The contribution of pattern recognition of seismic and morphostructural data to seismic hazard assessment // *Bollettino Di Geofisica Teorica Ed Applicata*. 2015. V. 56. Is. 2. P. 295–328.  
<https://doi.org/10.4430/bgta0141>
- Sallantin J.* Methodologie de l'apprentissage pour des variables binaries // *Publ. Struc. Infor. C.N.R.S.* P. 1983. P. 13–25.
- Soloviev A., Chulliat A., Bogoutdinov Sh., Gvishiani A., Agayan S., Peltier A., Heumez B.* Automated recognition of spikes in 1 Hz data recorded at the Easter Island magnetic observatory // *Earth Planets Space*. 2012. V. 64. Is. 9. P. 743–752.  
<https://doi.org/10.5047/eps.2012.03.004>

## PROBLEM OF STRONG EARTHQUAKE-PRONE AREAS RECOGNITION: TIMELY REVIEW

A. D. Gvishiani<sup>a, c</sup>, A. A. Soloviev<sup>b</sup>, B. A. Dzeboev<sup>a, d, \*</sup>

<sup>a</sup>*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

<sup>b</sup>*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

<sup>c</sup>*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

<sup>d</sup>*Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, 362002 Russia*

*\*E-mail: b.dzeboev@gcras.ru*

The paper is devoted to the analysis of a nearly half a century history of the development of the pattern recognition algorithm application on purpose of solving the problem of determining the strong earthquake-prone areas. This approach is called EPA (Earthquake-Prone Areas). The applied pattern recognition algorithms, the studied regions and the methods for assessing the reliability of the results obtained, including the theory of dynamic and limiting recognition problems, are considered. An alternative method for solving the problem developed recently and based on the selection of earthquake epicenter concentration is presented as well. This method is based on the approaches of the Discrete Mathematical Analysis (DMA) and is implemented as the algorithmic system FCAZ (Formalized Clustering And Zoning). Comparison of results obtained by means of the EPA approach and the FCAZ system demonstrates their good consistency that is an additional argument in favor of their reliability. The opportunities for further development and joint application of the EPA approach and the FCAZ system and the creation on this basis of an integrated system analysis method with the inclusion of artificial intelligence are outlined. If successful, this method should be used in the seismic hazard assessment and planning of earthquake-resistant construction.

*Keywords:* strong earthquake sites, pattern recognition, FCAZ system, system analysis, artificial intelligence, seismic hazard assessment.