

РАСПОЗНАВАНИЕ МЕСТ ВОЗМОЖНОГО ВОЗНИКНОВЕНИЯ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ АЛГОРИТМА С ЕДИНСТВЕННЫМ ЧИСТЫМ КЛАССОМ ОБУЧЕНИЯ: I. АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЕ. $M \geq 6.0$

© 2019 г. Б. А. Дзедобоев^{1,3*}, А. Д. Гвишиани^{1,2}, И. О. Белов¹, С. М. Агаян¹, В. Н. Татаринцев^{1,2}, Ю. В. Барыкина¹

¹Геофизический центр РАН, г. Москва, Россия

²Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

³Геофизический институт Владикавказского научного центра РАН, г. Владикавказ, Россия

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

Поступила в редакцию 02.08.2018 г.

Принята в печать 03.12.2018 г.

В работе предложена новая версия алгоритма «Барьер» для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений на основе обучения по единственному достоверному классу обучения. Модификация алгоритма заключается в создании блоков, которые позволяют установить геолого-геофизические признаки, свойственные распознанным высокосейсмичным объектам распознавания, и дать их количественную оценку. Выполнено распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье. Результаты распознавания использованы для оценки влияния удаленных землетрясений, произошедших в Алтае–Саянской орогенной области, на устойчивость структурно-тектонических блоков земной коры в зоне контакта Западно-Сибирской платформы и Сибирской плиты.

Ключевые слова: место возможного возникновения землетрясений, распознавание образов, метод ЕРА, алгоритм «Кора-3», алгоритм «Барьер-3», эпицентр землетрясения, оценка сейсмической опасности, горная страна.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019433-47>

ВВЕДЕНИЕ

Развитие авторами алгоритма «Барьер» [Гвишиани и др., 2017] можно рассматривать как новый шаг в решении проблемы распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений [Гвишиани и др., 1988]. Для разделения объектов распознавания на высоко- и низкосейсмичные в известном подходе ЕРА (Earthquake-Prone Areas recognition), восходящем к классическим работам И.М. Гельфанда, В.И. Кейлис-Борока, Ф. Пресса, Л. Кнопва и др. [Гельфанд и др., 1973; 1974], используются алгоритмы дихотомии с обучением: «Кора-3», «Подклассы», «Хемминг» и др. [Гвишиани и др., 1988]. Их стартовым этапом является формирование обучающих выборок высоко- и низкосейсмичного классов, на базе которых проводится обучение алгоритмов. Заметим, что при распознавании методом ЕРА [Гвишиани и др., 1988]

ставится задача не только определения потенциально высокосейсмичных морфоструктурных узлов или пересечений осей линеаментов, но и получение геолого-геофизического описания таких участков, т. е. выявление критериев высокой сейсмичности рассматриваемого региона.

В методе ЕРА [Гвишиани и др., 1988] во всем множестве объектов распознавания формируются две выборки высоко- (B_0) и низкосейсмичных (H_0) классов для обучения алгоритма дихотомии. В обучающую выборку высокосейсмичного класса включаются объекты, в окрестностях которых известны эпицентры сильных ($M \geq M_0$) землетрясений. Такая выборка не содержит априорных ошибок.

Иное положение с обучающей выборкой низкосейсмичного класса. Как правило, в ЕРА к ней относят объекты, в окрестности которых

известны землетрясения с магнитудой лишь $M < M_0 - \delta$, $\delta > 0$. При этом δ оказывается еще одним параметром подгонки. Классические ЕРА-алгоритмы дихотомии («Кора-3», «Подклассы», «Хемминг») обучаются на сформированных таким образом двух выборках.

По сути самой задачи, являющейся предельной проблемой распознавания [Гвишиани, Гурвич, 1982; 1992; Dubois, Gvishiani, 1998; Gvishiani, Dubois, 2002], низкосейсмичный класс обучения содержит в себе потенциальные ошибки. Такими являются объекты, которые перейдут в высокосейсмичный класс в результате решения задачи. Более того, если такого перехода не произойдет, то распознавание даст тривиальный результат. Таким образом, «низкосейсмичный» класс обучения в действительности не является совокупностью эталонных объектов, которые не могут быть связаны с местами возможного возникновения сильных землетрясений. Обучающие выборки высоко- и низкосейсмичных классов оказываются неравноправными.

Алгоритмы «Кора-3», «Подклассы», «Хемминг» [Гвишиани и др., 1988] 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. Совокупность объектов, распознанных как высокосейсмичные, определяет места возможного возникновения сильных землетрясений.

«Барьер», обучаясь только по одному высокосейсмичному классу, не является алгоритмом дихотомии. Однако он может эффективно использоваться в подходе ЕРА вместо классических алгоритмов дихотомии [Гвишиани и др., 1988; Соловьев и др., 2014; Gvishiani, Dubois, 2002]. Он так же делит территорию на две непересекающиеся области, где соответственно могут или нет возникать сильные ($M \geq M_0$) землетрясения.

Существенным отличием созданного авторами алгоритма «Барьер» [Гвишиани и др., 2017] от используемых ранее в ЕРА, является то, что обучение в нем ведется только по одной обучающей выборке высокосейсмичного класса, не содержащей в себе заведомых ошибок классификации. Авторы надеются, что это позволит улучшить и качество распознавания.

Данная статья продолжает исследования проблемы ЕРА с помощью алгоритма «Барьер» [Гвишиани и др., 2017]. В настоящей работе

ставится задача распознать с его помощью места возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье.

Результаты распознавания используются, в частности, 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 (Нижне-Канский гранитоидный массив). В отсутствие достоверных исторических и современных инструментальных данных о сейсмичности этого района такая оценка его сейсмической опасности имеет существенное геоэкологическое значение в связи с проектированием и строительством в его пределах пункта глубинного захоронения высокоактивных радиоактивных отходов (РАО) [Андерсон и др., 2011; Гвишиани и др., 2008; Tatarinov et al., 2017].

РЕГИОН

Рассматриваемая в работе сейсмически активная зона Алтай–Саяны–Прибайкалье лежит в пределах $49-56^\circ$ с. ш., $82-111^\circ$ в. д. Она включает в себя северо-восточную часть сейсмического региона Северной Евразии «Алтай и Саяны» и западную часть сейсмического региона «Прибайкалье и Забайкалье» [Землетрясения..., 2010].

Алтае-Саянская складчатая область занимает среднюю часть Урало-Монгольского пояса гор, относящегося к новейшему орогеническому поясу Внутренней Азии, расположенному между Сибирской и Индостанской платформами [Девяткин, 2000]. Территория Алтае-Саянской складчатой области характеризуется сложным горно-котловинным рельефом. Ее границы определены разломами и смещениями блоковых структур в результате многократных тектонических движений. В Алтае-Саянской области сложно сочетаются разновозрастные складчатые сооружения – добайкальские срединные массивы, салаирские (на северо-востоке), каледонские (в средней части), ранне- и позднегерцинские (на западе и юго-западе) складчатые системы самых различных простираний, а также наложенные сингерцинские впадины и прогибы. Формирование тектонических структур фундамента завершилось в герцинскую эпоху складчатости, современный горный рельеф оформился в позднем кайнозое (олигоцен-четвертичное время) в результате тектонической активизации [Милановский, 1996; Буслов и др., 2013]. Землетрясения, происходящие регулярно в этой зоне,

свидетельствуют об активном процессе разрушения земной коры и горообразования [Еманов и др., 2005].

Прибайкалье – горная область на юге Восточной Сибири, включающая южную часть Сибирской платформы и Байкальскую рифтовую зону. Территория Прибайкалья характеризуется разнородным геологическим строением. Структурные элементы Прибайкалья относятся к системам байкальской и каледонской эпох складчатости (~650–350 млн лет) [Милановский, 1996]. Главной структурой региона является Байкальская рифтовая зона протяженностью около 2500 км – дивергентная граница между Евразийской плитой и Амурской микроплитой, расположенная в районе озера Байкал и Восточных Саян. Байкальской рифтовой зоне свойственна высокая сейсмическая активность: здесь происходит наибольшее количество землетрясений Прибайкалья.

Подробное описание геологии, тектоники и сейсмичности изучаемого региона Алтай–Саяны–Прибайкалье приведено в работе [Рогожин, 2012; Рогожин, Платонова, 2002; Рогожин и др., 2015; Ребецкий и др., 2013; Овсяченко и др., 2010; Dorbath et al., 2008; Буслов и др., 2013; Лукина, 1996; Иогансон, 2005; Еманов и др., 2005; и др.].

Нижне-Канский массив находится в зоне активного орогенеза, т. е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. Он расположен в узле сочленения трех крупных тектонических структур – Сибирской платформы, Западно-Сибирской плиты и Алтае-Саянской орогенной области, и его современное напряженное состояние определяется их тектоническим взаимодействием. Участок Енисейский (рис. 1) располагается на западной границе Нижне-Канского гранитоидного массива и вмещающих его докембрийских толщ гнейсов [Андерсон и др., 2011; Гвишиани и др., 2008; Морозов и др., 2008].

АЛГОРИТМ «БАРЬЕР»

Как было отмечено выше, в алгоритме «Барьер» обучение осуществляется исключительно по высокосейсмичному классу B_0 . Таким образом, исключается ситуация, когда при формировании обучающей выборки H_0 низкосейсмичного класса в нее входят потенциально высокосейсмичные объекты. Иными словами обучение низкосейсмичного класса содержит заведомые ошибки, что может исказить качество искомого

распознавания. Задача алгоритма «Барьер» – отказаться от такого «загрязненного» класса обучения, изучить характеристики обучающей выборки данного нам единственного «чистого» высокосейсмичного класса и на базе полученных знаний выявить объекты «похожие» на объекты обучения. Последние объявляются алгоритмом «Барьер» высокосейсмичными.

Говоря языком распознавания образов, «Барьер» решает задачу построения в конечном множестве объектов распознавания подмножества, расширяющего единственный класс обучения B_0 . Для этого по каждой геолого-геофизической характеристике строится мера различия между двумя произвольными объектами распознавания. Таким образом, находится и количественно оценивается «барьер», разделяющий эти объекты в рассматриваемой характеристике. Этот «барьер» играет роль метрики на исходном множестве, позволяющей придать точный смысл понятию близости к B_0 на основе совокупности геолого-геофизических характеристик [Гвишиани и др., 2017].

Пусть $W = \{w\}$ – конечное множество объектов распознавания и $\Pi = \{\pi\}$ – конечная совокупность числовых геолого-геофизических характеристик объектов $w \in W$, $\pi: W \rightarrow R$, B_0 – собственное подмножество в W для обучения высокосейсмичного класса B . На основе совокупности характеристик Π множества W необходимо построить множество $P_\Pi(B_0)$, адекватно расширяющее B_0 в смысле требований поставленной задачи.

Близости объектов w_1 и w_2 по характеристике π «мешают» все те объекты w , значения $\pi(w)$ для которых лежат между значениями $\pi(w_1)$ и $\pi(w_2)$. Они образуют барьер:

$$B_\pi(w_1, w_2) = \{w \in W: \min(\pi(w_1), \pi(w_2)) \leq \pi(w) \leq \max(\pi(w_1), \pi(w_2))\}. \quad (1)$$

Легко увидеть, что для близости w_1 и w_2 на W по характеристике π тем лучше, чем барьер $B_\pi(w_1, w_2)$ меньше. Это наблюдение объясняет название алгоритма «Барьер».

Отношение:

$$\rho_\pi(w_1, w_2) = \frac{|B_\pi(w_1, w_2)|}{|W|} \quad (2)$$

назовем мерой барьера или мерой различия w_1 и w_2 по характеристике π . Меры (2) играют роль метрик на исходном множестве W , придавая точный смысл понятию близости в задаче.

Формирование множества $P_{\Pi}(v)$ близких к $v \in B_0$ объектов из W на основе характеристик Π алгоритм «Барьер» осуществляет в три этапа [Гвишиани и др., 2017].

Этап первый: формирование множества $P_{\pi}(v)$, близких к v точек в W по характеристике π с помощью порога минимальности $\alpha_{\pi}(v)$:

$$P_{\pi}(v) = \{w \in W : \rho_{\pi}(w, v) \leq \alpha_{\pi}(v)\}. \quad (3)$$

Порог $\alpha_{\pi}(v)$ играет роль гибкой нижней границы множества расстояний $\{\rho_{\pi}(w, v), w \in W\}$ и может быть получен, например, с помощью колмогоровского усреднения с показателем $s < 0$:

$$\alpha_{\pi}(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} \rho_{\pi}(\bar{w}, v)^s}{|W|} \right)^{1/s}. \quad (4)$$

Этап второй: формирование на W показателя $p_{\Pi}(w|v)$ близости w к v на основе всех характеристик Π :

$$p_{\Pi}(w|v) = |\{\pi \in \Pi : w \in P_{\pi}(v)\}|. \quad (5)$$

Здесь $P_{\pi}(v)$ определяется формулой (3), а введенный формулой (5) целочисленный показатель $p_{\Pi}(w|v)$ изменяется от 0 до $|\Pi|$.

Этап третий: формирование в W подмножества $P_{\Pi}(v)$ близких к v точек на основе всех характеристик Π с помощью порога максимальнойности $\beta_{\Pi}(v)$:

$$P_{\Pi}(v) = \{w \in W : p_{\Pi}(w|v) \geq \beta_{\Pi}(v)\}.$$

Порог $\beta_{\Pi}(v)$ играет роль гибкой верхней границы множества показателей $\{p_{\Pi}(w|v), w \in W\}$. Аналогично (4) $\beta_{\Pi}(v)$ может быть построен с помощью колмогоровского усреднения с показателем $q > 0$:

$$\beta_{\Pi}(v) = \left(\frac{\sum_{\bar{w} \in W} p_{\Pi}(\bar{w}|v)^q}{|W|} \right)^{1/q}. \quad (6)$$

В итоге искомое множество $P_{\Pi}(B_0)$ определяется формулой:

$$P_{\Pi}(B_0) = \bigcup_{v \in B_0} P_{\Pi}(v). \quad (7)$$

Как и требовалось, описанный алгоритм «Барьер» обучается только по высокосейсмичному классу. Множество объектов распознавания представляется «Барьером» в виде разложения

$W = B \sqcup H$ на высоко- и низкосейсмичные классы объектов. Очевидно, что $B = P_{\Pi}(B_0) \supseteq B_0$, а $H = W \setminus B$ [Гвишиани и др., 2017].

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ АЛГОРИТМ «БАРЬЕР-3»

Для количественной оценки вклада используемых геолого-геофизических характеристик в формирование искомого подмножества высокосейсмичных объектов конструкция алгоритма «Барьер» в настоящей работе была дополнена новыми вычислительными блоками.

Новые блоки алгоритма заключаются в следующем. Параллельно с вычислением $p_{\Pi}(w|v)$ формируется бинарная матрица $M_{\Pi}(w|v)$:

$$M_{\Pi}(w|v)_{i,j} = \begin{cases} 1, & w_i \in P_{\pi_j}(v) \\ 0, & w_i \notin P_{\pi_j}(v) \end{cases}, \quad (8)$$

$$i = 1, \dots, |W|, \quad j = 1, \dots, |\Pi|.$$

Каждый элемент матрицы (8) определяет принадлежность или нет объекта $w \in W$ к множеству $P_{\pi_j}(v)$, $\pi_j \in \Pi$ близких к v объектов. Построенное суммирование матрицы $M_{\Pi}(w|v)$ для всех $w \in P_{\Pi}(v)$ формирует вектор $W_{\Pi}(v)$:

$$W_{\Pi}(v)_j = \sum_k M_{\Pi}(w|v)_{k,j},$$

$$w_k \in P_{\Pi}(v), \quad j = 1, \dots, |\Pi|,$$

элементы которого показывают вклад характеристики $\pi_j \in \Pi$ в формирование подмножества $P_{\Pi}(v)$ объектов, близких к объекту обучения $v \in B_0$. Количественные оценки вклада геолого-геофизических характеристик в формирование подмножества $P_{\Pi}(B_0)$ выполняются в два этапа:

1. Поэлементное сложение всех векторов $W_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$ и нормирование на $|B_0|$ позволяет получить средний вклад характеристик в распознавание искомого высокосейсмичного подмножества $P_{\Pi}(B_0)$.

2. Сортировка всех векторов $W_{\Pi}(v)$, $v \in B_0$ по возрастанию и выбор для каждого из них трех характеристик с наибольшими значениями, суммирование количества попаданий характеристик в сформированные таким образом тройки позволяют оценить вклад характеристик через их попадание в класс «сильнейших». Такой класс мы будем называть рейтингом Топ 3.

С учетом п. 2 модифицированная таким образом версия алгоритма «Барьер» получила собственное название «Барьер-3». Алгоритмы «Барьер»

и «Барьер-3» имеют два свободных параметра: s и q . Параметр s используется для вычисления порога близости α , параметр q отвечает за вычисление порога β [Гвишиани и др., 2017].

Конструкция алгоритмов «Барьер» и «Барьер-3» устроена таким образом, что объекты обучения в конечной классификации всегда попадают в высокосейсмичный класс [Гвишиани и др., 2017]. В свою очередь, при распознавании алгоритмом «Кора-3» объекты обучения как высоко-, так и низкосейсмичного классов не обязаны сохранять свою принадлежность соответствующему классу [Гвишиани и др., 1988].

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В алгоритме «Барьер», также как и в используемых в ЕРА алгоритмах дихотомии [Гвишиани и др., 1988], в качестве объектов распознавания могут рассматриваться дизъюнктивные узлы, пересечения морфоструктурных линеаментов, узлы равномерной сетки и т. д. [Alekseevskaya et al., 1977].

Выбор пересечений морфоструктурных линеаментов как объектов распознавания основан на их глубокой тектонической связи с сильными землетрясениями. Такая связь была отмечена уже в работе [Гельфанд и др., 1972] при проведении распознавания в регионах Памир и Тянь-Шань. В последствии приуроченность эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов была подтверждена и статистически [Гвишиани, Соловьев, 1981].

В работе [Горшков и др., 2018] была построена схема морфоструктурного районирования

(МСР) региона Алтай-Саяны-Прибайкалье (рис. 1). На ней выделено 97 пересечений морфоструктурных линеаментов трех рангов.

МСР было выполнено А.И. Горшковым по классической методике, формализованной в работе [Alekseevskaya et al., 1977]. Линеаменты I ранга отделяют друг от друга основные морфоструктурные единицы – горные страны или представляют собой мощные трансформные разломы. Линеаменты II ранга делят горные страны на мегаблоки и часто трассируются сейсмогенными разломами и другими линейными структурами. Линеаменты III ранга осуществляют дальнейшее, более детальное деление изучаемого региона на блоки.

Более чем 40-летний опыт использования МСР в задачах ЕРА в самых разных сейсмоактивных регионах земного шара при различных пороговых магнитудах показал отсутствие априорных предпочтений для отнесения к высокосейсмичным пересечениям линеаментов высших рангов. Таким образом, все 97 пересечений линеаментов априорно равноценны и в нашей задаче множество объектов W – однородно.

С другой стороны, а posteriori, ранг линеаментов, представленных на рис. 1, может оказаться одной из существенных характеристик $\pi \in \Pi$.

Ранее в работе [Горшков и др., 2018] методом ЕРА с помощью алгоритма «Кора-3» было выполнено независимое от настоящего исследования распознавание мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай-Саяны-Прибайкалье.

Как в алгоритме «Кора-3» [Горшков и др., 2018], так и в настоящем исследовании с помощью «Барьер-3», обучающая выборка

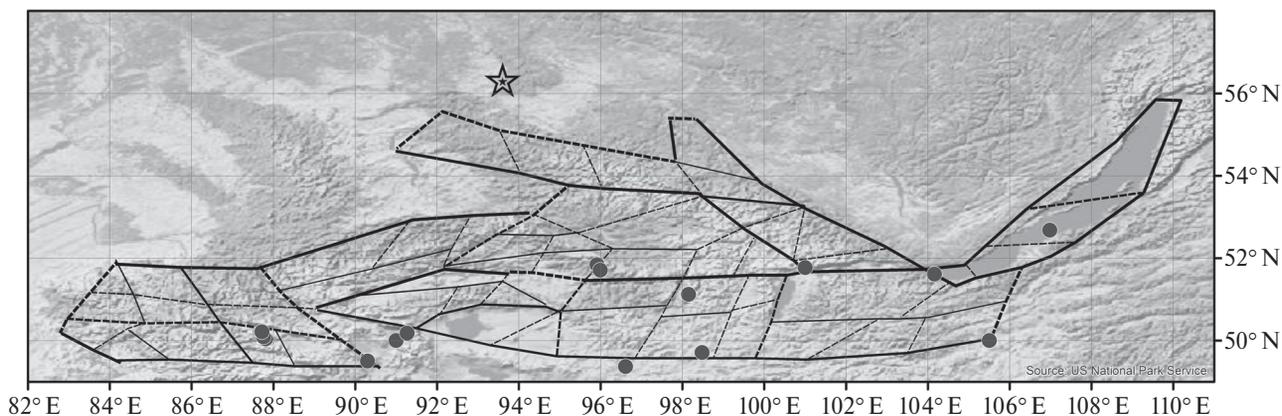


Рис. 1. Схема морфоструктурного районирования региона Алтай-Саяны-Прибайкалье и эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$. Толстые линии – линеаменты первого ранга, средние – второго ранга, тонкие – третьего ранга [Горшков и др., 2018]. Звездой показано расположение Нижне-Канского гранитоидного массива (участок Енисейский).

высокосейсмичного класса формировалась на основе каталогов землетрясений [Кондорская и др., 1993; Новый..., 1977; Горшков и др., 2018; NEIC] исследуемого региона с $M \geq 6.0$ с 1900 г. по настоящее время. Был выполнен анализ приуроченности эпицентров землетрясений с $M \geq 6.0$ к пересечениям морфоструктурных линеаментов [Горшков и др., 2018], который показал, что в рассматриваемом регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье эпицентры землетрясений с $M \geq 6.0$ расположены в достаточно малых окрестностях пересечений линеаментов. В итоге, в обоих алгоритмах в качестве обучающей выборки высокосейсмичного класса были отобраны 16 пересечений осей морфоструктурных линеаментов, в 50 км окрестности которых известны эпицентры коровых землетрясений с $M \geq 6.0$.

В алгоритме «Кора-3» обучающая выборка низкоейсмичного класса была составлена из 51 объекта распознавания, в 50 км окрестности которых не известны эпицентры землетрясений с $M \geq 5.0$. Остальные 30 объектов распознавания составили материал экзамена алгоритма «Кора-3» [Горшков и др., 2018].

Распознавание в задаче ЕРА выполняется на базе векторного представления объектов в пространстве геолого-геофизических характеристик. Эти характеристики должны быть априорно связаны с возможностью охарактеризовать с их помощью места высокой сейсмичности. Используемые геолого-геофизические характеристики, как правило, отражают контрастность и интенсивность новейших тектонических движений, степень тектонической раздробленности окрестностей пересечений, глубинную неоднородность и др.

Опыт исследований многочисленных регионов методом ЕРА сформировал список информативных геолого-геофизических характеристик. Это максимальная и минимальная высоты, их градиент и размах; сочетание типов рельефа; площадь рыхлых толщ; максимальное и минимальное значения аномалии Буге, их размах и среднее значение; аномалия в свободном воздухе; максимальное и минимальное значения литосферной магнитной аномалии и их размах; высший ранг линеамента и число линеаментов в пересечении и в круге; минимальное расстояние до линеаментов первого и второго ранга [Гвишиани и др., 1988; Соловьев и др., 2016], а так же некоторые другие характеристики, связанные с перечисленными. Таким образом, объект распознавания можно трактовать

двойко – как морфоструктурный узел или точку пересечения осей линеаментов, или как вектор, каждая компонента которого соответствует значению одной из используемых геолого-геофизических характеристик для данного объекта.

Настоящая статья является одной из первых работ, в которых для описания объектов используются значения литосферных магнитных аномалий в окрестности объекта. Впервые их существенная информативность для распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений была показана в работе [Соловьев и др., 2016]. Полученные здесь результаты распознавания алгоритмом «Барьер-3» подтверждают важность использования литосферных магнитных аномалий, хотя и не в такой мере как в работе [Соловьев и др., 2016].

Перед использованием той или иной геолого-геофизической характеристики необходимо предварительно убедиться в ее информативности в контексте решаемой задачи распознавания, т. е. оценить возможность отделить по этой единственной характеристике высокосейсмичные объекты от низкоейсмичных. В работе [Соловьев и др., 2016] приводится описание методики такой оценки для случая с двумя классами обучения: B_0 и H_0 .

Оценка осуществляется следующим образом. Интервал изменения геолого-геофизической характеристики делится на сегменты (2 или 3) так, чтобы количество объектов распознавания в каждом сегменте было одинаковым. Затем вычисляется процент объектов из B_0 и H_0 в каждом из сегментов. Показателем информативности P рассматриваемой геолого-геофизической характеристики для разделения объектов распознавания на два класса является максимум модулей разностей этих процентов по всем сегментам. В работах по распознаванию методом ЕРА, как правило, характеристика считалась информативной если $P \geq 15\%$.

В настоящей работе этот прием оценки информативности модифицируется на случай одного класса обучения. Для каждой из характеристик $\pi \in \Pi$ в качестве B_0 выделены 16 объектов распознавания. В силу отсутствия в алгоритме «Барьер» низкоейсмичного класса обучения в качестве второго множества оценки информативности π взято множество W/B_0 всех объектов, не вошедших в B_0 . Таким образом, разбиение осуществляется на два сегмента. В качестве информативных характеристик берутся те, для которых $P \geq 10\%$.

Исходный перечень характеристик объектов распознавания, измеренных в круге радиусом 25 км

Максимальная высота в круге	H_{\max}
Минимальная высота в круге	H_{\min}
Размах высот	$dH = H_{\max} - H_{\min}$
Расстояние между точками, в которых вычислены H_{\max} и H_{\min}	l
Градиент высот	dH/l
Сочетание типов рельефа	Top
Площадь четвертичных пород	Q
Высший ранг линеамента	HR
Число линеаментов в пересечении	NL
Расстояние до ближайшего пересечения	R_{int}
Число линеаментов в круге	NLC
Расстояние до ближайшего линеамента I ранга	$R1$
Расстояние до ближайшего линеамента II ранга	$R2$
Максимальное значение аномалии Буге в круге	B_{\max}
Минимальное значение аномалии Буге в круге	B_{\min}
Размах значений аномалий Буге	$dB = B_{\max} - B_{\min}$
Максимальное значение магнитной аномалии в круге	MO_{\max}
Минимальное значение магнитной аномалии в круге	MO_{\min}
Размах значений магнитных аномалий	$MO_{\text{dif}} = MO_{\max} - MO_{\min}$

Исходный перечень характеристик объектов распознавания приведен в таблице. По итогам оценки информативности характеристик для распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай – Саяны – Прибайкалье алгоритмами «Кора-3» [Горшков и др., 2018] и «Барьер-3» были независимо отобраны 9 характеристик $\pi \in \Pi$ (выделены в таблице жирным шрифтом), которые использовались при распознавании обоими алгоритмами.

Для воспроизводимости результата и усиления его достоверности значения характеристик объектов распознавания были вычислены в автоматическом режиме с помощью интеллектуальной ГИС [Соловьев и др., 2018 а; Nikolov et al., 2015]. Радиус окрестности объектов $w \in W$, где вычисляются характеристики, зависит от магнитуды распознаваемых землетрясений [Гвишиани и др., 1988; Соловьев и др., 2014]. При распознавании в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье брались круги радиусом 25 км.

РАСПОЗНАВАНИЕ ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ ЗОН ($M \geq 6.0$) В РЕГИОНЕ АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЕ

Результаты распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, полученные с помощью алгоритма «Барьер-3», показаны эллипсами на рис. 2.

По итогам распознавания со значениями свободных параметров $s = -1.8$ и $q = 6$ (см. формулы (4) и (6)) 32 объекта из рассматриваемых 97 были отнесены к высокосейсмичному классу (рис. 2). Совокупность этих 32-х объектов интерпретируется нами, согласно постулату метода ЕРА как определяющая зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье.

Из рассмотрения модуля распознавания алгоритмом «Барьер-3» как блока ЕРА [Гвишиани и др., 1988] следует, что собственно искомые зоны есть объединение кругов радиусом 25 км с центрами в соответственных точках

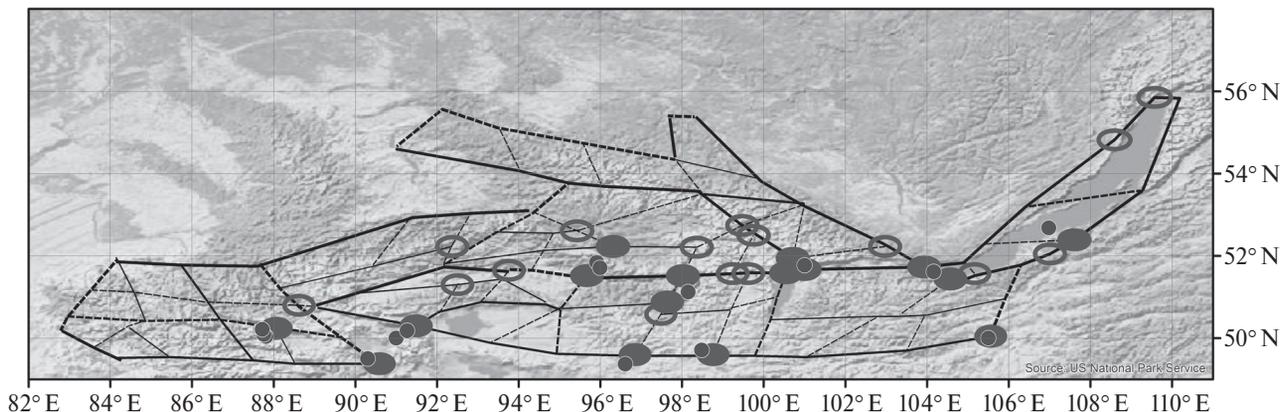


Рис. 2. Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, распознанные алгоритмом «Барьер-3». Сплошными черными эллипсами показано множество обучения единственного высокосейсмичного класса.

32 пересечений осей линеаментов (рис. 2). Заметим, что помимо 16 объектов распознавания, входящих в обучающую выборку и объявленных тем самым а priori высокосейсмичными (на рис. 2 показаны сплошными черными эллипсами), 16 новых объектов экзамена из 81 были распознаны как высокосейсмичные.

На рис. 3а представлена гистограмма, характеризующая средний вклад 9-ти геолого-геофизических характеристик в распознавание алгоритмом «Барьер-3» искомого высокосейсмичного множества объектов. На рис. 3б показан и их вклад, выраженный через попадание в рейтинги Топ 3. По оси ординат на рис. 3а показано среднее количество срабатываний геолого-геофизических характеристик при распознавании искомого высокосейсмичного множества $P_{II}(B_0)$

(см. выше), на рис. 3б – количество попаданий характеристик в тройки «сильнейших» (рейтинг Топ 3) характеристик.

Из гистограмм видно, что для распознавания высокосейсмичных зон алгоритмом «Барьер-3» наиболее значимыми геолого-геофизическими характеристиками объектов распознавания являются характеристики, отражающие гравитационные аномалии (B_{\max} , B_{\min} и dB), градиент рельефа (dH/l) и сочетание типов рельефа (Топ).

На фоне всего множества объектов распознавания пересечения линеаментов, распознанные как высокосейсмичные для $M \geq 6.0$, характеризуются низкими значениями гравитационных аномалий (в большинстве случаев $B_{\max} \leq -150$ мГал и $B_{\min} \leq -200$ мГал), dB концентрируется вокруг

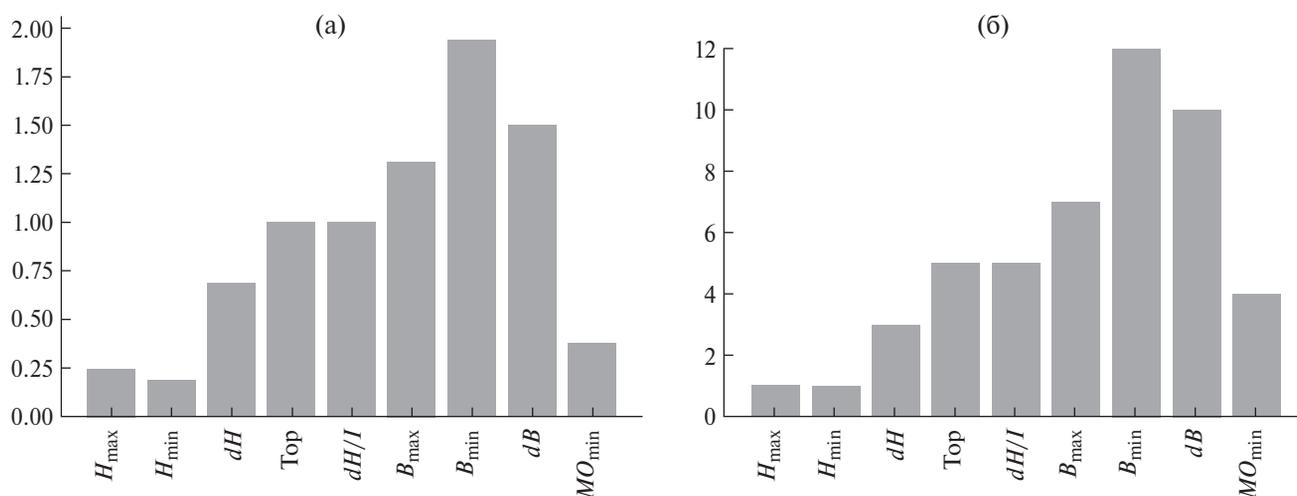


Рис. 3. Распознавание высокосейсмичных зон ($M \geq 6.0$) алгоритмом «Барьер-3»: (а) – средний вклад 9-ти наиболее информативных характеристик в формирование искомого высокосейсмичного множества объектов распознавания; (б) – вклад 9-ти характеристик, выраженный через их попадание в рейтинги Топ 3.

60 мГал и 120 мГал. Для них характерны высокие значения градиента рельефа dH/l . Эти характеристики являются определяющими как с точки зрения их среднего вклада в распознавание сейсмоопасных районов (рис. 3а), так и с точки зрения попадания в рейтинги Топ 3 «сильнейших» характеристик распознанных пересечений линейментов (рис. 3б).

Из рис. 3б видно, что и литосферные аномалии магнитного поля вносят заметный вклад в искомый результат распознавания. Тем самым можно заключить, что окрестности высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линейментов на Алтае, в Саянах и Прибайкалье характеризуются высокой степенью тектонической раздробленности, наличием плотностных глубинных неоднородностей, а также специфическим строением и составом земной коры. Эти признаки естественно трактовать как критерии высокой сейсмичности в изучаемом регионе.

СРАВНЕНИЕ КЛАССИФИКАЦИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ АЛГОРИТМАМИ «БАРЬЕР-3» И «КОРА-3»

Как уже отмечалось, результаты распознавания алгоритмом «Кора-3» мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье опубликованы в работе [Горшков и др., 2018]. На рис. 4 представлен результат распознавания алгоритмом «Кора-3».

С помощью применения сформированных алгоритмом решающих правил [Соловьев и др., 2014; Горшков и др., 2018] все 16 объектов обучения высокосейсмичного класса были распознаны как высокосейсмичные. Заметим,

что в отличие от алгоритма «Барьер-3» в алгоритме «Кора-3» это не гарантировано и говорит в пользу достоверности распознавания. Кроме того, к высокосейсмичным объектам отнесено 3 объекта из обучающей выборки низкосейсмичного класса и 14 объектов, которые составили материал экзамена. Тридцать три пересечения линейментов (34 % от общего числа объектов), распознанные как высокосейсмичные [Горшков и др., 2018], показаны на рис. 4 эллипсами белого цвета.

Геолого-геофизические признаки объектов распознавания, вошедшие в сформированные алгоритмом «Кора-3» решающие правила для высоко- и низкосейсмичных классов объектов, говорят о повышенной контрастности новейших тектонических движений и усиленной тектонической раздробленности высокосейсмичных пересечений морфоструктурных линейментов в изучаемом регионе.

На рис. 5 показано сравнение результатов распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Пересечения осей морфоструктурных линейментов, распознанных алгоритмом «Барьер-3» как опасные для $M \geq 6.0$, обозначены пустыми эллипсами с темными границами, алгоритмом «Кора-3» – белыми эллипсами, а обоими алгоритмами – белыми эллипсами с темными границами.

Из рис. 5 следует, что алгоритм «Барьер-3» распознал как высокосейсмичные 32 пересечения, а «Кора-3» – 33. При этом 23 объекта распознавания отнесены к высокосейсмичному классу обоими алгоритмами. Заметим также, что оба алгоритма распознали как высокосейсмичные все объекты из обучающей выборки

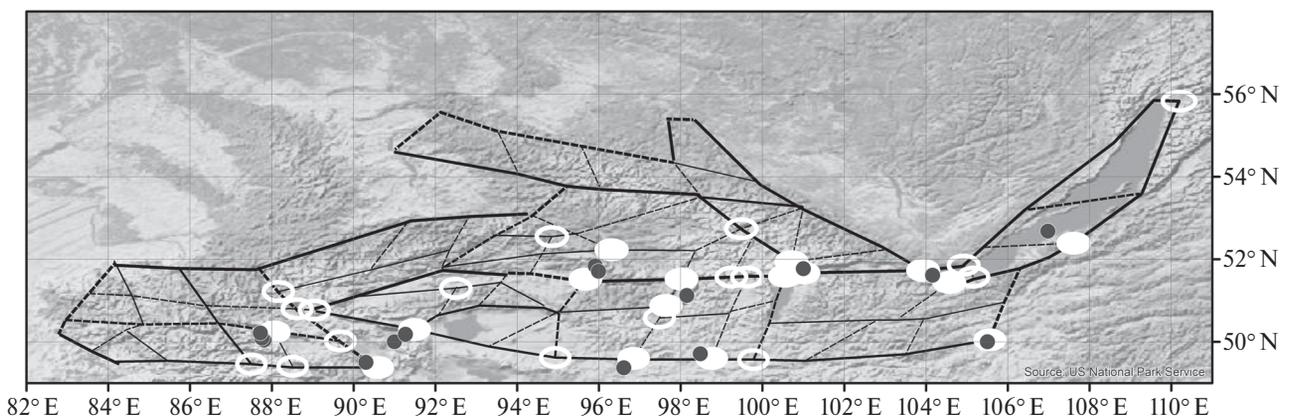


Рис. 4. Зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, распознанные алгоритмом «Кора-3». Сплошными белыми эллипсами показано множество обучения высокосейсмичного класса.

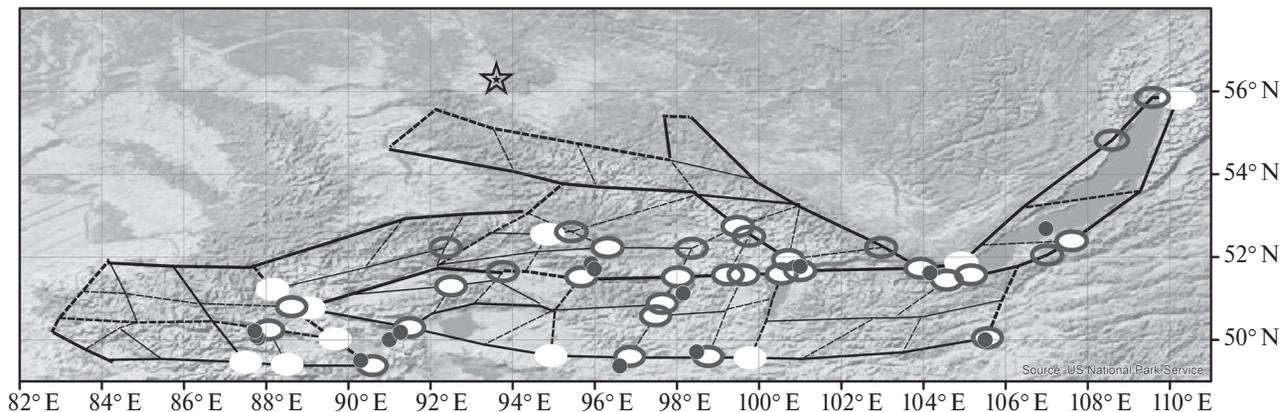


Рис. 5. Сравнение результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, полученных алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3». Звездой отмечено положение Нижне-Канского массива.

этого класса (для «Барьера-3» это очевидно из его конструкции). Оба алгоритма классифицировали как сейсмоопасные 3 из 51 объекта обучающей выборки низкосейсмического класса алгоритма «Кора-3». При этом один из них отнесен к опасным обоими алгоритмами.

Следовательно 46 объектов обучения низкосейсмического класса оба алгоритма распознали как неопасные для магнитуды $M \geq 6.0$. Это означает, что почти все различия в классификации алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» приходится на множество объектов распознавания, изначально не отнесенным к обучающим выборкам и составившим экзамен алгоритма «Кора-3» (15 объектов классифицированы одинаково обоими алгоритмами и 15 – различно).

Из рис. 2, рис. 3 и рис. 5 видно, что значимые различия в классификации объектов распознавания, не входящих в обучение V_0 , наблюдаются в Чуйской степи и предгорьях Курайского и Чулышманского хребтов на Восточном Алтае. Здесь «Кора-3» распознал на 5 пересечений линеаментов больше, чем «Барьер-3». В западной части Западных Саян в районе Тувинской котловины и Куртушибинского хребта больше опасных пересечений, распознанных «Барьером-3». Различия также наблюдаются на юге рассматриваемого региона в районе хребта Хан-Хухэй и разлома 1905 г., а также на юге и севере озера Байкал. На Окинском плоскогорье, ограниченном Окинским хребтом и южной частью Восточных Саян, обоими алгоритмами получены результаты почти одинаковой классификации.

Из рис. 3 и работы [Горшков и др., 2018] можно заключить, что критерии высокой сейсмичности, выявленные алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3», достаточно хорошо согласуются.

В обоих случаях они говорят о наличии сложной структуры разрывных нарушений вблизи пересечений линеаментов, а также об общей высокой интенсивности тектонических движений.

ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫЕ ЗОНЫ АЛТАЙ–САЯНЫ–ПРИБАЙКАЛЬЯ И НИЖНЕ-КАНСКИЙ МАССИВ

Сохранность изоляционных свойств пород при захоронении высокоактивных радиоактивных отходов определяется структурно-тектонической нарушенностью (разломы, крупные трещины) и кинематикой структурно-тектонических блоков (тектонический крип и сейсмическое воздействие), включающих в себя объекты захоронения.

Международный опыт выбора мест для захоронения РАО основан на поиске в достаточно тектонически стабильных геологических районах наименее нарушенного структурно-тектонического блока. Нижне-Канский массив относится к зоне активного орогенеза, т. е. процесс его формирования как горного сооружения еще не закончен. За длительный период радиобиологической опасности РАО (превышающий 10 тыс. лет) геодинамические процессы способны кардинально изменить гидрогеологический режим в различных частях этого массива, включая уровень подземных вод, напор водоносных горизонтов, образование новых и раскрытие старых каналов инфильтрации флюидов и т. д. Наибольшую угрозу при этом представляет возможная тектоническая деструкция структурно-тектонических блоков, которые находятся в поле нелинейно изменяющихся тектонических сил и удаленного сейсмического воздействия. Последние

создают вероятность появления новых тектонических разломов или активизации «пассивных». Это, в свою очередь, может вызвать проникновение подземных вод к контейнерам с РАО и последующий вынос радионуклидов в окружающую среду [Morozov, Tatarinov, 2006].

Создание крупномасштабного подземного сооружения с размерами около $1.5 \times 1.0 \times 0.5$ км и его эксплуатация в течение длительного периода времени требует системного анализа как выбора места его расположения [Гвишиани и др., 2019] так и возможных катастрофических последствий, в том числе и от удаленных землетрясений. Наложение глобального поля тектонических напряжений на структурную нарушенность кристаллического фундамента определяет локальные сеймотектонические условия в структурно-тектоническом блоке (СТБ), включающем пункт глубинного захоронения РАО (ПГЗРО). Известно, что наличие тектонических разломов при условии внешнего силового воздействия приводит к формированию высокоградиентных полей напряжений, которые могут инициировать возникновение новых тектонических разрывов. Последнее может представлять существенную опасность для ПГЗРО.

Разрыв, расположенный в приконтурной части ПГЗРО, может стать сейсмогенерирующим (горно-тектонический удар, слабое землетрясение с $K = 2 \div 3$) и привести к его разрушению. В связи с этим можно допустить возможность образования разрыва, пересекающего горные выработки ПГЗРО [Андерсон и др., 2011]. Сейсмический эффект такого микроземлетрясения с гипоцентром в ближней зоне ПГЗРО приведет к потере изоляционных свойств инженерных барьеров и СТБ в целом. Кроме этого, слабые землетрясения (при расположении гипоцентров в непосредственной близости от контура подземного сооружения) могут инициировать динамические проявления горного давления в приконтурных зонах шахтных стволов и горизонтальных выработок в виде шелушения, стрелания и собственно горных ударов.

Анализ результатов, полученных с помощью алгоритмов «Барьер-3» и «Кора-3», в этой связи показал следующее. Места возможного возникновения землетрясения с $M \geq 6.0$, приуроченные к пересечениям линеаментов Алтае-Саянского орогенного пояса, находятся на расстоянии более 275–300 км (рис. 5) от ПГЗРО. Если воспользоваться традиционной формулой связи интенсивности сотрясений I с магнитудой M и эпи-

центральным расстоянием R землетрясения [Шебалин, 1997]:

$$I = 1.5 M - 3.5 \lg R + 3.0,$$

то для магнитуды $M = 8.0$ при удалении от эпицентра на $R = 250\text{--}300$ км можно получить оценку I не выше 7 баллов. При этом наиболее сильное землетрясение в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье оценивается магнитудой $M = 8.3$. Заметим, что эпицентры всех четырех известных землетрясений с $M \geq 7.0$ расположены на самом юге рассматриваемого региона. При этом 3 из них произошли в 1905 г. и 1938 г. и их магнитуды могут быть завышенными.

Согласно карте сейсмического районирования РФ ОСР-97-D (В.И. Уломов) [Комплект карт..., 2000; Сейсмическое районирование..., 2000] район исследований площадки ПГЗРО относится к границе возможных 7–8 балльных сотрясений, повторяющихся здесь в среднем один раз в 10 000 лет. Это соответствует среднегодовому риску 10^{-4} , приемлемому, согласно требованиям МАГАТЭ, для данного типа объектов.

Таким образом, проведенное распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье, полученное методом ЕРА с варьированием блоков классификации «Барьер-3» и «Кора-3», подтверждает достоверность существующей официальной оценки сейсмической опасности Нижне-Канского массива [Комплект карт..., 2000; Сейсмическое районирование..., 2000]. Землетрясения в изученном в этой статье регионе не могут привести к разрушению вмещающего ПГЗРО структурно-тектонического блока. Возможное силовое воздействие на него от этих землетрясений не превышает величины, указанной на картах общего сейсмического районирования РФ.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Алгоритм «Барьер» [Гвишиани и др., 2017] хорошо зарекомендовал себя при распознавании мест возможного возникновения землетрясений с одним классом обучения на Кавказе ($M \geq 6.0$). Настоящая работа демонстрирует, что алгоритм «Барьер» и его модификация «Барьер-3» работают и в случае распознавания зон повышенной сейсмичности ($M \geq 6.0$) в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье. Этот факт укрепляет предположения авторов о том, что распознавание мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений только по одному чистому классу адекватно постановке

проблемы ЕРА. Таким образом, в методике ЕРА возможно варьирование блока распознавания образов, по крайней мере, для двух сейсмоопасных регионов Кавказа и Алтай–Саяны–Прибайкалье (рис. 6).

В связи с этим, прежде всего, возникает вопрос является ли схема на рис. 6 универсальной, т. е. применима ли во всех регионах и для всех порогов M_0 , где успешно работал метод ЕРА («Кора-3»)? Сегодня мы получили на него положительный ответ лишь в двух сейсмоактивных регионах для $M_0 = 6.0$. Вообще говоря, это не может гарантировать универсальности варьирования блока распознавания образов для других регионов, где было успешно выполнено распознавание ЕРА («Кора-3»).

Для дальнейшего продвижения в этом направлении необходимо существенное развитие универсальной ГИС-базы данных по решениям методами ЕРА («Кора-3»), ЕРА («Барьер-3»), FCAZ [Гвишиани и др., 2016; 2018; Дзебоев и др., 2018] задач распознавания мест возможного возникновения сильнейших, сильных и значительных землетрясений в различных регионах мира. Такой проект сегодня успешно развивается в ГЦ РАН [Соловьев и др., 2018 б].

Убирая из процесса распознавания этап обучения по потенциально «грязному», содержащему ошибки низкосейсмичному классу, алгоритм «Барьер» в своей оригинальной версии, тем не менее, уступает алгоритму «Кора-3», т. к. первый не выявляет геолого-геофизических

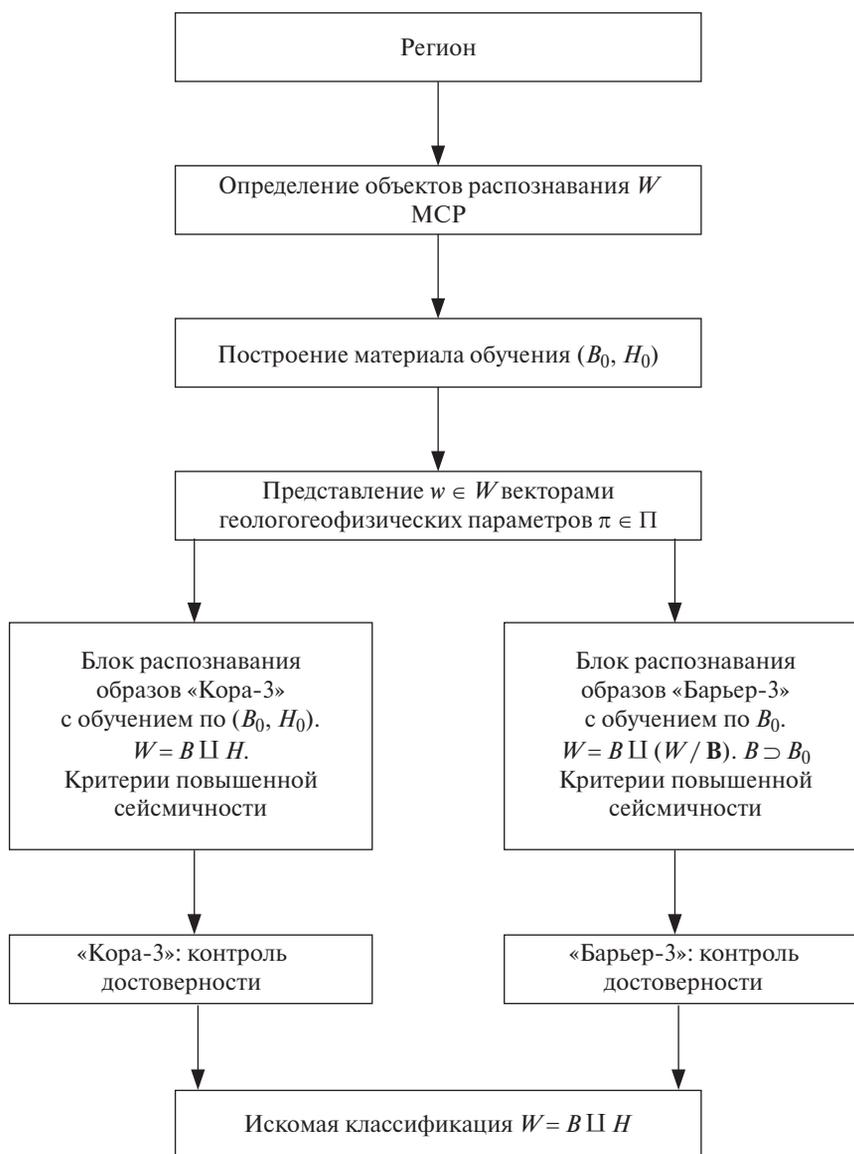


Рис. 6. Вариация блока распознавания образов «Кора-3» ↔ «Барьер-3» в методе ЕРА.

характеристик высокой сейсмичности. Этот недостаток устранен авторами в новой версии алгоритма «Барьер-3». Последний, обучаясь по одному высокосейсмичному классу, распознает геолого-геофизические критерии высокой сейсмичности. Заметим, что в отличие от «Коры-3» алгоритмы «Барьер» и «Барьер-3» оперируют геолого-геофизическими характеристиками в виде вещественных чисел.

Заметим, что выполненное независимое распознавание алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» делают их контрольными экспериментами друг для друга. В силу достаточной близости результатов эти контрольные эксперименты следует признать удачными. Это повышает оценку достоверности как результата ЕРА («Кора-3»), так и ЕРА («Барьер-3»).

Оба алгоритма одинаково классифицировали 97% объектов распознавания из числа входящих в обучающие выборки алгоритма «Кора-3». Фактически все различия в классификации пересечений линеаментов приходятся на объекты, которые изначально не были отнесены к обучающим выборкам.

Одним из возможных вариантов интерпретации совместного результата распознавания алгоритмами «Барьер-3» и «Кора-3» может быть его определение как нечеткого множества $\{W, \mu_{B_B, B_K}\}$ пересечений линеаментов, в окрестности которых возможны землетрясения с $M \geq 6.0$ в рассматриваемом регионе. Тогда функция принадлежности такого множества будет иметь следующий вид:

$$\mu_{B_B, B_K}(w) = \begin{cases} 1, & w \in B_B \cap B_K \\ 0.5, & w \in B_B \Delta B_K = (B_B \cup B_K) \setminus (B_B \cap B_K) \\ 0, & w \notin B_B \cup B_K \end{cases}$$

где $w \in W$, а B_B, B_K – пересечения линеаментов, распознанные «Барьером-3» и «Корой-3», соответственно.

В приложении к проблеме обеспечения геологической безопасности захоронения высокоактивных радиоактивных отходов в пределах Нижне-Канского массива можно сделать вывод о том, что зоны возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.0$ в регионе Алтай–Саяны–Прибайкалье находятся на таком расстоянии от пункта глубинного захоронения РАО, что не могут оказать существенного влияния на устойчивость и безопасность объекта.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность главному научному сотруднику ИТПЗ РАН, член.-корр. РАН Ал.Ан. Соловьеву и докт. физ.-мат. наук А.И. Горшкову за предоставленные данные о схеме морфоструктурного районирования изучаемого региона, вед. науч. сотр. ГЦ РАН Н.А. Сергеевой за помощь в описании геологической и тектонической характеристики изучаемого региона.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках гранта Российского научного фонда № 18-17-00241 «Исследование устойчивости породных массивов на основе системного анализа геодинамических процессов для геологически безопасной подземной изоляции радиоактивных отходов».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Андерсон Е.Б., Белов С.В., Камнев Е.Н., Колесников И.Ю., Лобанов Н.Ф., Морозов В.Н., Татаринов В.Н. Подземная изоляция радиоактивных отходов. М.: изд-во «Горная книга». 2011. 592 с.
- Буслов М.М., Джен Х., Травин А.В., Отгонбаатар Д., Куликова А.В., Чен Минг, Глори С., Семаков Н.Н., Рубанова Е.С., Абылдаева М.А., Войтишек Е.Э., Трофимова Д.А. Тектоника и геодинамика Горного Алтая и сопредельных структур Алтае-Саянской складчатой области // Геология и геофизика. 2013. Т. 54. № 10. С. 1600–1627.
- Гвишиани А.Д., Соловьев Ал.А. О приуроченности эпицентров сильных землетрясений к пересечениям морфоструктурных линеаментов на территории Южной Америки. Вычислительная сейсмология. Вып. 13. Методы и алгоритмы интерпретации сейсмологических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. 1981. С. 46–50.
- 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., Горшков А.И., Раницман Е.Я., Систернас А., Соловьев Ал.Ан. Прогнозирование мест землетрясений в регионах умеренной сейсмичности. М.: Наука. 1988. 176 с.
- Гвишиани А.Д., Гурвич В.А. Динамические задачи классификации и выпуклое программирование в приложениях. М.: Наука. 1992. 360 с.
- Гвишиани А.Д., Белов С.В., Агаян С.М., Родкин М.В., Морозов В.Н., Татаринов В.Н., Богоутдинов Ш.Р. Методы искусственного интеллекта при оценке тектонической стабильности Нижнеканского массива // Инженерная экология. 2008. № 2. С. 3–14.

- 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. DOI: 10.7868/S0002333716040013
- Гвишиани А.Д., Агаян С.М., Дзобоев Б.А., Белов И.О.* Распознавание мест возможного возникновения эпицентров сильных землетрясений с одним классом обучения // *Докл. РАН*. 2017. Т. 474. № 1. С. 86–92. DOI: 10.7868/S0869565217130175
- Гвишиани А.Д., Дзобоев 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. DOI: 10.7868/S000233371803002 X
- Гвишиани А.Д., Кафтан В.И., Красноперов Р.И., Татаринцов В.Н., Вавилин Е.В.* Геоинформатика и системный анализ в геофизике и геодинамике // *Физика Земли*. 2019. № 1. С. 1–10.
- 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. Вычислительная сейсмология. Вып. 6. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. 1973. С. 107–133.
- 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. Вычислительная сейсмология. Вып. 7. Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Под ред. Кейлис-Борока В.И. М. 1974. С. 41–64.
- 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. DOI: 10.7868/S0869565218090219
- Дзобоев Б.А., Агаян С.М., Жарких Ю.И., Красноперов Р.И., Барыкина Ю.В.* Зоны возможного возникновения эпицентров сильнейших землетрясений Камчатки // *Физика Земли*. 2018. № 2. С. 96–103. DOI: 10.7868/S0002333718020084
- Десяткин Е.В.* Внутренняя Азия. В кн.: *Новейшая тектоника, геодинамика и сейсмичность Северной Евразии* / Ред. А.Ф. Грачев. М.: изд-во «Пробел». 2000. С. 92–100.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Филина А.Г., Лескова Е.В.* Пространственно-временные особенности сейсмичности Алтае-Саянской складчатой зоны // *Физическая механика*. 2005. Т. 8. № 1. С. 49–64.
- Землетрясения Северной Евразии*. 2004. Обнинск: ГС РАН. 2010. С. 9.
- Иогансон Л.И.* Живая сдвиговая тектоника при алтайском землетрясении 27 сентября 2003 г. // *Геофизические исследования*. 2005. № 2. С. 116–123.
- Комплект карт Общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1:8 000 000. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоопасных районах. М., 1999. 57 с. Карта на 4-х листах / Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. М.: Роскартография. 2000.
- Кондорская Н.В., Горбунова И.В., Киреев И.А., Вандышева Н.В.* О составлении унифицированного каталога сильных землетрясений Северной Евразии по инструментальным данным (1901–1990). Сейсмичность и сейсмическое районирование Северной Евразии. М.: ИФЗ. 1993. Вып. 1. С. 70–79.
- Лукина Н.В.* Активные разломы и сейсмичность Алтая // *Геология и геофизика*. 1996. Т. 37. № 11. С. 71–74.
- Милановский Е.Е.* Геология России и ближнего зарубежья (Северная Евразия). М.: изд-во МГУ. 1996. С. 162–172.
- Морозов В.Н., Колесников И.Ю., Белов С.В., Татаринцов В.Н.* Напряженно-деформированное состояние Нижнеканского массива – района возможного захоронения радиоактивных отходов // *Геоэкология*. 2008. № 3. С. 232–243.
- Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР. М.: Наука. 1977. 536 с.
- Овсюченко А.Н., Трофименко С.В., Мараханов А.В., Карасев П.С., Рогожин Е.А.* Сеймотектоника переходной области от байкальской рифтовой зоны к орогенному поднятию станового хребта // *Геотектоника*. 2010. № 1. С. 29–51.
- Ребецкий Ю.Л., Кучай О.А., Маринин А.В.* Напряженное состояние и деформации земной коры Алтае-Саянской горной области // *Геология и геофизика*. 2013. Т. 54. № 2. С. 271–291.
- Рогожин Е.А., Платонова С.Г.* Очаговые зоны сильных землетрясений горного Алтая в голоцене. М.: ОИФЗ РАН. 2002. 130 с.
- Рогожин Е.А.* Очерки региональной сеймотектоники / отв. ред. А.О. Глико. М.: ИФЗ РАН. 2012. 340 с.
- Рогожин Е.А., Овсюченко А.Н., Мараханов А.В., Новиков С.С., Ларьков А.С.* Геологические проявления Тувинских землетрясений 2011–2012 гг. // *Докл. РАН*. 2015. Т. 463. № 2. С. 216–220.
- Сейсмическое районирование территории Российской Федерации – ОСР-97. Карта на 4-х листах / Гл. ред. В.Н. Страхов, В.И. Уломов. ОИФЗ РАН. М.: НПП «Текарт». 2000.
- Соловьев Ал.Ан., 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. DOI: 10.7868/S0002333714020112
- Соловьев Ал.Ан., Горшков А.И., Соловьев Ал.Ал.* Применение данных по литосферным магнитным аномалиям

в задаче распознавания мест возможного возникновения землетрясений // *Физика Земли*. 2016. № 6. С. 21–27. DOI: 10.7868/S0002333716050148

Соловьев Ан.Ал., Красноперов Р.И., Николов Б.П., Жарких Ю.И., Агаян С.М. Веб-ориентированный программный комплекс для анализа пространственных геофизических данных методами геоинформатики // *Исследование Земли из космоса*. 2018 а. № 2. С. 65–76. DOI: 10.7868/S0205961418020070

Соловьев Ан.Ал., Соловьев Ал.Ан., 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 б. № 5. С. 10–20.

Шебалин Н.В. Сильные землетрясения. Избранные труды. М.: изд-во Академии горных наук. 1997. 542 с.

Alekseevskaya M., Gabrielov A., Gelfand I., Gvishiani A., Rantsman E. Formal morphostructural zoning of mountain territories // *Geophysics*. 1977. V. 42 (2). P. 227–233.

Dorbath C., Van der Woerd J., Arefiev S.S., Rogozhin E.A., Aptekman J.Y. Geological and seismological field observations in the epicentral region of the 27 September 2003 MW 7.2 Gorny Altay earthquake (Russia) // *Bulletin*

of the Seismological Society of America. 2008. V. 98. № 6. P. 2849–2865. DOI: 10.1785/0120080166

Dubois J., Gvishiani A. Dynamic systems and dynamic classification problems in geophysical applications. Paris: Springer-Verlag. 1998. 256 p.

Gvishiani A., Dubois J. Artificial intelligence and dynamic systems for geophysical applications. Springer-Verlag. Paris. 2002. 350 p.

Morozov V.N., Tatarinov V.N. Tectonic processes development with time in the areas of HLW disposal from expert assessment to prognosis // *International Journal of Nuclear Energy Science and Technology (IJNEST)*. 2006. V. 2. Is. 1/2. P. 65–74. DOI: 10.1504/IJNEST.2006.010648

Nikolov B.P., Zharkikh J.I., Soloviev An.A., Krasnoperov R.I., Agayan S.M. Integration of data mining methods for earth science data analysis in GIS environment // *Russian Journal of Earth Sciences*. 2015. V. 15. Is. 4. ES4004. DOI: 10.2205/2015 ES000559

Tatarinov V.N., Kaftan V.I., Seelev I.N. Study of the Present-Day Geodynamics of the Nizhnokansk Massif for Safe Disposal of Radioactive Wastes // *Atomic Energy*. 2017. V. 121. Is. 3. P. 203–207. DOI: 10.1007/s10512-017-0184-5

Strong-Earthquake-Prone Areas Recognition Based on an Algorithm with a Single Pure Training Class: I. Altai–Sayan–Baikal Region, $M \geq 6.0$

**B. A. Dzeboev^{a,c,*}, A. D. Gvishiani^{a,b}, I. O. Belov^a, S. M. Agayan^a,
V. N. Tatarinov^{a,b}, and Yu. V. Barykina^a**

^a*Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119296 Russia*

^b*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^c*Geophysical Institute, Vladikavkaz Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Vladikavkaz, 362002 Russia*

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

Received August 2, 2018

A new version of the Barrier algorithm is proposed for recognition of strong-earthquake prone regions based on training over a single reliable training class. The modification of the algorithm consists in creating blocks that reveal the geological–geophysical features (attributes) characteristic of the recognized highly seismic objects and provide their quantitative estimates. The recognition of the areas prone to earthquakes with $M \geq 6.0$ is carried out for the Altai–Sayan–Baikal region. The results of the recognition are used for assessing the effect of the remote earthquakes that occurred in the Altai–Sayan orogenic region on the stability of structural-tectonic crustal blocks in the contact zone of the West Siberian platform and the Siberian plate.

Keywords: earthquake-prone areas, pattern recognition, EPA method, Kora-3 (Cora-3, Crust-3) algorithm, Barrier-3 algorithm, earthquake epicenter, seismic hazard assessment, mountainous country