

УДК 550.34.06.013.22

РЕЗУЛЬТАТЫ ПРОГНОЗА СИЛЬНЕЙШИХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ 06.02.2023 г. В ЮЖНОЙ ТУРЦИИ

© 2024 г. А. И. Горшков^{1, *}, В. Г. Кособоков^{1, **}, О. В. Новикова^{1, ***}

¹Институт теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН, г. Москва, Россия

*E-mail: gorshkov@mitp.ru

**E-mail: volodya@mitp.ru

***E-mail: onovikov@mitp.ru

Поступила в редакцию 19.10.2023 г.

После доработки 30.11.2023 г.

Принята к публикации 05.12.2023 г.

06.02.2023 г. с интервалом в 9 часов произошло два разрушительных землетрясения на юге центральной Турции, сотрясения от которых охватили и значительную часть северо-западной Сирии. В работе рассмотрено местоположение эпицентров этих землетрясений по отношению к прогнозу мест землетрясений с $M \geq 6.5$ для территории Анатолии и смежных регионов, который был получен в 1973 г. И.М. Гельфандом, В.И. Кейлис-Бороком и их соавторами с помощью алгоритма распознавания образов Кора-3 на основе данных морфоструктурного районирования. Также представлены результаты заблаговременного определения периодов повышенной вероятности сильнейших землетрясений, полученные с помощью алгоритма среднесрочного прогноза землетрясений М8. Установлено, что эпицентры землетрясений 06.02.2023 г. произошли в узле, который в 1973 г. был определен как потенциально сейсмоопасный для $M \geq 6.5$, а оба события произошли в пределах пространственно-временной области тревоги, диагностированной алгоритмом М8 в июле 2021 года.

Ключевые слова: землетрясения 06.02.2023 г. в Турции и Сирии, распознавание образов, алгоритм Кора-3, алгоритм М8.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724030027>, **EDN:** APCYMZ

ВВЕДЕНИЕ

06.02.2023 г. в 01:17 UTC (4:17 по местному времени) на юге центральной Турции возник очаг землетрясения с магнитудой M_w 7.8, за которым через 9 часов на расстоянии 37 км к западу–северо-западу от первого последовал второй толчок с M_w 7.5. Геофизическая служба РАН определила для этих событий M_S 8.0 и 7.8, соответственно. Интенсивность сотрясений в эпицентральной зоне обоих событий достигала XII баллов по модифицированной шкале Меркалли (ММИ). Катастрофические разрушения распространились на обширные территории Турции и северо-западной части Сирии общей площадью около 350 000 км², в результате которых подтвержденное число погибших составило более 59 тысяч человек (50 783 – в Турции и 8476 – в Сирии). Экономический ущерб от этих землетрясений оценивается в 104 миллиарда долларов США в Турции и 14.8 миллиарда

долларов США в Сирии, что является четвертым по величине за всю историю землетрясений.

Землетрясения произошли на стыке Анатолийской, Африканской и Аравийской плит в зоне Восточно-Анатолийской системы разломов. Хотя в последнее столетие магнитуды более 6-ти в этом районе не наблюдались, по историческим данным эта область характеризуется высокой сейсмической активностью: в период XVI–XX вв. здесь выявлены события с магнитудами от 6.6 до 7.4 [Ambraseys, 1989]. Некоторые современные исследования также указывают на высокий сейсмический потенциал Восточно-Анатолийского разлома. В частности, для его отдельных сегментов авторы статьи [Aktug et al., 2016] по данным GPS выявили значительный дефицит скольжения (*slip deficit*), позволивший предположить возможность возникновения землетрясений с M_w 7.4–7.7.

Впервые прогноз мест землетрясений для территории Турции и смежных регионов в рамках

единой методологии был разработан группой советских исследователей под руководством И.М. Гельфанда и В.И. Кейлис-Борока [Гельфанд и др., 1973; 1974а; 1974б]. Прогноз основывался на гипотезе о связи сильных землетрясений с дизъюнктивными узлами, формирующимися в местах пересечения морфоструктурных линеаментов. Методом формализованного морфоструктурного районирования [Алексеевская и др., 1977; Ранцман, 1979] в пределах Балкан, Эгейского моря, Анатолии и Закавказья было определено местоположение узлов, образованных пересечениями морфоструктурных линеаментов. Было установлено, что инструментальные эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$, известные в регионе за период 1900 – 1974 гг. расположены вблизи некоторых узлов, обладающих характерными признаками. Целью исследования было определить возможность возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$ в остальных узлах региона, где такие события на тот момент времени были неизвестны. Задача была решена с помощью алгоритма распознавания образов Кора-3 [Бонгард, 1967], адаптированного для поиска критериев высокой сейсмичности [Гельфанд и др., 1972; 1973; Gelfand et al., 1976]. В результате в Анатолии и смежных регионах были определены потенциально высокосейсмичные узлы, в которых возможно возникновение землетрясений с магнитудой $M \geq 6.5$.

В данной работе мы (1) проверяем результаты, полученные в работах [Гельфанд и др., 1973; 1974а], сопоставляя местоположения землетрясений с $M \geq 6.5$, которые произошли после 1974 г., с распознанными высокосейсмичными узлами для этого магнитудного порога, и (2) демонстрируем оперативный среднесрочный прогноз сильнейших землетрясений на январь–июнь 2023 г., полученный в ходе глобального эксперимента, ведущегося в реальном времени с 1992 г. [Healy et al., 1992; Kossobokov, Shebalin, 2003; Кособоков, Щепалина, 2020; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021; Kossobokov, Soloviev, 2021] и реализовавшийся возникновением катастрофической последовательности землетрясений 06.02.2023 г. в Караманмараше, Турция.

ПРОВЕРКА РЕЗУЛЬТАТОВ РАСПОЗНАВАНИЯ ВЫСОКОСЕЙСМИЧНЫХ И НИЗКОСЕЙСМИЧНЫХ ОБЛАСТЕЙ В АНАТОЛИИ И СМЕЖНЫХ РЕГИОНАХ

В работах [Гельфанд и др., 1973; 1974а] получил развитие подход, который той же группой исследователей был впервые разработан и

применен для выделения высокосейсмичных узлов в пределах горно-складчатых областей Памира и Тянь-Шаня [Гельфанд и др., 1972]. Методология основана на применении алгоритмов распознавания образов к данным морфоструктурного районирования. Метод морфоструктурного районирования, акцентированный на анализе современного рельефа [Алексеевская и др., 1977; Ранцман, 1979] позволяет разделить исследуемую территорию на иерархическую систему блоков земной коры, разграниченных зонами морфоструктурных линеаментов, в местах пересечения которых формируются морфоструктурные узлы. К узлам оказались приурочены эпицентры сильных землетрясений. Этот факт впервые был эмпирически установлен при изучении Памира и Тянь-Шаня [Гельфанд и др., 1972] и впоследствии получил подтверждение во многих сейсмоактивных регионах мира, где было проведено морфоструктурное районирование и распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. Обзоры исследований по применению этой методологии приведены в работах [Горшков, 2010; Соловьев и др., 2014; Кособоков, Соловьев, 2018].

В работах [Гельфанд и др., 1973; 1974а] объектами распознавания рассматривались узлы пересечения линеаментов, где авторы называли такие узлы дизъюнктивными. Впоследствии их стали определять как морфоструктурные узлы [Ранцман, 1979]. Задача состояла в разделении множества всех узлов региона на два класса: высоко- (**В**) – и низкосейсмичные (**Н**) относительно пороговой магнитуды $M_0 = 6.5$ с помощью логического алгоритма распознавания с обучением Кора-3 [Бонгард, 1967; Гельфанд и др., 1974]. Для обучения алгоритма рассматривались две обучающие выборки: $\mathbf{B}_0$ – объекты (узлы), априори принадлежащие классу **В**, и $\mathbf{H}_0$ – объекты, априори относящиеся к классу **Н**. В подмножество $\mathbf{B}_0$ включались узлы, которые содержали известные в регионе эпицентры сильных землетрясений. В подмножество $\mathbf{H}_0$ включались узлы, вблизи которых отсутствуют эпицентры землетрясений с $M \geq M_0$. Естественно, невозможно получить “чистое” подмножество $\mathbf{H}_0$, являющееся материалом обучения класса **Н**. В некоторых таких узлах возможны землетрясения с $M \geq M_0$, которые неизвестны на момент решения задачи распознавания из-за короткого периода инструментальной регистрации сейсмичности. Задача распознавания и заключалась в определении таких узлов. Разделение узлов на классы **В** и **Н** было проведено на основе

геоморфологических и морфоструктурных параметров, единообразно определенных для каждого узла. Эти параметры характеризуют интенсивность новейших тектонических движений, сложность строения узла и раздробленность земной коры в его окрестностях.

При решении задачи распознавания в Анатолии и смежных регионах узлы были определены как круги радиуса $r = 40$ км с центрами в точках пересечения линеаментов. Распознанные в работе [Гельфанд и др., 1974а] высокосейсмичные узлы показаны на рис. 1.

После решения задачи в 1974 г. в Анатолии и смежных регионах по данным глобальной базы данных о землетрясениях NEIC произошло 36 землетрясений с $M \geq 6.5$. Перечень этих событий представлен в таблице, а их соотношение с прогнозом из работы [Гельфанд и др., 1974а] показано на рис. 1. Эпицентры 32-х из них попали в высокосейсмичные области. При этом эпицентры 15-ти землетрясений произошли в узлах **В**, которые на момент проведения распознавания землетрясения рассматриваемых магнитуд не были известны. Одно событие (№ 8 в таблице и на рис. 1) произошло вблизи узла, отнесенного распознаванием к классу **Н**, а три землетрясения (№№ 19, 31 и 33) возникли на линеаментах, но вне узлов.

Сопоставление прогноза мест землетрясений с $M \geq 6.5$, разработанного в работе [Гельфанд и др., 1974а] с фактическими событиями такой силы, произошедшими после 1974 г., показывает его достаточно высокую достоверность. Около 89% (32 землетрясения из 36) последующих

землетрясений возникли в пределах узлов **В**. Особо отметим, что 14 землетрясений после 1974 г. возникли в узлах **В*** (таблица), где на момент решения задачи распознавания события с $M \geq 6.5$ были неизвестны.

Эпицентры землетрясений 06.02.2023 г. (№№ 35 и 36 на рис. 1) произошли в сложно устроенном узле, где Восточно-Анатолийский разлом круто меняет свое простирание с северо-восточного на юго-юго-западное и продолжается в южном направлении как разлом Мертвого моря. В этот же узел с юго-запада входит разлом Критской дуги. Сочленение таких крупных разломных зон обусловило высокую степень раздробленности земной коры в окрестностях узла, что нашло отражение в характерных признаках узлов класса **В**, которые были определены алгоритмом Кора-3. Следует особо отметить, что уже при переносе критериев высокой сейсмичности со Средней Азии на Анатолию и смежные регионы [Гельфанд и др., 1973] узел, где случились катастрофические землетрясения 06.02.2023 г., характеризовался десятью из 11-ти признаков класса **В** при отсутствии признаков класса **Н**. В Анатолии признаки узлов **В** сформированы в основном из показателей тектонической раздробленности: длина главного линеамента, сложность узла, близость линеаментов первого ранга, сближенность линеаментов. Признаки узлов **В** содержат такие значения перечисленных параметров, которые указывают на повышенную раздробленность земной коры [Гельфанд и др., 1974а].

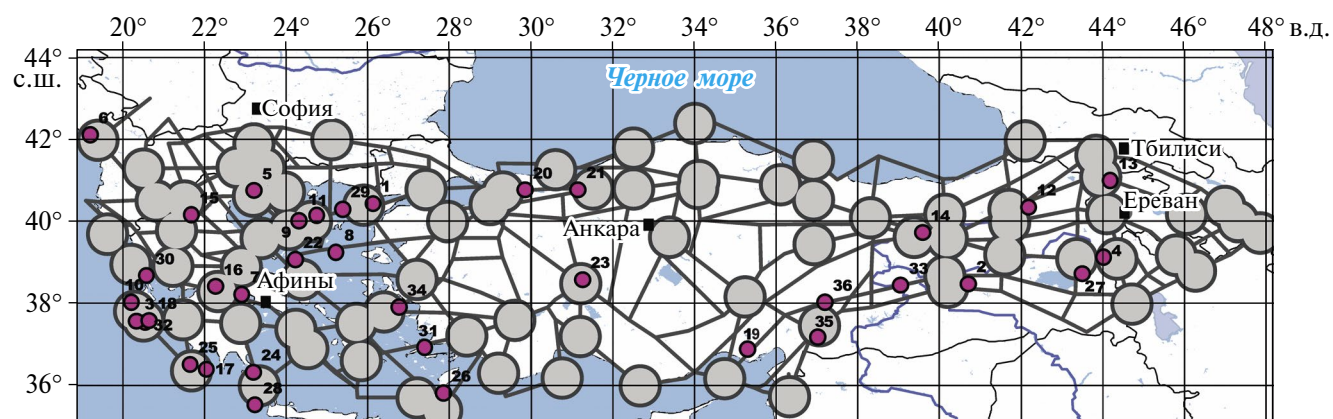


Рис. 1. Схема линеаментов Анатолии и прилегающих регионов и распознанные высокосейсмичные узлы для $M \geq 6.5$. Высокосейсмичные пересечения **В** показаны серыми кругами радиусом 40 км. Эпицентры землетрясений с $M \geq 6.5$, произошедших после 1974 г., показаны сиреневыми точками с номерами, соответствующими номерам в таблице).

Землетрясения в Анатолии и смежных регионах, произошедшие после 1974 г., и их соотношение с прогнозом в работе [Гельфанд и др., 1974а]

Номер события на рис. 1	Дата	Широта, град.	Долгота, град.	Магнитуда	Соотношение с прогнозом
1	27.03.1975	40.42N	26.14E	6.7	В
2	06.09.1975	38.47N	40.72E	6.7	В*
3	11.05.1976	37.56N	20.35E	6.7	В
4	24.11.1976	39.12N	44.03E	7.3	В*
5	20.06.1978	40.74N	23.23E	6.6	В
6	15.04.1979	42.10N	19.21E	7.3	В
7	24.02.1981	38.22N	22.93E	6.8	В*
8	19.12.1981	39.24N	25.23E	7.6	Н
9	18.01.1982	40.00N	24.32E	7.0	В
10	17.01.1983	38.03N	20.23E	7.2	В
11	06.08.1983	40.14N	24.76E	7.3	В*
12	30.10.1983	40.33N	42.19E	6.9	В
13	07.12.1988	40.99N	44.19E	7.0	В*
14	13.03.1992	39.71N	39.60E	6.9	В
15	13.05.1995	40.15N	21.69E	6.8	В*
16	15.06.1995	38.40N	22.28E	6.5	В
17	13.10.1997	36.38N	22.07E	6.7	В
18	18.11.1997	37.57N	20.66E	6.6	В
19	27.06.1998	36.88N	35.31E	6.6	вне узлов
20	17.08.1999	40.75N	29.86E	7.8	В*
21	12.11.1999	40.76N	31.16E	7.5	В
22	26.07.2001	39.06N	24.24E	6.6	В
23	03.02.2002	38.57N	31.27E	6.5	В*
24	08.01.2006	36.31N	23.21E	6.7	В*
25	14.02.2008	36.50N	21.67E	6.9	В
26	15.07.2008	35.80N	27.86E	6.5	В
27	23.10.2011	38.72N	43.51E	7.3	В
28	12.10.2013	35.51N	23.25E	6.6	В*
29	24.05.2014	40.29N	25.39E	6.9	В
30	17.11.2015	38.67N	20.60E	6.5	В*
31	20.07.2017	38.67N	27.41E	6.6	вне узлов
32	25.10.2018	37.52N	20.56E	6.8	В
33	24.01.2020	38.43N	39.06E	6.7	вне узлов
34	30.10.2020	37.90N	26.78E	7.0	В*
35	06.02.2023	37.17N	37.03E	7.8	В*
36	06.02.2023	38.02N	37.20E	7.5	В*

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ПОВЫШЕННОЙ ВЕРОЯТНОСТИ СИЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ВОСТОКЕ ТУРЦИИ

Несмотря на очевидные успехи в изучении землетрясений их актуально оперативный прогноз и сегодня остается одной из наиболее острых и дискуссионных проблем наук о Земле. Развитие информационных наук и технологий в 1970-е годы привело к внедрению математических методов распознавания образов в практику естественнонаучных исследований. В частности, классические работы цикла «Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений» [Гельфанд и др., 1972; 1973; 1974а; 1974б] предъявили решения бессрочного нулевого приближения задачи прогноза землетрясений и привели к пониманию пределов универсальности сейсмических процессов в различном геотектоническом окружении. Подобие математически строго сформулированных количественных критериев нулевого приближения явилось одним из основополагающих аргументов в пользу систематического поиска общих самоподобных признаков приближающейся катастрофы в динамике последовательности землетрясений малой силы. Результаты такого поиска были представлены уже в 1984 г. на 27-ом Международном геологическом конгрессе, в частности, прототип алгоритма М8 [Кейлис-Борок, Кособоков, 1984], основная версия которого к 1986 г. была проверена ретроспективно в пятнадцати регионах мира [Кейлис-Борок, Кособоков, 1984] и предъявила возможность среднесрочного приближения на месяцы—годы с неопределенностью локализации в несколько (5–10) очагов ожидаемого землетрясения.

После осуществившихся прогнозов катастрофических землетрясений в Армении (Спитак, 07.12.1988 г.) и Калифорнии (Лома Приета, 18.10.1989 г.) был реализован совместный российско-американский проект экспериментальной проверки алгоритма прогноза землетрясений [Healy et al., 1992; Kossobokov et al., 1997]. С 1992 года по настоящее время каждые полгода и на полгода вперед алгоритм М8 по состоянию оперативно обновляемых Геологической службой США (USGS) данных глобальной сейсмичности на 1 января и 1 июля текущего года (<https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search>) определяет диагностику областей ожидаемого возникновения сильнейших землетрясений мира. В 1997 г. была подтверждена высокая статистическая значимость

этих предсказаний и их уточнения по алгоритму М8-MSc [Kossobokov et al., 1990] в Тихоокеанском сейсмическом поясе [Kossobokov et al., 1999], а с 1999 г. по настоящее время среднесрочный прогноз по алгоритмам М8 и М8-MSc ведется всюду, где статистики землетрясений малой силы достаточно для надежной диагностики ожидаемых землетрясений из магнитудных диапазонов $M8.0+$ и $M7.5+$ [Kossobokov, Shebalin, 2003; Кособоков, Щепалина, 2020; Ismail-Zadeh, Kossobokov, 2021; Kossobokov, Soloviev, 2021]. Тогда же карты актуальных прогнозов по алгоритмам М8 и М8-MSc стали публиковаться на сайте ограниченного доступа Международного института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН (в настоящее время, ИТПЗ РАН).

В январе 2023 г. была подтверждена область тревоги, диагностированная алгоритмом М8 в июле 2021 г. (рис. 2). Сильнейшие события последовательности землетрясений в Караман-мараше 06.02.2023 г. (номера 35 и 36 в таблице) произошли в районе, где данных USGS недостаточно для применения алгоритма М8, ориентированного на диапазон магнитуд $M7.5+$, в пределах области, предупрежденной об ожидаемых событиях $M8.0+$.

Следует отметить, что определение магнитуды первого сильного толчка USGS (M_{ww} 7.8) может быть занижено: по данным независимых определений значения магнитуд других сейсмологических агентств основной толчок следует отнести в диапазон $M8.0+$. Так, например, Геофизическая служба РАН приводит значение M_s 8.0, турецкий Региональный Центр Мониторинга Землетрясений и Цунами RETMC — M_{wp} 8.0, а обсерватория GEOSCOPE — M_w 8.0 по данным глобальной сети широкополосных сейсмографов.

Таким образом, прогноз возможного возникновения землетрясения из диапазона $M8.0+$ по алгоритму М8, объявленный в середине 2021 г. и подтвержденный оперативной диагностикой в начале 2023 г. (рис. 2), очевидно реализован катастрофическими событиями 6 февраля. Следует отметить, что актуально ошибочное уточнение локализации эпицентров этих событий, полученное по алгоритму М8-MSc, объясняется неполнотой каталога землетрясений в этом районе, где, как указано выше, данных USGS недостаточно для применения алгоритма М8, ориентированного на прогноз в диапазоне $M7.5+$.

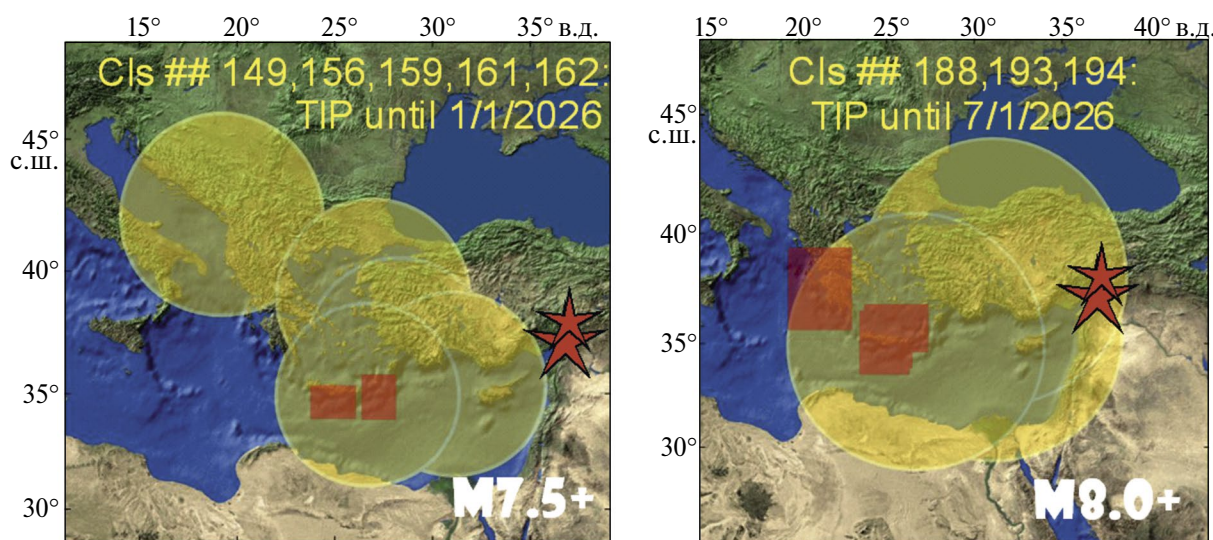


Рис. 2. Диагностика тревоги (Time of Increased Probability, TIP) в кругах исследования (Circles of Investigation, CIs) по алгоритму M8 на январь–июнь 2023 г. и эпицентры сильнейших землетрясений M_{MW} 7.8 и 7.5 06.02.2023 г. (звезды).

Примечания: (1) Прогнозы относятся исключительно к сейсмоактивным областям в пределах 180 и 262 кругов исследования радиуса 427 и 667 км, ориентированных на глобальный мониторинг событий в диапазонах $M7.5+$ и $M8.0+$, соответственно. (2) Оба землетрясения произошли за пределами территории мониторинга в диапазоне $M7.5+$ (слева) на территории мониторинга в диапазоне $M8.0+$ (справа). (3) Актуально ошибочное уточнение прогнозов по алгоритму M8-MSc отмечено красными многоугольниками.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проверка результатов распознавания мест возможного возникновения землетрясений с $M \geq 6.5$, полученных в работе [Гельфанд и др., 1974а] показала, что турецкие землетрясения 06.02.2023 г. возникли в потенциально опасном для этой магнитуды узле. Анализ расположения землетрясений с $M \geq 6.5$, которые произошли после 1974 г. в пределах всей Анатолии и смежных регионов подтвердил достаточно высокую эффективность прогноза от 1974 г.: около 89% последующих землетрясений возникли в пределах узлов В. Особого внимания заслуживает то, что 14 землетрясений после 1974 г. возникли в узлах В* (таблица), где на момент решения задачи распознавания события с $M \geq 6.5$ были неизвестны. Проведенная в работе проверка результатов распознавания для Анатолии и смежных регионов, а также данные глобальной верификации результатов распознавания во всех ранее изученных регионах [Gorshkov, Novikova, 2018] свидетельствуют, что:

- гипотеза о связи сильных землетрясений с морфоструктурными узлами в целом подтверждается, хотя и не на 100%;

- схемы морфоструктурного районирования, отражающие иерархическую систему взаимосвязанных блоков, являются достаточно

адекватной основой для выделения потенциальных мест землетрясений;

- методика распознавания мест возможного возникновения сильных землетрясений достаточно эффективна для выявления сейсмоопасных районов.

Следовательно, сейсмогенные узлы, определяемые распознаванием образов, предоставляют систематическую информацию первого порядка, которая может внести значительный вклад в надежную оценку сейсмической опасности. Информация о потенциальных местах сильных землетрясений может быть непосредственно использована для целей оценки сейсмоопасности как отдельных объектов критической инфраструктуры, так и включаться в существующие методы оценки сейсмической опасности. Например, использование данных о потенциально сейсмогенных узлах в неопределенностном подходе (NDSHA) для оценки сейсмической опасности позволяет заполнять возможные пробелы в сейсмической истории изучаемого региона [Panza et al., 2020]. Важность сейсмогенных узлов в приложениях NDSHA была продемонстрирована для итальянского региона [Peresan et al., 2011; Gorshkov et al., 2021; Brandmayr et al., 2021], а также для северо-восточного Египта [Gorshkov et al., 2019].

Как и в случае Великого землетрясения 11.03.2011 г. у восточного побережья острова Хонсю в Японии [Davis et al., 2012] заблаговременный прогноз катастрофического события на стыке Восточного Анатолийского разлома и рифта Мертвого моря по алгоритму М8 не был использован, прежде всего, из-за отсутствия (1) адекватной связи между ответственными за чрезвычайные ситуации и прогностической информацией о землетрясении и (2) опыта практического применения существующих методологий подготовки к чрезвычайным ситуациям, в частности, политики в отношении того, как принимать решения на основе информации среднесрочного прогноза ограниченной, но известной точности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеевская М.А., Габриэлов А.М., Гвишиани А.Д., Гельфанд И.М., Раницман Е.Я. Морфоструктурное районирование горных стран по формализованным признакам. Распознавание и спектральный анализ в сейсмологии / Кейлис-Борок В.И. (ред.). Вычисл. Сейсмология. Вып. 10. М.: Наука. 1977. С. 33–49.
- Бонгард М.М. Проблема узнавания. М.: Наука. 1967. 320 с.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. О критериях высокой сейсмичности // Докл. АН СССР. 1972. Т. 202. № 6. С. 1317–1320.
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Извекова М.Л., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. 1. Памир и Тянь-Шань. Вычислительные и статистические методы интерпретации сейсмических данных / Кейлис-Борок В.И. (ред.). Вычисл. Сейсмология. Вып. 6. М.: Наука. 1973. С. 107–133.
- 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. 1973. Т. 210. № 2. С. 327–330. <https://www.mathnet.ru/rus/dan/v210/i2/p327>
- Гельфанд И.М., Губерман Ш.А., Жидков М.П., Калецкая М.С., Кейлис-Борок В.И., Раницман Е.Я., Ротвайн И. Распознавание мест возможного возникновения сильных землетрясений. II. Четыре региона Малой Азии и Юго-Восточной Европы. Машинный анализ цифровых сейсмических данных / Кейлис-Борок В.И. (ред.). Вычисл. Сейсмология. Вып. 7. М.: Наука. 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 / Кейлис-Борок В.И. (ред.). Вычисл. Сейсмология. Вып. 7. М.: Наука. 1974б. С. 41–64.
- Горшков А.И. Распознавание мест сильных землетрясений в Альпийско-Гималайском поясе. М.: КРАСАНД. 2010. 472 с.
- Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Комплекс долгосрочных предвестников для сильнейших землетрясений мира. Землетрясения и предупреждение стихийных бедствий. 27-й Международный геологический конгресс, 4–14 августа 1984 г. Москва. Коллоквиум С6. М.: Наука. Т. 61. С. 56–66.
- Кейлис-Борок В.И., Кособоков В.Г. Периоды повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира. Математические методы в сейсмологии и геодинимике / Кейлис-Борок В.И. (ред.). Вычисл. Сейсмология. Вып. 19. М.: Наука. 1986. С. 48–58.
- Кособоков В.Г., Щепалина П.Д. Времена повышенной вероятности возникновения сильнейших землетрясений мира: 30 лет проверки гипотезы в реальном времени // Физика Земли. 2020. № 1. С. 1–10. <https://doi.org/10.1134/S0002333720010068>
- Кособоков В.Г., Соловьев А.А. Распознавание образов в задачах оценки сейсмической опасности // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19. № 4. С. 55–90. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-55-90>
- Раницман Е.Я. Места землетрясений и морфоструктура горных стран. М.: Наука. 1979. 170 с.
- Соловьев А.А., Гвишиани А.Д., Горшков А.И., Добровольский М.Н., Новикова О.В. Распознавание мест возможного возникновения землетрясений: методология и анализ результатов // Изв. РАН. Сер. Физика Земли. 2014. № 2. С. 161–178.
- Aktug B., Ozener H., Dogru A., Sabuncu A., Turgut B., Halicioglu K., Yilmaz O., Havazli E. Slip rates and seismic potential on the East Anatolian Fault System using an improved GPS velocity field // Journal of Geodynamics. 2016. V. 94–95. P. 1–12.
- Ambraseys N.N. Temporary seismic quiescence: SE Turkey // Geophys. J. Int. 1989. V. 96. P. 311–331.
- Brandmayr E., Vaccari F., Panza G.F. Neo-deterministic seismic hazard assessment of Corsica-Sardinia block // Rendiconti Lincei. Scienze Fisiche e Naturali. 2021. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-01033-w>
- Davis C., Keilis-Borok V., Kossobokov V., Soloviev A. Advance Prediction of the March 11, 2011 Great East Japan Earthquake: A Missed Opportunity for Disaster Preparedness // International Journal of Disaster Risk Reduction. 2012. V. 1. P. 17–32. DOI: 10.1016/j.ijdr.2012.03.001
- Gelfand I.M., Guberman Sh.A., Keilis-Borok V.I., Knopoff L., Press F., Ranzman E.Ya., Rotwain I.M., Sadovsky A.M. Pattern recognition applied to earthquake epicenters in California // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 1976. V. 11(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., Novikova O. Estimating the validity of the recognition results of earthquake prone areas using the Arc-Map // Acta Geophysica. 2018. V. 66(5). P. 843–853. Doi: 10.1007/s11600-018-0177

- Gorshkov A., Hassan H., Novikova O. Seismogenic nodes ($M \geq 5.0$) in north-east of Egypt and implication for seismic hazard assessment // *Pure Appl. Geophys.* 2019. V. 176(2). P. 593–610. <https://doi.org/10.1007/s00024-018-2012-9>
- Gorshkov A., Panza G.F., Soloviev A., Brandmayr E. On the seismic potential of the Corsica–Sardinia block // *Rend. Fis. Acc. Lincei.* 2021. V. 32 P. 715–728. <https://doi.org/10.1007/s12210-021-01014-z>
- Healy J.H., Kossobokov V.G., Dewey J.W. A test to evaluate the earthquake prediction algorithm, M8. U.S. Geol. Surv. Open-File Report 92-401. 1992. 23 p. with 6 Appendices. <https://doi.org/10.3133/ofr92401>
- Ismail-Zadeh A., Kossobokov V. Earthquake Prediction, M8 Algorithm. Encyclopedia of Solid Earth Geophysics. Encyclopedia of Earth Sciences Series / Gupta H.K. (ed.). Springer. 2021. P. 204–207. https://doi.org/10.1007/978-3-030-58631-7_157
- Kossobokov V., Shebalin P. Earthquake Prediction. In: Keilis-Borok V.I., Soloviev A.A. (eds) *Nonlinear Dynamics of the Lithosphere and Earthquake Prediction*. Springer Series. Synergetics. Berlin, Heidelberg: Springer. 2003. P. 141–207. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05298-3_4
- Kossobokov V.G., Healy J.H., Dewey J.W. Testing an earthquake prediction algorithm // *Pure Appl. Geophys.* 1997. V. 149. P. 219–232. <https://doi.org/10.1007/BF00945168>
- Kossobokov V.G., Keilis-Borok V.I., Smith S.W. Localization of intermediate-term earthquake prediction // *J. Geophys. Res.* 1990. V. 95(B12). P. 19763–19772. <https://doi.org/10.1029/JB095IB12P19763>
- Kossobokov V.G., Romashkova L.L., Keilis-Borok V.I., Healy J.H. Testing earthquake prediction algorithms: Statistically significant real-time prediction of the largest earthquakes in the Circum-Pacific, 1992–1997 // *Phys. Earth Planet. Inter.* 1999. V. 111(3–4). P. 187–196. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(98\)00159-9](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(98)00159-9)
- Kossobokov V.G., Soloviev A.A. Testing Earthquake Prediction Algorithms // *Journal of the Geological Society of India.* 2021. V. 97. P. 1514–1519. <https://doi.org/10.1007/s12594-021-1907-8>
- Panza G.F., Bela J. NDSHA: A new paradigm for reliable seismic hazard assessment // *Engineering Geology.* 2020. V. 275. P. 105403.
- Peresan A., Zuccolo E., Vaccari F., Gorshkov A., Panza G. Neo-Deterministic Seismic Hazard and Pattern Recognition Techniques: Time-Dependent Scenarios for North-Eastern Italy // *Pure Appl. Geophys.* 2011. V. 168. P. 583–607. [doi:10.1007/s00024-010-0166-1](https://doi.org/10.1007/s00024-010-0166-1)

Prediction Results for the Strongest Earthquakes in Southern Turkey on February 6, 2023

A. I. Gorshkov^{a, *}, V. G. Kossobokov^{a, **}, and O. V. Novikova^{a, ***}

^a*Institute of Earthquake Prediction Theory and Mathematical Geophysics, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997 Russia*

*e-mail:gorshkov@mitp.ru

**e-mail:volodya@mitp.ru

***e-mail:onovikov@mitp.ru

Received October 19, 2023

revised November 30, 2023

accepted December 5, 2023

Abstract — On February 6, 2023, two devastating earthquakes struck southern central Turkey, nine hours apart. The ground shaking from these earthquakes even swept over a significant part of northwestern Syria. In this paper, we consider the locations of the epicenters of these earthquakes relative to the prediction of $M \geq 6.5$ earthquake epicenters in Anatolia and adjacent regions, which was made in 1973 by I.M. Gelfand, V.I. Keilis-Borok and their colleagues using the Kora-3 pattern recognition algorithm based on morphostructural zoning data. We also present the results of early detection of periods with an increased probability of the strongest earthquakes as determined by the medium-term prediction algorithm for M8 earthquakes. It is found that the epicenters of the February 6, 2023 earthquakes occurred in a knot identified in 1973 as potentially earthquake-prone for $M \geq 6.5$, and both events occurred within the spatial and temporal boundaries of the alert area diagnosed by the M8 algorithm in July 2021.

Keywords: February 6, 2023 earthquakes in Turkey and Syria, pattern recognition, Cora-3 algorithm, M8 algorithm