

УДК 550.343.6

## АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ОЦЕНКА ОПАСНОСТИ АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ В ТУРЦИИ 06.02.2023 г., $M_w$ 7.8

© 2023 г. С. В. Баранов<sup>1, 2, \*</sup>, П. Н. Шебалин<sup>2, \*\*</sup>, И. А. Воробьева<sup>2</sup>, О. В. Селюцкая<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Кольский филиал ФИЦ “Единая геофизическая служба РАН”, г. Анатиты, Россия

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

\*E-mail: bars.vl@gmail.com

\*\*E-mail: p.n.shebalin@gmail.com

Поступила в редакцию 25.05.2023 г.

После доработки 03.06.2023 г.

Принята к публикации 13.06.2023 г.

В статье рассматривается использование автоматизированной информационной системы оценки опасности афтершоков (AFCAST) на примере афтершоковой серии землетрясения в Турции 06.02.2023 г.  $M_w$  7.8 (Пазарджыкское землетрясение). Приводятся автоматизированные оценки области афтершоковой активности, магнитуды сильнейшего афтершока и длительности опасного периода, полученные как по данным об основном толчке, так и по информации о первых афтершоках.

*Ключевые слова:* Пазарджыкское землетрясение, афтершоки, оценка опасности.

DOI: 10.31857/S0002333723060042, EDN: MUXRXQ

### ВВЕДЕНИЕ

Землетрясение в Турции 06.02.2023 г. с магнитудой  $M_w$  7.8 (Пазарджыкское землетрясение) произошло на юго-востоке страны на расстоянии 37 км от города Газинтеп (население более 2 миллионов человек) и приурочено к Восточно-Анатолийской зоне разломов. Это событие является сильнейшим в этой зоне за весь период инструментальных наблюдений и сильнейшим во всем мире с 29.07.2021 г. Согласно каталогу ISC-GEM [Storchak et al., 2013; 2015; Di Giacomo et al., 2018], предыдущее землетрясение с  $M_w$  7.8 на территории Турции было зарегистрировано в восточной части страны вблизи города Эрзинджан в 1939 г.; событие приурочено к Северо-Анатолийскому разлому.

Согласно работе [Dal Zilio, Amruero, 2023], дефицит тектонической подвижки в зоне Восточно-Анатолийского разлома накапливается со скоростью примерно 10 мм в год. Напряжения накапливаются по мере сближения Анатолийской и Аравийской плит и периодически высвобождаются землетрясениями с магнитудой 7 или выше, которые сопровождаются афтершоками. Однако предсказать время следующего сильного землетрясения в настоящее время невозможно.

Пазарджыкское землетрясение сопровождалось интенсивным афтершоковым процессом. Так по данным каталога ANSS ComCat [ANSS ...]

Геологической службы США (USGS) в первые сутки после основного толчка было зарегистрировано 82 афтершока с магнитудой 4.4 или выше, а за 47 сут было зарегистрировано 166 афтершоков с магнитудой 4.4 или выше. Через 10.7 мин после основного толчка произошел афтершок с  $M_w$  6.7; сильнейший афтершок произошел через 9 ч и имел магнитуду  $M_w$  7.5 (Эльбистанское землетрясение). Эти толчки стали причиной разрушений зданий и сооружений, получивших повреждения (возможно скрытые) в результате основного толчка [Erdik et al., 2023]. Эти данные вновь подтверждают необходимость оценивать сейсмическую опасность с учетом возможных дополнительных последствий, вызванных сильными повторными толчками.

В отчете Мирового банка Global Rapid Post-Disaster Damage Estimation (GRADE) от 20.02.2023 г.<sup>1</sup> сообщается, что эти землетрясения привели к широкомасштабному ущербу в 11 провинциях, где проживает около 14.01 миллиона человек (16.5% населения Турции). По состоянию на 19.02.2023 г. сообщалось о более чем 41 020 погибших, 108 068 человек получили ранения и более 1 200 000 чело-

<sup>1</sup> Global Rapid Post-Disaster Damage Estimation (GRADE) Report : February 6, 2023 Kahramanmaraş Earthquakes – Türkiye Report (English) <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/099022723021250141/p1788430aeb62f08009b2302bd4074030fb>

век были перемещены, 105000 зданий, в которых проживает 386000 человек, подлежат сносу. Согласно докладу Мирового банка от 27.02.2023 г.<sup>2</sup>, прямой ущерб от Пазарджыкского землетрясения и его афтершока (Эльбистанское землетрясение) составил около 32.2 миллиарда долларов США, что эквивалентно 4% валового внутреннего продукта Турции в 2021 г. В докладе так же отмечалось, что из-за афтершоков величина ущерба скорее всего возрастет.

Эти сведения подтверждают актуальность исследований в области оценки опасности сильных афтершоков землетрясений, а также значимость разработки информационных систем для автоматизированной оценки этой опасности. В настоящей статье представлены результаты применения уже работающей информационной системы AFCAST к оценке опасности афтершоков Пазарджыкского землетрясения.

#### КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ОЦЕНКИ ОПАСНОСТИ АФТЕРШОКОВ AFCAST

Система AFCAST разрабатывалась авторами с 2016 по 2018 гг. в рамках проекта РФФ 16-17-00093 “Создание информационной системы автоматической оценки сейсмической опасности после сильных землетрясений по данным геофизического мониторинга”. Детальное описание системы приведено в приложении к докторской диссертации [Баранов, 2019]. Результаты работы системы доступны в сети Интернет (URL: <https://itpz-ran.ru/afcast/>).

При создании системы AFCAST был получен целый ряд новых теоретических результатов [Шебалин, Баранов, 2017; 2019; Shebalin, Baranov, 2017; Shebalin, Narteau, 2017; Баранов, Шебалин, 2017; 2018; 2019; Шебалин, 2018; Баранов и др., 2018; 2019; Шебалин и др., 2018]. Среди этих результатов следует выделить теоретическое обоснование закона Бота и динамический закон Бота, устанавливающий зависимость разности магнитуд основного толчка и сильнейших афтершоков от времени [Баранов, Шебалин, 2018; 2019], метод трех стратегий прогноза (“мягкая”, “нейтральная” и “жесткая”) [Баранов, Шебалин, 2017], закон продуктивности для сильнейших землетрясений мира [Шебалин и др., 2018]; зависимость величины временной задержки начала степенного характера спада активности афтершоков от глубины очага [Shebalin, Narteau, 2017]. Эти ре-

зультаты получили свое развитие в рамках нового проекта РФФ 20-17-00180 “Развитие сценарного подхода в задачах оценки сейсмической опасности и риска”, установлен экспоненциальный закон продуктивности землетрясений в относительном диапазоне магнитуд [Shebalin et al., 2020], подтверждено его выполнение в широком диапазоне магнитуд [Shebalin et al., 2022], предложена модификация модели ETAS, в которой благодаря включению закона продуктивности устранен недостаток завышения повторяемости событий на больших временах [Shebalin et al., 2020; Baranov et al., 2022]. Проверка эффективности работы системы AFCAST на примере сильных землетрясений дает возможность косвенной проверки лежащих в ее основе теоретических результатов.

Система AFCAST функционирует в режиме времени, близком к реальному, каждые 5 ч загружая данные о землетрясениях из каталога ANSS ComCat [ANSS ...]. Землетрясения с магнитудой 6.5 или выше считаются основными толчками. Система оценивает область, где ожидаются сильные афтершоки ( $M \geq 5.5$ ), магнитуду сильнейшего афтершока и длительность периода, в течение которого ожидаются афтершоки с  $M \geq M_m - 2$  ( $M_m$  – магнитуда основного толчка). Первые оценки доступны сразу, как только информация об основном толчке попадает в систему. Затем по прошествии времени эти оценки уточняются с использованием информации о первых афтершоках.

На рис. 1. показан основной экран системы AFCAST, на котором интерактивно отображаются землетрясения с  $M \geq 6.5$ . На рис. 2 показано отображение афтершоковой серии землетрясения в Турции 06.02.2023 г.,  $M_w$  7.8.

#### РЕЗУЛЬТАТ ОЦЕНКИ СИСТЕМОЙ AFCAST ОПАСНОСТИ АФТЕРШОКОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ 06.02.2023 г., $M_w$ 7.8

Как было отмечено в предыдущем разделе, система AFCAST выполняет оценки области, где ожидаются афтершоки с  $M \geq 5.5$ , магнитуды сильнейшего афтершока, ожидаемого в течение года, и оценку длительности опасного периода для афтершоков  $M \geq M_m - 2$ . Эти оценки выполняются как по данным об основном толчке, так и по информации о первых афтершоках. Результаты оценивания представляются в удобном для пользователя интерактивном виде.

На рис. 3 показаны оценки области афтершоковой активности. За оценку области по информации об основном толчке принимается круг с центром в эпицентре основного толчка и радиусом  $R_m \geq 0.03 \times 10^{M_m/2}$  (черная окружность на рис. 3).

<sup>2</sup> Earthquake Damage in Türkiye Estimated to Exceed \$34 billion: World Bank Disaster Assessment Report <https://www.worldbank.org/en/news/press-release/2023/02/27/earthquake-damage-in-turkiye-estimated-to-exceed-34-billion-world-bank-disaster-assessment-report>

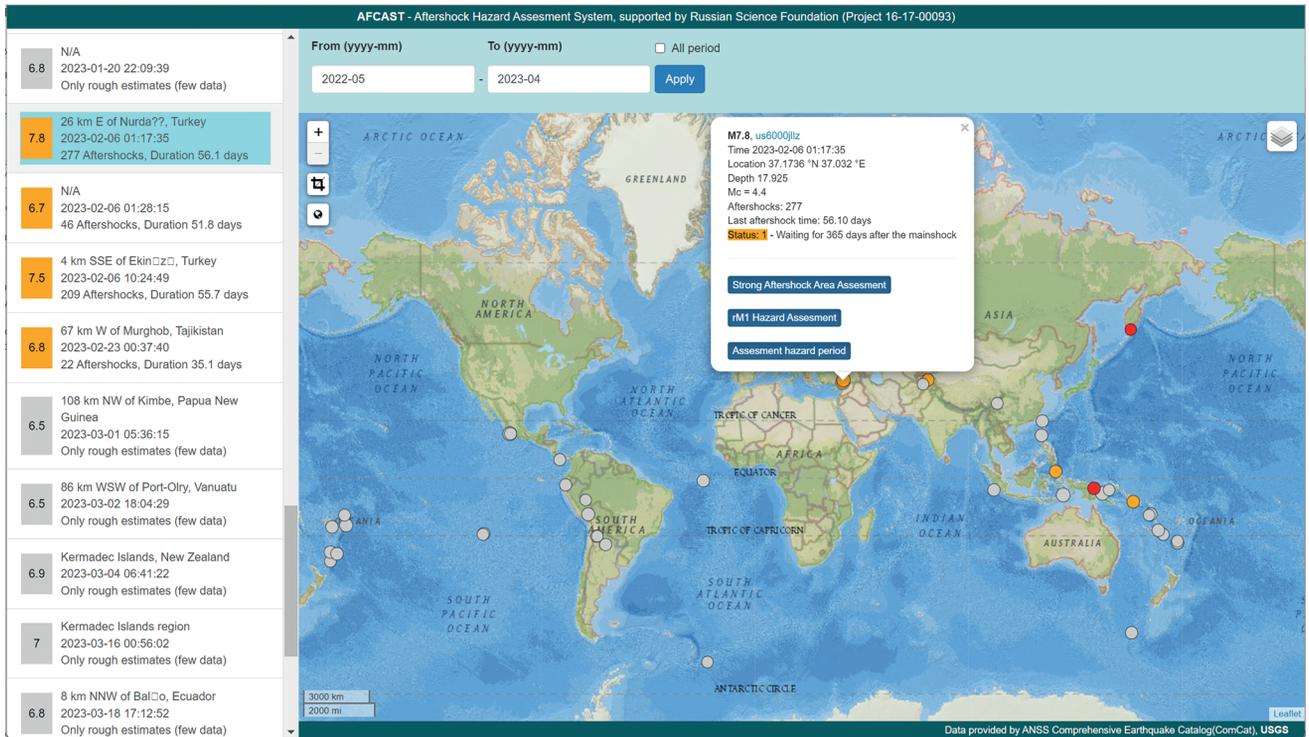


Рис. 1. Основной экран системы AFCAST. Слева приведен список землетрясения с магнитудами 6.5 или выше; справа — интерактивная карта, на которой кружками показаны эпицентры землетрясений (размер кружка пропорционален магнитуде, цвет показывает достаточно ли зарегистрировано афтершоков для оценки афтершоковой опасности).

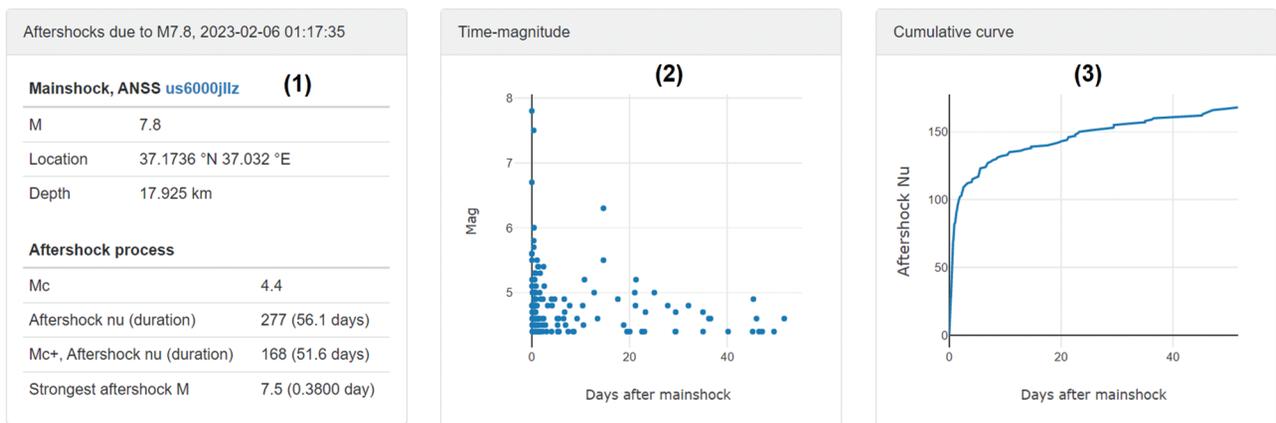


Рис. 2. Отображение системой AFCAST афтершоковой серии землетрясения в Турции 06.02.2023 г.  $M_w$  7.8: (1) — сведения об основном толчке и афтершоковой серии; (2) — зависимость магнитуды события от времени (сутки после основного толчка); (3) — кумулятивная кривая (зависимость суммарного количества афтершоков от времени).

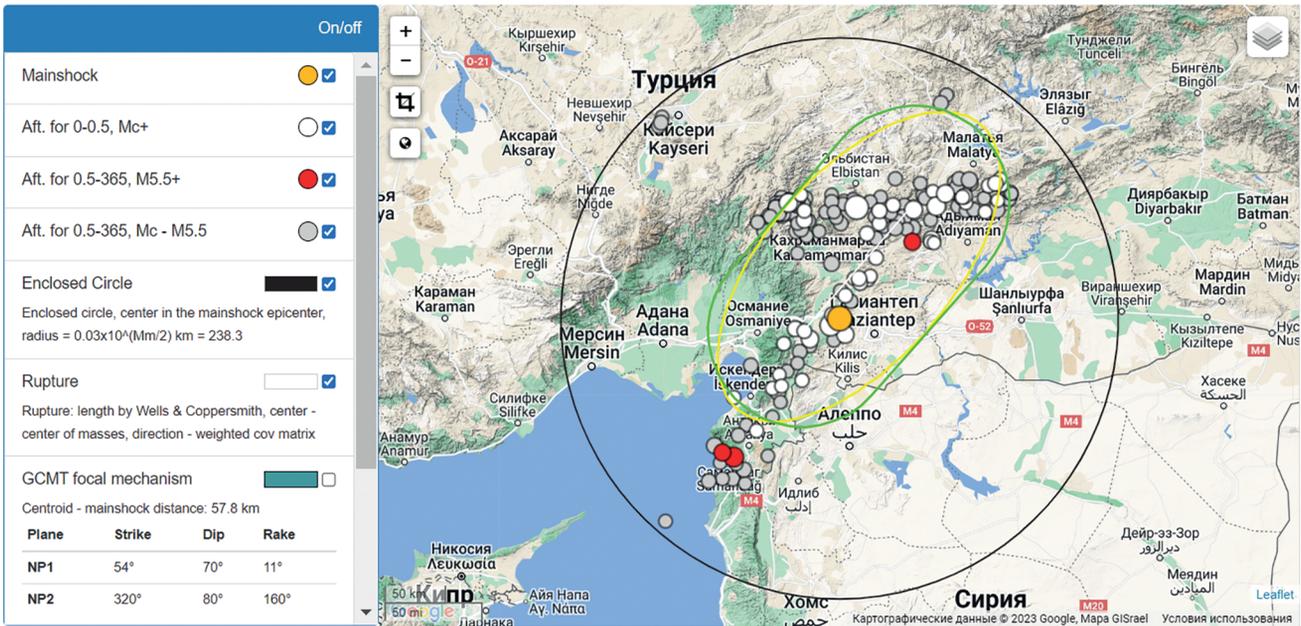
Такой круг называется вмещающим. В работе [Баранов, Шебалин, 2017], было показано, что вмещающий круг содержит все афтершоки, выделенные по алгоритму авторов работы [Molchan, Dmitrieva, 1992] (программная реализация алгоритма подготовлена автором работы [Смирнов, 2009]). При этом, как правило, число событий в

этой области, которые не являются афтершоками основного толчка, невелико. Поэтому для расчетов параметров с использованием данных о первых афтершоках используются все события из вмещающего круга за соответствующий период.

Если за первые 12 ч после основного толчка зарегистрировано не менее 6 представительных со-

Estimated areas of strong aftershocks calculated using data for 12 hours after the mainshock

On/Off	Code	Region - Strategy	Description	Quantile	Area, km <sup>2</sup>
<input type="checkbox"/>	3	Ellipse - Soft strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.87	36803.20
<input checked="" type="checkbox"/>	3	Ellipse - Neutral strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.95	39742.50
<input type="checkbox"/>	3	Ellipse - Hard strategy	Ellipse by quantile: center at the Rupture center	0.99	44892.20
<input type="checkbox"/>	4	Stadium - Soft strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.87	39627.00
<input checked="" type="checkbox"/>	4	Stadium - Neutral strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.95	44017.20
<input type="checkbox"/>	4	Stadium - Hard strategy	Stadium by Wells & Coppersmith, the locus of distances from the rupture not exceeding a given value	0.99	53736.80

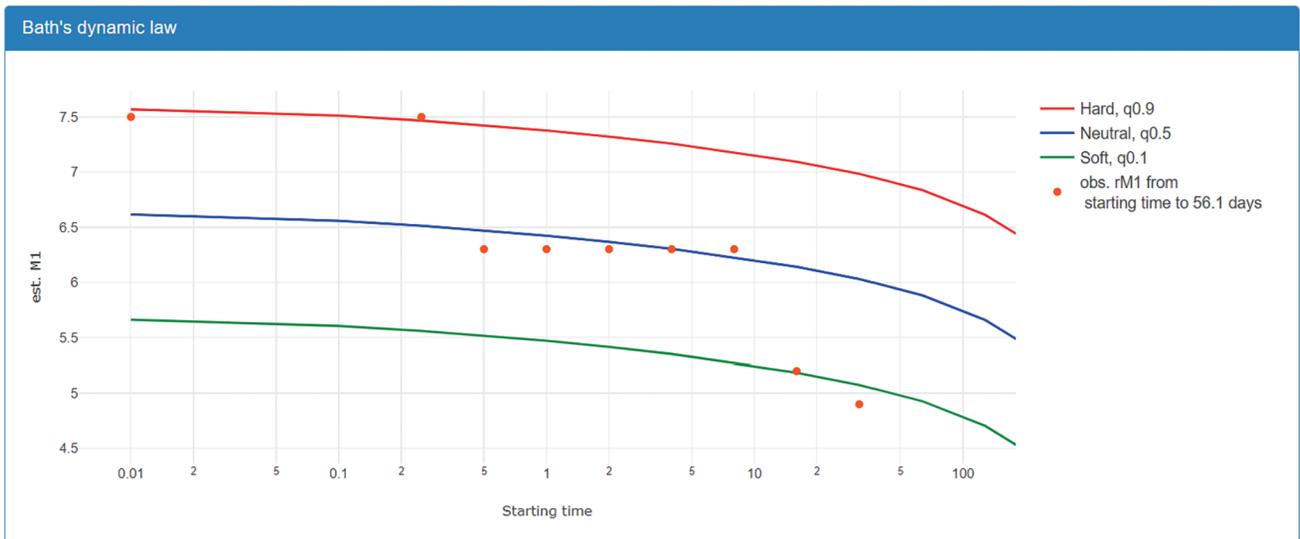


**Рис. 3.** Оценка системой Afcast области сильных афтершоков ( $M \geq 5.5$ ) по данным об основном толчке (черная окружность) и первых афтершоках (желтый цвет – оптимальный эллипс, зеленый цвет – оптимальный стадион, соответствующие нейтральной стратегии прогноза). Оранжевый кружок – основной толчок; белые кружки – представительные афтершоки, произошедшие за 0.5 сут после основного толчка (обучающее множество); красные кружки – целевые афтершоки с ( $M \geq 5.5$ ). Таблица над картой позволяет включать (выключать) отображение областей, соответствующих различным стратегиям прогноза. Интерактивная легенда слева позволяет включать (выключать) отображение соответствующих элементов на карте.

бытий во вмещающем круге, то оценки областей афтершоковой активности уточняются по методике из работы [Баранов, Шебалин, 2017]. В этом случае система Afcast рассчитывает два типа областей: оптимальные эллипс и стадион (геометрическое место точек, удаленных от заданного отрезка на расстояние, не превышающее заданную величину). Ориентация областей совпадает с ориентацией разрыва основного толчка, который определяется по представительным афтершокам за 12 ч. Центр разрыва (совпадает с центром области) определяется как центр масс системы материальных точек с координатами событий и массами, пропорциональными линейным размерам очагов ( $\sim 10^{M/2}$ ). Ориентация разрыва определяется как главная ось тензора инерции той же систе-

мы материальных точек. Длина разрыва оценивается по регрессионному соотношению из работы [Wells, Coppersmith, 1994]. Алгоритм оценки области афтершоковой активности подробно рассмотрен в работе [Баранов, Шебалин, 2017].

Размеры оптимальных эллипса и стадиона определяются исходя из степени важности прогноза по методу 3-х стратегий, основанным на анализе диаграммы ошибок, построенной по ретроспективным данным. Система Afcast рассчитывает и выдает пользователю оптимальные эллипс и стадион, соответствующие мягкой, жесткой и нейтральной стратегиям прогноза (рис. 3). Нейтральная стратегия соответствует случаю, когда вероятности пропуска сильного афтершока и ложной тревоги равноценны или



**Рис. 4.** Оценка магнитуды сильнейшего афтершока после основного толчка по динамическому закону Бота. Красные точки – фактические магнитуды сильнейших афтершоков за время Starting time – 106 сут после основного толчка (время написания статьи). Сплошными линиями показаны теоретические магнитуды сильнейшего афтершока, ожидаемого с вероятностями 0.1 (зеленая кривая), 0.5 (синяя кривая) и 0.9 (красная кривая) на интервале Starting time – 365 сут после основного толчка. Время (горизонтальная ось) показано в логарифмическом масштабе.

неизвестны, жесткую стратегию следует использовать, когда высока цена пропуска события, мягкая стратегия соответствует высокой цене поддержания тревоги относительно цены последствий пропуска события.

Для афтершоков Пазарджыкского землетрясения “нейтральная” оценка области афтершоков оказалась вполне успешной. Основная часть как непосредственных афтершоков, так и афтершоков Эльбистанского землетрясения произошла в пределах этой области.

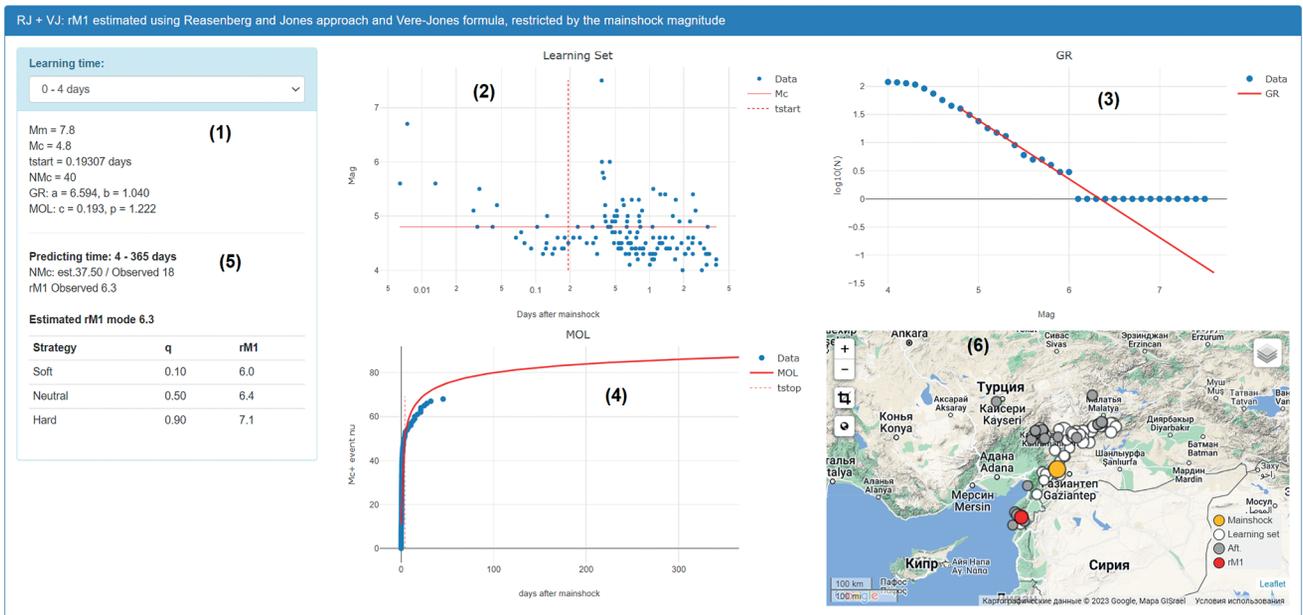
Магнитуда  $rM_1(t)$  сильнейшего на интервале  $(t, 365)$  сут афтершока оценивается системой AFCAST как по данным об основном толчке, так и по информации об афтершоках, которые произошли на интервале  $(0, t)$ .

Оценка по основному толчку, выполняется по динамическому закону Бота [Баранов, Шебалин, 2018; Vaganov et al., 2022], который теоретически обосновывает эмпирический закон Бота [Bath, 1965] и обобщает его с учетом фактора времени. Используются усредненные оценки параметров афтершоковых серий  $rM_1(0) = 1.19, b = 1.0, c = 0.04$  сут,  $p = 1.016$ . Здесь:  $rM_1(0)$  – константа закона Бота;  $b$  – параметр закона Гутенберга–Рихтера;  $c$  и  $p$  – параметры закона Омори. Оценки параметров были получены в работе [Баранов, Шебалин, 2018] по данным о 777 сериях афтершоков от землетрясений мира с магнитудой  $M \geq 6.5$ . Отметим, что методика динамического закона Бота позволяет не только оценить наиболее вероятное зна-

чение величины  $rM_1$ , но и смоделировать ее распределение, полученное комбинацией “двойной экспоненты” Вере–Джонса [Vere–Jones, 2008] и экспоненциального закона продуктивности [Shebalin et al., 2020], приводящей к логистическому распределению, по форме близкому к нормальному с неменяющимся во времени стандартным отклонением 0.66 [Vaganov et al., 2022]. Это, в свою очередь, дает возможность построения “жесткой”, “нейтральной” и “мягкой” стратегий прогноза величины  $rM_1$ .

Рис. 4 иллюстрирует полученные оценки для Пазарджыкского землетрясения, ожидаемого с вероятностями 0.1, 0.5 и 0.9 в течение года после основного толчка. На момент написания статьи (106 суток после основного толчка) 5 из 9 оценок близки к медианному прогнозу, 7 из 9 оценок находятся в пределах 80% доверительного интервала, 2 оценки незначительно выходят за границы 80% доверительного интервала (вероятности менее 0.1 или более 0.9). Наихудшими являются самые ранние и самые поздние оценки. Это означает, что в начале серии афтершоки были сильнее, а начиная с примерно двухнедельного срока после основного толчка – слабее, чем обычно.

Оценка магнитуды сильнейшего афтершока  $rM_1(t)$ , ожидаемого на интервале  $t - 365$  сут после основного толчка, по данным об афтершоках, которые произошли на интервале  $(0, t)$  проводится в системе AFCAST по методике работы [Баранов и др., 2019]. Методика аналогична методике динамического закона Бота с тем отличием, что ис-



**Рис. 5.** Оценка магнитуды сильнейшего афтершока ( $rM_1$ ) по данным за 4 сут, ожидаемого на интервале 4—365 сут после основного толчка: (1) — оценки магнитуды ( $M_c$ ) и времени ( $t_{start}$ ) полноты данных, а также параметров законов Гутенберга–Рихтера и Омори–Утсу; (2) — графическое представление данных, по которым производится оценка; (3) — график повторяемости афтершоков; (4) — график зависимости суммарного числа афтершоков от времени и его аппроксимация законом Омори–Утсу; (5) — фактическое на данный момент времени и оцененные значения  $rM_1$ , рассчитанные для вероятностей 0.1, 0.5 и 0.9; (6) — интерактивная карта, на которой показаны основной толчок и афтершоки.

пользуются Байесовские оценки параметров  $b$ ,  $c$  и  $p$ , определенные по афтершокам исследуемого землетрясения, которые произошли на интервале  $(0, t)$ .

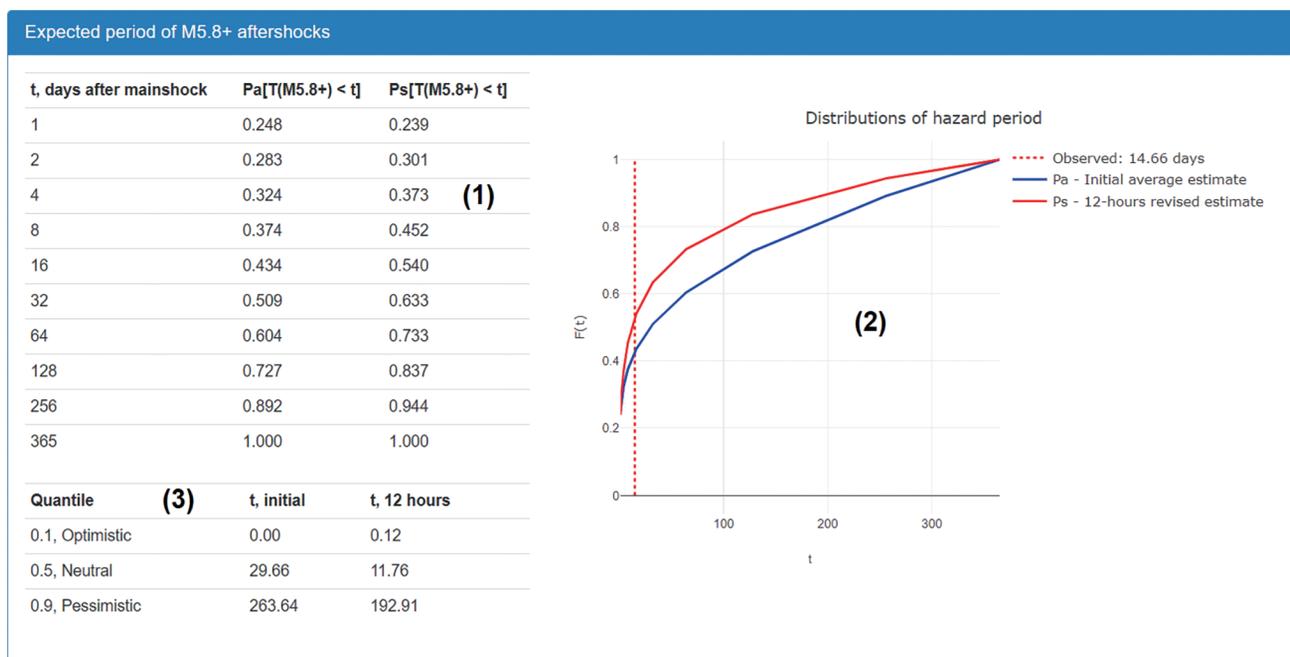
На рис. 5 показаны оценки для интервала (4—365) сут. В качестве априорных распределений использовались эмпирические распределения, полученные по данным каталога ANSS Comcat за 1980—2016 гг. Для этого интервала медианная, или “нейтральная”, оценка, почти совпадает с фактическим значением. Для других интервалов оценки также доступны в системе AFCAST. Эти оценки, в основном, несколько завышены по сравнению с наблюдаемыми значениями. Возможно, это результат некоторого занижения оценок параметра  $b$ , которое обусловлено очень большим числом афтершоков и, как следствие, неполной регистрацией более слабых афтершоков. Другое объяснение может состоять в том, что при оценке параметров в автоматизированном режиме для некоторых интервалов времени использовались данные как об афтершоках Пазарджыкского землетрясения, так и о вторичных афтершоках, вызванных через 9 ч Эльбистанским землетрясением. Использование данных о вторичных афтершоках могло повлиять на оценки.

Оценка длительности опасного периода (время последнего афтершока с магнитудой  $M \geq M_m - 2$ ) выполняется системой AFCAST как по информации об основном толчке, так и по данным об аф-

тершоках, произошедших за 12 ч после основного толчка. В работе [Шебалин, Баранов, 2019] исходя из законов продуктивности землетрясений и Омори–Утсу было выведено распределение среднего времени, в течение которого ожидаются афтершоки с магнитудой  $M \geq M_m - \Delta M$ . Как только информация о землетрясении с  $M \geq 6.5$  поступает в систему AFCAST, рассчитываются значения этой функции распределения для времен  $t = 1, 2, 4, \dots, 256, 365$  сут после основного толчка. Эти значения выдаются пользователю в табличном и графическом виде (рис. 6). Система AFCAST также выдает пользователю значения ожидаемых длительностей, соответствующих вероятностям 0.1, 0.5 и 0.9.

Система AFCAST выполняет также уточнение оценки длительности опасного периода по данным о представительных афтершоках, произошедших за 12 ч после основного толчка. Функция распределения времени, в течение которого ожидаются афтершоки с  $M \geq M_m - \Delta M$  в конкретной серии была выведена в работе [Шебалин, Баранов, 2019]. Там же приведены оценки параметров и показано, что использование данных за 12 ч обеспечивает информационный выигрыш (отношение правдоподобия полученных реализаций для двух моделей в пересчете на один прогноз) около 1.5.

По состоянию на 24.05.2023 г. (107 сут после основного толчка) последний афтершок с  $M \geq$



**Рис. 6.** Оценки распределений длительности опасного периода (время, в течение которого ожидаются афтершоки с  $M \geq M_m - 2 = 5.8$ ) для землетрясения в Турции 06.02.2023,  $M_w$  7.8, полученные по информации об основном толчке ( $P_a$ ) и по данным об афтершоках за 12 ч после основного толчка ( $P_s$ ): (1) – распределения длительности опасного периода (время, в течение которого ожидаются афтершоки с  $M \geq M_m - 2 = 5.8$ ), оцененные по информации об основном толчке ( $P_a$ ) и по данным об афтершоках за 12 ч после основного толчка ( $P_s$ ); (2) – графики функций распределения, показанных в (1); (3) – значения длительностей опасного периода, рассчитанные для вероятностей 0.1, 0.5 и 0.9.

$\geq M_m - 2 = 5.8$  был зарегистрирован через 14.7 сут после основного толчка, хотя толчки магнитудой до 4 продолжают с высокой интенсивностью относительно фоновой сейсмичности. Это значение близко к медиане распределения, оцененного по информации об афтершоках за первые 12 ч, и примерно вдвое меньше медианного значения для оценки по данным об основном толчке. Такой результат вполне соответствует наблюдавшемуся спаданию активности афтершоков, которое проходило существенно быстрее, чем обычно для землетрясений аналогичной магнитуды. Каталог ANSS ComCat для регионов вне территории США является представительным для землетрясений магнитудой 4.5 и более. Последний афтершок такой силы был зарегистрирован через 51.6 сут после основного толчка (рис. 2).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрена автоматизированная оценка, полученная системой AFCAST, афтершковой опасности, вызванной землетрясением в Турции 06.02.2023 г.,  $M_w$  7.8 (Пазарджыкское землетрясение). Система AFCAST использует данные каталога землетрясений ANSS Comcat Геологической службы США и функционирует в режи-

ме времени близком к реальному. В статье приведены оценки области, где ожидаются афтершоки с магнитудой 5.5 или выше, магнитуды ожидаемого в течение года сильнейшего афтершока и длительности опасного периода (время, в течение которого ожидаются афтершоки с  $M \geq 5.8$ ). Оценки были рассчитаны как по данным об основном толчке, так и по информации о первых афтершоках. В целом, как оказалось, полученные оценки хорошо соответствуют характеристикам серии афтершоков Пазарджыкского землетрясения, что косвенно подтверждает справедливость теоретических положений, лежащих в основе расчетов в системе AFCAST.

Проведенный анализ результатов работы автоматизированной системы показывает, что точность оценок с использованием данных о первых афтершоках может снижаться, если после анализируемого землетрясения происходит сильный повторный толчок, сопровождаемый своими непосредственными афтершоками, вторичными по отношению к основному толчку. Необходимо провести дополнительный анализ ретроспективных данных, чтобы проверить, улучшатся ли оценки, если в качестве первых афтершоков рассматривать не события во “вмещающем круге”, а только непосредственные афтершоки анализиру-

емого землетрясения. Выделение непосредственных афтершоков легко реализовать с помощью метода ближайшего соседа [Zaliapin et al., 2008].

#### ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-17-00180-П).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Баранов С.В.* Теоретические основы оценки опасности сильных афтершоков землетрясений. Дис. ... д-ра физ.-мат. наук. М. 2019. 296 с.
- Баранов А.А., Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Количественная оценка степени воздействия морских приливов на активность афтершоков в районе Камчатки // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 67–72. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019167-72>
- Баранов С.В., Павленко В.А., Шебалин П.Н.* О прогнозировании афтершоковой активности. 4. Оценка максимальной магнитуды последующих афтершоков // Физика Земли. 2019. № 4. С. 15–32.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* О прогнозировании афтершоковой активности. 2. Оценка области распространения сильных афтершоков // Физика Земли. 2017. № 3. С. 43–61. <https://doi.org/10.7868/S0002333717020028>
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* О прогнозировании афтершоковой активности. 3. Динамический закон Бота // Физика Земли. 2018. № 6. С. 129–136.
- Баранов С.В., Шебалин П.Н.* Глобальная статистика афтершоков сильных землетрясений: независимость времен и магнитуд // Вулканология и сейсмология. 2019. № 2. С. 67–76. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019267-76>
- Смирнов В.Б.* Прогностические аномалии сейсмического режима. I. Методические основы подготовки исходных данных // Геофизические исследования. 2009. Т. 10. № 2. С. 7–22.
- Шебалин П.Н.* Математические методы анализа и прогноза афтершоков землетрясений: необходимость смены парадигмы // Чебышевский сборник. 2018. Т. 19(4). С. 227–242. <https://doi.org/10.22405/2226-8383-2018-19-4-227-242>
- Шебалин П.Н., Баранов С.В.* Экспресс оценивание опасности сильных афтершоков района Камчатки и Курильских островов // Вулканология и сейсмология. 2017. № 4. С. 57–66. <https://doi.org/10.7868/S0203030617040046>
- Шебалин П.Н., Баранов С.В.* О прогнозировании афтершоковой активности. 5. Оценка длительности опасного периода // Физика Земли. 2019. № 5. С. 22–37.
- Шебалин П.Н., Баранов С.В., Дзобоев Б.А.* Закон повторяемости количества афтершоков // Докл. РАН. 2018. Т. 481. № 3. С. 320–323. <https://doi.org/10.31857/S086956520001387-8>
- ANSS Comprehensive Earthquake Catalog (ComCat) URL: <https://earthquake.usgs.gov/data/comcat/>
- Baranov S.V., Narteau C., Shebalin P.N.* Modeling and Prediction of Aftershock Activity // *Surveys in Geophysics*. 2022. V. 43. № 2. P. 437–481. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09698-0>
- Bath M.* Lateral inhomogeneities in the upper mantle // *Tectonophysics*. 1965. V. 2. P. 483–514.
- Dal Zilio L., Ampuero J.-P.* Earthquake doublet in Turkey and Syria // *Communications Earth & Environment*. 2023. V. 4(71). <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00747-z>
- Di Giacomo D., Engdahl E.R., Storchak D.A.* The ISC-GEM Earthquake Catalogue (1904–2014): status after the Extension Project // *Earth Syst. Sci. Data*. 2018. V. 10. P. 1877–1899. <https://doi.org/10.5194/essd-10-1877-2018>
- Erdik M., Tümsa M.B.D., Pınar A., Altunel E., Zülfikar A.C.* A preliminary report on the February 6, 2023 earthquakes in Türkiye, <https://doi.org/10.32858/temblor.297> (дата обращения: 22.05.2023).
- Molchan G.M., Dmitrieva O.E.* Aftershock identification: methods and new approaches // *Geophysical J. International*. 1992. V. 109. P. 501–516. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1992.tb00113.x>
- Shebalin P., Baranov S.* Long-Delayed Aftershocks in New Zealand and the 2016 M7.8 Kaikoura Earthquake // *Pure and Applied Geophysics*. 2017. V. 174. P. 3751–3764. <https://doi.org/10.1007/s00024-017-1608-9>
- Shebalin P., Baranov S., Vorobieva I.* Earthquake Productivity Law in a Wide Magnitude Range // *Frontiers in Earth Science*. 2022. V. 10. Article 881425. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.881425>
- Shebalin P., Narteau C.* Depth dependent stress revealed by aftershocks // *Nature Communications*. 2017. V. 8. Article 1317. <https://doi.org/10.1038/s41467-017-01446-y>
- Shebalin P.N., Narteau C., Baranov S.V.* Earthquake productivity law // *Geophysical Journal International*. 2020. V. 222. № 2. P. 1264–1269. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa252>
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Bondár I., Engdahl E.R., Harris J., Lee W.H.K., Villaseñor A., Bormann P.* Public Release of the ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009) // *Seismological Research Letters*. 2013. V. 84(5). P. 810–815. <https://doi.org/10.1785/0220130034>
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A.* The ISC-GEM Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009): Introduction // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. 2015. V. 239. P. 48–63. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2014.06.009>
- Vere-Jones D.* A limit theorem with application to Båth's law in seismology // *Advances in Applied Probability*. 2008. V. 40. № 3. P. 882–896.
- Wells D.L., Coppersmith K.J.* New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area, and surface displacement // *Bulletin of the Seismological Society of America*. 1994. V. 84. № 4. P. 974–1002.
- Zaliapin I., Gabrielov A., Keilis-Borok V., Wong H.*, 2008. Clustering analysis of seismicity and aftershock identification // *Phys. Rev. Lett.* 2008. V. 101(1). P. 018501.

## Automated Assessment of Hazards of Aftershocks of the $M_w$ 7.8 Earthquake in Turkey of February 6, 2023

S. V. Baranov<sup>a, b, \*</sup>, P. N. Shebalin<sup>b, \*\*</sup>, I. A. Vorobieva<sup>b</sup>, and O. V. Selyutskaya<sup>b</sup>

<sup>a</sup>*Kola Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia*

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

*\*e-mail: bars.vl@gmail.com*

*\*\*e-mail: p.n.shebalin@gmail.com*

**Abstract**—This paper analyzes the use of the automated aftershock hazards assessment system (AFCAST) through the example of a series of aftershocks of the  $M_w$  7.8 earthquake in Turkey of February 6, 2023 (the Pazarcik earthquake). The paper presents automated estimates of the aftershock activity area, the magnitude of the strongest aftershock, and the duration of the hazardous period, yielded using data on the main shock and on the first aftershocks.

*Keywords:* Pazarcik earthquake, aftershocks, hazard assessment