

УДК 550.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ МИГРАЦИИ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ В РЕГИОНЕ МРАМОРНОГО МОРЯ, ТУРЦИЯ

© 2021 г. Хакан Караджа*

Факультет археологии, Университет Niğde Ömer Halisdemir, Нигде, Турция

*E-mail: karaca26@hotmail.com

Поступила в редакцию 09.09.2020 г.

После доработки 12.10.2020 г.

Принята к публикации 16.12.2020 г.

Закономерности миграции землетрясений могут быть связаны с существующей геофизической обстановкой, тектоническими движениями и географическим распределением сейсмичности. Выявление этих закономерностей позволит повысить качество анализа сейсмической опасности и прогноза сейсмичности, а также повысить точность предсказания землетрясений. В настоящей работе делается попытка разработать метод для определения модели миграции сейсмичности на примере региона Мраморного моря Турции. Сейсмичность рассматриваемого региона является результатом движения смежных тектонических плит по системе разломов, образующих Северо-Анатолийскую разломную зону (САР). Целью исследования было установить, существует ли поддающаяся выявлению закономерность в миграции землетрясений в направлении движения плит. В качестве единственного предположения принято, что миграция землетрясений, если она существует, следует Марковскому закону. Результаты исследования позволили не только установить характер возникновения сейсмичности, но и определить геофизические процессы, вызывающие землетрясения.

Ключевые слова: землетрясения, Северо-Анатолийский разлом, миграция, Марковский процесс.

DOI: 10.31857/S000233372106003X

1. ВВЕДЕНИЕ

Район исследования, расположенный в западной оконечности Северо-Анатолийского разлома, выделяется высокой частотой возникновения сейсмических событий. Значительный международный интерес вызвали два крупных землетрясения, последовательно произошедших в гг. Измит ($M_w = 7.6$) и Дюздже (Düzce) ($M_w = 7.2$) 17.08 и 12.11.1999 г. Эти сейсмические события стали предметом ряда исследований, направленных на выявление основных механизмов, вызывающих эти землетрясения, и установление природы высокой сейсмической активности вдоль САР. Тщательное изучение механизмов генерации землетрясений САР [Bohnhoff et al., 2016; Ergintav et al., 2014; Pondard et al., 2007; Lorenzo-Martin et al., 2006; Sengor et al., 2005 и ссылки на публикации в указанной статье; Duman et al., 2005; Cakir et al., 2003; Hubert-Ferrari et al., 2002; Stein et al., 1997] позволило получить большой объем знаний об исследуемых объектах. В качестве одной из главных целей исследований было обозначено выявление пространственной взаимосвязи сейсмичности главным образом путем анализа схем накопления и сброса напряжений. Исследования, основанные на GPS-измерениях подвижек по си-

стеме разломов [Ergintav et al., 2014, и ссылки в указанной статье], выявили эти схемы. Согласно этим исследованиям, локальные разломы вдоль САР, принадлежащие к одной и той же системе, совместно генерируют сейсмичность, возникновение которой происходит по последовательной схеме. Последовательный характер возникновения сильных землетрясений вдоль САР выражен настолько ярко, что эту особенность сейсмичности САР часто используют в демонстрационных целях [Sengor et al., 2005 и ссылки в указанной статье].

Таким образом, естественно предположить, что математическое моделирование последовательной схемы возникновения сейсмических событий вдоль разлома позволит выявить поведение системы разломов и откроет возможность построения более надежного прогноза сейсмичности. Среди нескольких методов, предложенных для математического моделирования последовательных процессов, идеальным выбором являются цепи Маркова, поскольку их можно использовать для моделирования пространственной взаимосвязи землетрясений с учетом времен возникновения и магнитуд последовательных событий [Nava et al., 2005; Unal, Celebioglu, 2011; Cavers, Vesudevan, 2015].

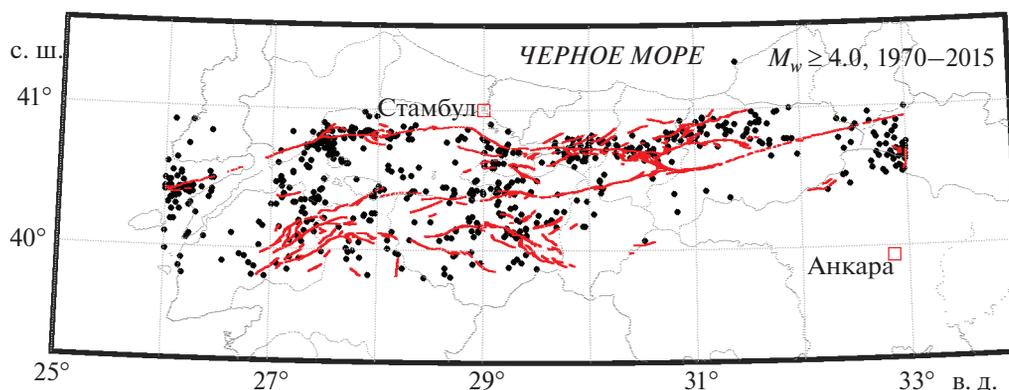


Рис. 1. Западная часть САР и сейсмичность в сейсмогенной зоне Мраморного моря между 27.0°, 32.0° восточной долготы и 39.8°, 41.0° северной широты.

На основе полученных представлений о том, каким образом САР генерирует наблюдаемую пространственно-временную картину возникновения сейсмичности, которая предполагается последовательной, в настоящей работе основное внимание сосредоточено на математическом моделировании схем миграции землетрясений и изучении основных геологических и геофизических процессов, определяющих моделируемые закономерности миграции. В работе рассматривается западная часть САР для изучения и моделирования взаимодействия между двумя сильными землетрясениями Измит и Дюздже и землетрясениями меньшей магнитуды. Минимальный порог магнитуды принят равным 4.0 в единицах моментной магнитуды; область исследования ограничена линиями 27.0°, 32.0° восточной долготы и 39.8°, 41.0° северной широты. С учетом локальных изменений напряжений, связанных с событиями большой магнитуды, и того факта, что любое сейсмическое событие может произойти по обе стороны от события большой магнитуды вдоль разлома и может размыть структуру миграции, если таковая существует, землетрясения меньшей магнитуды могут помочь лучше понять картину миграции. Ограничивая площадь исследования, мы выделяем участок разлома, менее подверженный локальным изменениям поля напряжений по сравнению с более крупными областями системы разломов САР.

Результаты настоящей работы согласуются с выводами предыдущих исследований о миграции землетрясений в западном направлении вдоль системы разломов, особенно отчетливо выраженной перед землетрясением в Измите 17.08.1999 г., хотя после этого события выявлено распространение сейсмичности также в восточном направлении. Полученные результаты представляются заслуживающими дальнейшего исследования.

2. ДАННЫЕ И МЕТОД

Взаимодействие землетрясений вдоль разлома может объясняться геометрическими и геологическими соотношениями между сегментами разлома, подвижками по плоскостям смещения и, таким образом, существованием различных механизмов, вызывающих землетрясения. Действительно, могут одновременно работать несколько механизмов, определяющих взаимодействие событий. С точки зрения взаимодействия землетрясений вдоль разлома, САР является хорошо изученной системой разломов. Для такой системы пространственное взаимодействие сейсмических событий и схемы миграции сейсмичности целесообразно исследовать математическими методами и получить соответствующие количественные оценки.

С этой целью было выполнено исследование предшествующей сейсмичности в области, ограниченной линиями 27.0°, 32.0° восточной долготы и 39.8°, 41.0° северной широты (рис. 1). В пределах рассматриваемой области САР протягивается от Дюздже до Измита и затем разделяется на две ветви — северную, уходящую в Мраморное море, и южную, ориентированную в направлении северо-восток—юго-запад. Эти две ветви окаймляют *pull-apart* бассейн в районе Мраморного моря, который испытывает деформацию растяжения, выраженную преимущественно в южной ветви САР (ЮСАР), и поперечную деформацию вдоль северной ветви САР (ССАР) [Flerit, 2003].

Для исследования сейсмичности за предшествующий период были использованы данные исследовательской обсерватории Кандилли начиная с 1970 г. (boun.edu.tr/sismo/zeqdb, дата обращения 31.01.2020 г.) и выбранные землетрясения с магнитудами 4.0 и выше. Приведение каталога к однородной параметризации событий по магнитуде выполняется с помощью уравнений, предложенных в работе [Akcar et al., 2010]; декластериза-

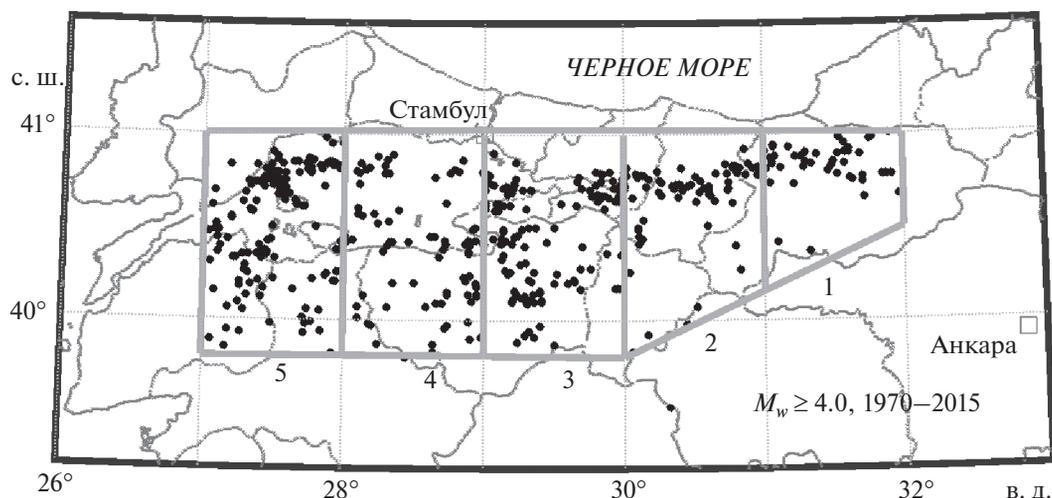


Рис. 2. Разбиение области исследования (рис. 1) на пять участков.

ция проводится на основе метода из работы [Gardner, Knophoff, 1974].

Всего было выделено 491 событие с моментной магнитудой 4.0 и выше. Тридцать из этих событий имеют магнитуду 5.0 и более и два события имеют магнитуду 7 и более. Чтобы установить, существует ли закономерность миграции сейсмичности, было выполнено моделирование перехода сейсмичности от региона к региону путем разбиения исследуемой области на одинаковые блоки (элементы) с разным масштабом разбиения для каждой схемы миграции. Размер участков разбиения по долготе в разных схемах миграции варьировал от 1° долготы (рис. 2) до 0.025° долготы, как видно из табл. 1.

Переменный размер элементов разбиения задавался для того, чтобы установить, чувствительна ли модель миграции к размеру элемента разбиения. Исследуемая область разбивалась на различное количество элементов по долготе с соответствующим количеством участков. Всего было разработано семь схем миграции. В первой схеме область исследования была разделена на пять участков, каждый из которых покрывал один градус долготы, как показано на рис. 2. В каждой последующей схеме миграции количество участков увеличивалось, а размер элемента разбиения уменьшался. Для схем 2–7 область, ограниченная линией на рис. 2, разделялась на несколько участков, каждый элемент разбиения которого покрывал заданный интервал долготы в соответствии с табл. 1.

Далее, для количественной оценки миграции в каждой схеме использовались модели Марковских цепей. Подсчитывалось пространственное перемещение или переход событий от одного элемента разбиения к другому и оценивалась вероят-

ность перехода путем деления количества переходов между конкретными элементами разбиения на общее количество переходов в соответствии со следующей формулой:

$$a_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^K \{z_{k-1} = s_i \wedge z_k = s_j\}}{\sum_{k=1}^K \{z_{k-1} = s_i\}}, \quad (1)$$

где: a_{ij} – вероятность перехода из состояния i в состояние j ; z – серия состояний, порождаемых каждым землетрясением; s – возникновение землетрясения в одном из элементов i или j . Вероятность перехода a_{ij} вычисляется путем определения количества переходов из состояния i в состояние j , деленного на общее количество раз, когда наблюдается состояние i . Иными словами, вероятность перехода a_{ij} – это количество случаев, ко-

Таблица 1. Схемы миграции с соответствующим количеством участков разбиения и размером каждого участка по долготе

Схема миграции	Количество участков разбиения	Размер участка по долготе (в градусах)
1	5	1.000
2	10	0.500
3	20	0.250
4	40	0.125
5	50	0.100
6	100	0.050
7	200	0.025

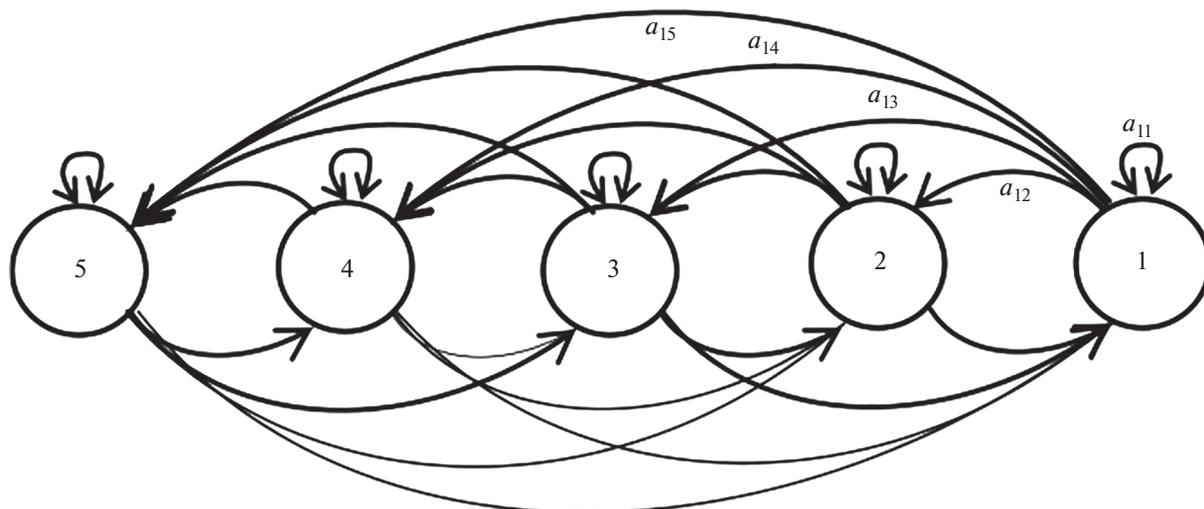


Рис. 3. Диаграмма перехода для миграции землетрясений в схеме 1.

гда процесс находится в состоянии i , а его последующее состояние — j .

Рисунок 2 и рис. 3 позволяют лучше понять схемы миграции. Рисунок 2 показывает, как генерируются участки путем разбиения области исследования для схемы миграции 1, а диаграмма на рис. 3 показывает модели перехода землетрясений между сгенерированными участками. Для более наглядной иллюстрации показана матрица перехода уравнения (2), каждый элемент (i, j) которой представляет собой количество переходов из состояния i в состояние j и соответствующие вероятности.

$$S = \begin{bmatrix} 7 & 13 & 9 & 7 & 10 \\ 6 & 9 & 28 & 10 & 30 \\ 8 & 22 & 33 & 24 & 42 \\ 9 & 11 & 15 & 13 & 33 \\ 16 & 27 & 45 & 27 & 36 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Продвижение сейсмичности с востока на запад и с запада на восток рассчитывалось путем суммирования числа событий в верхней и нижней части матрицы перехода. Формула (3) описывает правило расчета коэффициентов миграции (интенсивности потока миграции). В этой формуле m_{ew} обозначает миграцию с востока на запад, m_{we} — миграцию с запада на восток, а m_d представляет собой общую интенсивность потока миграции землетрясений в пределах участка. Эти процедуры были выполнены для всех семи схем миграции и определена интенсивность потока землетрясений с каждого направления.

$$\begin{cases} m_{ew} \\ m_{we} \\ m_d \end{cases} = \left\{ \begin{array}{l} \text{norm} \left(\sum_1^n \sum_1^n a_{ij}, j > i \right) \\ \text{norm} \left(\sum_1^n \sum_1^n a_{ij}, j < i \right) \\ \text{norm} \left(\sum_1^n \sum_1^n a_{ij}, j = i \right) \end{array} \right\}. \quad (3)$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ АНАЛИЗА И ДАЛЬНЕЙШЕЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВДОЛЬ СЕВЕРНОЙ ВЕТВИ САР (ССАР)

Интенсивность миграции землетрясений для каждой схемы можно проследить на рис. 4. Как видно из рисунка, для схемы 1 интенсивность потока миграции составляет 51% в направлении с востока на запад (m_{ew}) и 30% в направлении с запада на восток (m_{we}). По мере увеличения количества участков разбиения поток миграции увеличивается в обоих направлениях в каждой последовательной схеме, в то время как миграция внутри участков уменьшается.

Здесь следует уточнить одно обстоятельство. График миграции на рис. 4 позволяет выявить общие тенденции в картине возникновения землетрясений; однако возникает вопрос, не могло ли землетрясение, которое произошло в самой восточной части области, инициировать новое землетрясение в самых западных ветвях — в обход целых ветвей разлома или наоборот. Поэтому для более надежного сопоставления с механизмами возникновения землетрясений, накопления напряженно-деформированного состояния за счет асейсмического скольжения по разломам и сброс-

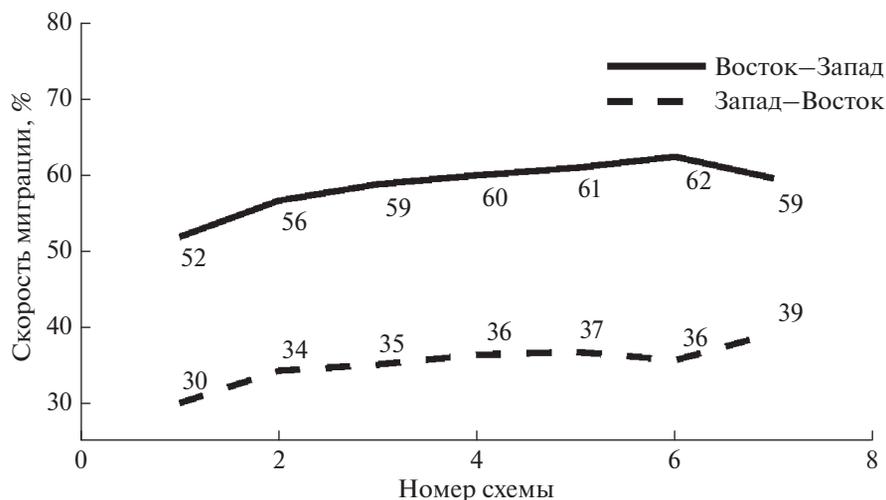


Рис. 4. Процент землетрясений, мигрирующих в каждом направлении для каждой схемы миграции.

са накопленных напряжений, которые могут являться триггерами новых землетрясений, область исследования была сужена до северной ветви САР (ССАР) в пределах 27.0° , 32.0° восточной долготы и 40.5° , 41.0° северной широты.

Область ССАР отличается высокой сейсмичностью и широко известна двумя землетрясениями большой магнитуды, вызвавшими крупномасштабные разрушения в населенных пунктах. Кроме того, указанные сильные землетрясения, которые произошли в гг. Измит и Дюздже 17.08 и 12.11.1999 г., соответственно, привели к возникновению периода высокой сейсмической активности в непосредственной близости от указанных пунктов. Примечательно, что землетрясение в Дюздже является последним землетрясением этого типа в пределах более крупного САР: после этого землетрясения распространение сейсмических событий в западном направлении прекратилось. До землетрясения в г. Дюздже последовательное продвижение крупных сейсмических событий в западном направлении вызывало тревогу населения в связи с ожиданием неминуемого землетрясения в непосредственной близости от Стамбула.

Для исследования характера миграции вдоль ССАР сегменты разлома были сгруппированы в соответствии с их механизмами смещений. Затем для изучения закономерностей миграции были выбраны области, ограниченные 27° E– 32° E, 28.5° E– 29.50° E и 29.5° E– 32.0° E, идентифицируемые по характерному типу смещений по разлому. В области между 28.5° и 29.5° преобладают сбросы, а в западной и восточной части системы разломов смещения имеют сдвиговый характер. Кроме того, геометрический барьер, образованный сбросами в пределах участка между 28.5° E и 29.5° E, действует как механизм, блокирующий

смещение, тем самым создавая крупный дефицит величины смещения по всей длине этого барьера [Pondard et al., 2007]. Различие в геометрической и структурной конфигурации выбранных участков является основной причиной использования описанной схемы для изучения закономерностей миграции, поскольку никакие другие характеристики ССАР не позволяют осуществить более четкое разбиение исследуемой области на элементы.

Различие кинематических типов подвижки по разломам определило следующий этап исследования картины миграции землетрясений, для всей области на рис. 5 и для ее подобластей был выполнен анализ миграции согласно процедурам, заданным формулой (2). Полученная картина миграции для всей области указывает на перенос сейсмичности с востока на запад, однако существуют и признаки группирования нескольких разломов, действующих на одном и том же участке миграции (рис. 6). В частности, картина миграции для участка Измит–Дюздже (29.5° E– 32.0° E) существенно отличается от участка, включающего разлом Адалар (28.5° E– 32.0° E), что приводит к выводу о том, что землетрясения в пределах этого участка миграции генерируются сдвиговыми разломами на участке Измит–Дюздже. Действительно, различие картин миграции землетрясений также предполагает существование точки прекращения продвижения сейсмичности в той области, где в 1999 г. произошло Измитское землетрясение. Этот вывод согласуется и с работой [Pondard et al., 2007], где утверждается, что процесс последовательного возникновения землетрясений вдоль САР в настоящее время остановился в восточной части Мраморного моря и вблизи г. Стамбул наблюдается сейсмическое затишье [Ergintav et al., 2014; Vohnhoff et al., 2013].

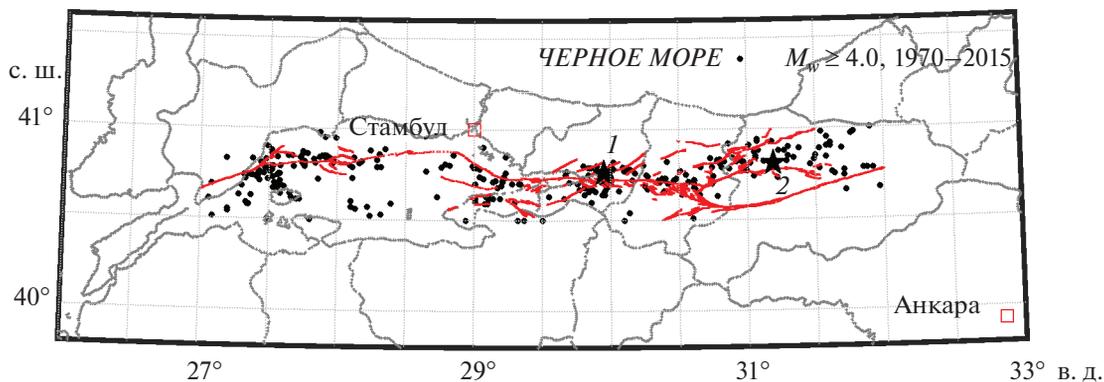


Рис. 5. Северная ветвь САР (звездочки с номерами 1 и 2 обозначают землетрясение в г. Измит 17.08.1999 г. и в г. Дюздже 12.11.1999 г., соответственно).

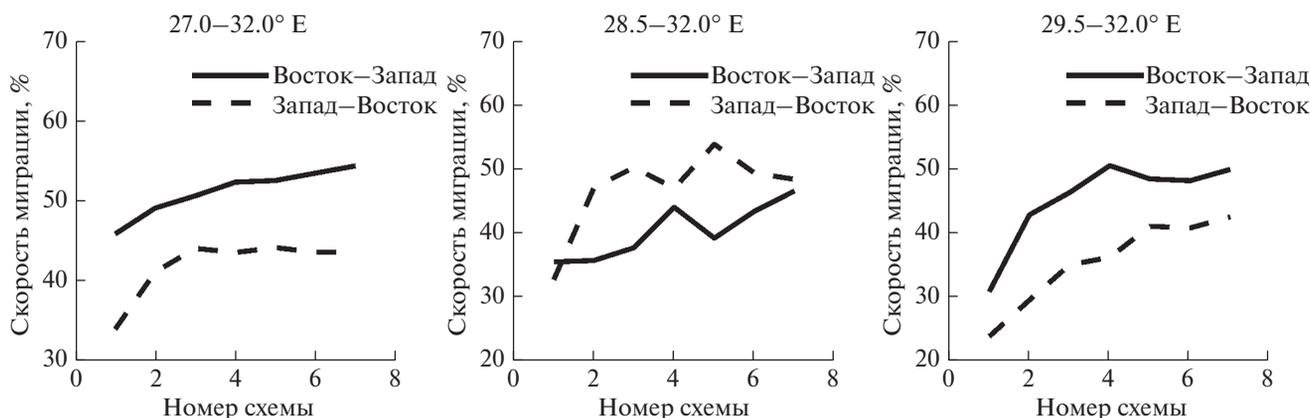


Рис. 6. Картина миграции в разных участках разбегания ($M_w \geq 4.0$).

Действительно, известно, что сложные разломные, геометрические и геологические структуры Мраморного моря являются препятствием миграции сейсмичности, поскольку они могут блокировать или задерживать распространение землетрясений [Pondard et al., 2007; Armijo et al., 2002].

Рисунок 7 иллюстрирует явление миграции землетрясений на участке Измит–Дюздже, где в 1999 г. произошли два разрушительных землетрясения. Возникновение землетрясения Дюздже вскоре после землетрясения в Измите к западу от эпицентра последнего не оправдало ожиданий большинства исследователей. Кроме того, ранее относительно спокойная в сейсмическом отношении часть ССАР после землетрясения в Дюздже стала высокосейсмичной областью, а направление миграции сейсмических событий вдоль системы разломов САР изменилось с направления с востока на запад на противоположное направление – с запада на восток.

Для объяснения этого явления в ряде работ [Bohnhoff et al., 2008; Duman et al., 2005] была исследована динамика возникновения землетрясений в Измите и Дюздже. Согласно работе [Armijo et al., 2000], сейсмический разрыв землетрясения Дюздже в своей западной оконечности начался там, где закончился на востоке разрыв Измитского землетрясения. Очевидно, что напряжения, перенос которых был осуществлен сейсмическим разрывом Измитского землетрясения, не могли проявиться в виде более слабых землетрясений и, в конечном итоге, их сброс был реализован сильным землетрясением, в то время как после землетрясения Дюздже в его районе произошло несколько сейсмических событий небольшой магнитуды. Афтершоковая активность, которая концентрировалась к востоку от эпицентра Измитского землетрясения и была вызвана распространением разрыва преимущественно на восток [Bohnhoff et al., 2008], может рассматриваться как дополнительное свидетельство взаимодействия между двумя крупными землетрясениями.

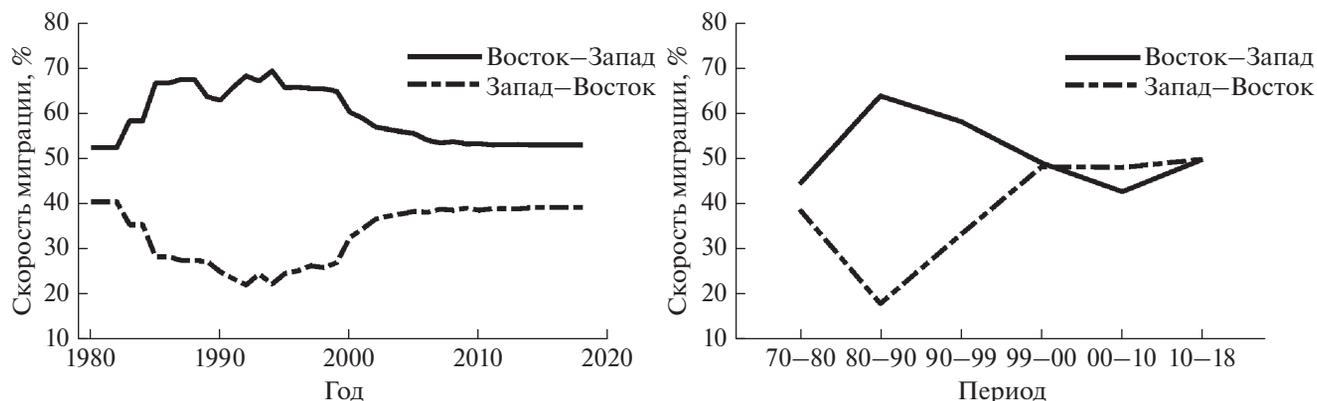


Рис. 7. Годовая кумулятивная интенсивность потока миграции землетрясений (слева) и интенсивность потока миграции за периоды по годам (справа) для схемы 7 вдоль САР для области, включающей эпицентры землетрясений в Измите и Дюздже (между 27.0° E и 32.0° E, $M_w \geq 4.0$).

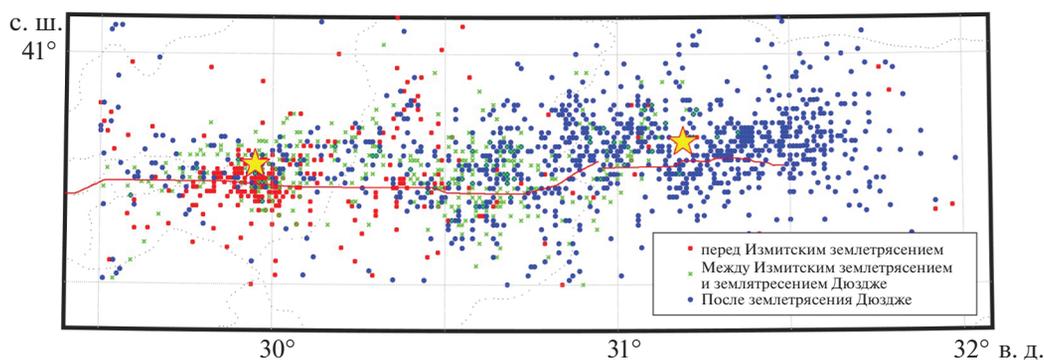


Рис. 8. Последовательности форшоков и афтершоков между эпицентрами землетрясений в Измите 17.08.1999 г. ($M_w = 7.6$) и Дюздже 12.11.1999 г. ($M_w = 7.2$).

Дальнейшие исследования афтершоковых и форшоковых последовательностей землетрясений Измит и Дюздже также выявили направление миграционных процессов. Согласно результатам, полученным многими авторами [Erdik, 2000; Tibi et al., 2001; Ito et al., 2002; Polat et al., 2002; Ozalaybey, 2002; Sakir et al., 2003], афтершоковые последовательности Измитского землетрясения протягиваются на восток до региона, где произошло землетрясение Дюздже. Участки САР восточнее Измитского землетрясения как бы пытаются догнать удаляющиеся участки на западе от этого землетрясения.

Геофизические процессы, определяющие взаимосвязь между двумя обсуждаемыми сейсмическими событиями и разворот направления миграции, можно также объяснить с точки зрения деформаций. Землетрясение в Измите вызвало значительную деформацию в виде косейсмических и постсейсмических смещений [Sakir et al., 2003; Reilinger et al., 2000]. Вследствие крупного смещения, вызванного Измитским землетрясе-

нием, которое выразилось в виде дефицита смещения к востоку от эпицентра Измитского землетрясения, система разломов, по-видимому, вызвала большое количество землетрясений разной магнитуды на рассматриваемом участке, самым мощным среди которых было землетрясение Дюздже. Иными словами, существенный дефицит сейсмического смещения вдоль восточных участков Измитского землетрясения снимается за счет афтершоковой активности, имевшей место между эпицентрами землетрясений в Измите и Дюздже (рис. 8). Следует отметить, что эти землетрясения настолько близки как во времени, так и в пространстве, что указанные афтершоки можно рассматривать как форшоки землетрясения в Дюздже. Таким образом, математически доказанная инверсия картины миграции может быть связана с геофизическими процессами, которые также предполагают, что общим трендом является миграция землетрясений с запада на восток.

Наконец, следует упомянуть еще одно немаловажное обстоятельство: до тех пор, пока движе-

ние плит вдоль разлома остается неизменным, следует ожидать, что в определенный момент картина миграции насыщается и в долгосрочной перспективе начинает повторяться. Какие-то события неизбежно создадут эффект домино и передадут напряжения дальше на запад и будут происходить события, подобные землетрясению Дюздже, поскольку часть плиты вдоль границы разлома может иметь тенденцию “догонять” более западную движущуюся часть плиты.

В этом контексте можно сказать, что попытка спрогнозировать будущее поведение сейсмичности приведет к стационарной модели миграции, если принять во внимание стационарный характер Марковских процессов. Действительно, математическое построение модели будущего поведения процесса, которое в конечном итоге становится стационарным, довольно близко к моделированию явления землетрясения. Например, схема миграции 1, которая содержит пять участков разбиения (рис. 2), имеет следующие вероятности перехода:

$$P(S_i) = \begin{bmatrix} 0.1522 & 0.2826 & 0.1957 & 0.1522 & 0.2174 \\ 0.0723 & 0.1084 & 0.3373 & 0.1205 & 0.3614 \\ 0.0620 & 0.1705 & 0.2558 & 0.1860 & 0.3256 \\ 0.1111 & 0.1358 & 0.1852 & 0.1605 & 0.4074 \\ 0.1060 & 0.1788 & 0.2980 & 0.1788 & 0.2384 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Стационарное распределение этого процесса имеет следующий вид:

$$S_{1st} = [0.0939 \ 0.1675 \ 0.2651 \ 0.1654 \ 0.3081]. \quad (5)$$

Здесь следует отметить, что матрица вероятностей переходов и соответствующее стационарное распределение формируются с использованием 490 переходов. Общее количество землетрясений, использованных для получения этой схемы перехода, составляет 491. Учитывая несоответствие между схемой перехода и распределением состояний из-за отсутствия перехода в начальном состоянии и в конечном состоянии, следует ожидать небольшое различие между стационарным распределением и вероятностью каждого состояния. Фактически, количество землетрясений в пределах каждого участка и, следовательно, частота состояний задаются выражением

$$N_1 = [46 \ 83 \ 130 \ 81 \ 151]$$

с соответствующими вероятностями, которые могут быть выражены как вероятность возникновения землетрясений в пределах каждого участка:

$$P_1 = [0.0937 \ 0.1690 \ 0.2648 \ 0.1650 \ 0.3075].$$

В результате доказана эргодичность процесса и подтверждена стационарность явления миграции землетрясений.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Сейсмогенный район, в пределах которого предполагается более тесная взаимосвязь между всеми сейсмическими событиями, можно рассматривать как сейсмический остров. Район настоящего исследования — западная часть САР, ограниченная линиями долготы 27.0° E , 32.0° E и широты 39.8° N , 41.0° N , также является таким островом, в пределах которого происходит единый геофизический процесс — движение плит относительно друг друга в направлении с востока на запад, вызывающее весь комплекс наблюдаемой здесь сейсмичности. Иными словами, смещения и, следовательно, накопление напряжений и землетрясения вдоль разлома обусловлены движением Анатолийской плиты на запад относительно неподвижной Евразийской плиты. В таких условиях можно ожидать типичную картину возникновения землетрясений, поскольку накопленные деформации можно легко определить как причину сейсмического события. Уже сам по себе этот факт дает представление о распространении сейсмической активности, следующей некоторой закономерности.

Фактически, в пределах САР существуют сегменты с асейсмическим скольжением, барьеры, удерживающие накапливающуюся деформацию до тех пор, пока сильное землетрясение не окажется способным прорвать этот барьер, и участки, генерирующие события меньшей магнитуды в процессе высвобождения накопленных деформаций. С учетом всей сложности этой природной системы, САР и его часть в регионе Мраморного моря представляют собой лабораторию вариантов для исследования миграции землетрясений.

Действительно, результаты данного исследования подтверждают первоначальное предположение о том, что возникновение землетрясений следует схеме миграции сейсмичности, соответствующей структуре взаимодействия плит. Несмотря на то, что существует вероятность, что землетрясения меньшей магнитуды ($M_w < 5.0$) могут размывать картину миграции вследствие локальных изменений напряжений, получение такой миграционной картины является весьма перспективным результатом. В частности, математическое моделирование модели миграции сейсмичности в направлении с запада на восток после землетрясения в Измите 17.08.1999 г., возникновение землетрясения 11.10.1999 г. и более поздних событий хорошо согласуется с выявленными геофизическими процессами. Следовательно, несмотря на ограничения, связанные с селекцией исходных данных как по диапазону магнитуд, так и по количеству событий большой магнитуды, выявление такой закономерности миграции землетрясений является важным результатом.

Другой вывод состоит в том, что математическое моделирование схем миграции может дать представление о характере взаимодействия плит. Такая модель может быть использована для локализации механизмов накопления и разрядки напряжений, включая барьеры с высоким уровнем накопленных напряжений и деформаций. В частности, непрерывная миграция событий до разворота потока миграции в 1999 г. может быть использована для раннего обнаружения будущих событий вдоль разлома. Кроме того, разворот потока миграции сейсмичности может быть использован и как признак землетрясения в Дюздже. Таким образом, математическое моделирование миграции землетрясений с учетом соответствующих геофизических процессов не только позволило бы выявлять пространственно-временные закономерности возникновения землетрясений, но могло бы служить полезной основой при прогнозировании будущих событий.

Для выявления моделей миграции землетрясений мог бы оказаться полезным дальнейший анализ последовательности событий с учетом интервала времени между событиями, расстояний между событиями и магнитуд событий в исследуемой последовательности. Конечно, последовательная миграция может происходить независимо от магнитуд событий, участвующих в процессе миграции, и времени между этими событиями. Однако комбинация этих двух параметров и расстояний между событиями позволяет более точно установить последовательность миграции. Следовательно, дальнейшие исследования должны включать все три параметра и учитывать их совокупный эффект для более точного определения моделей миграции сейсмичности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Akkar S., Cagnan Z., Yenier E., Erdogan E., Sandikkaya M.A., Gulkan P.* The recently compiled Turkish Strong-Motion Database: Preliminary investigation for seismological parameters // *J. Seismol.* 2010. V. 14. P. 457–479.
- Armijo R., Meyer B., Barka A., Chabaliere J.B., Hubert-Ferrari A., Cakir Z.* The fault breaks of the 1999 earthquakes in Turkey and the tectonic evolution of the Sea of Marmara: a summary. The 1999 Izmit and Düzce Earthquakes: Preliminary results. Istanbul: Istanbul Technical Univ. Press. 2000. P. 55–62.
- Armijo R., Meyer B., Navarro S., King G.C.P.* The propagation process of North Anatolian Fault and the Evolution of the Sea of Marmara pull-apart. AGU Meeting Proc. 2002.
- Bohnhoff M., Bulut F., Aktar M., Childs D., Dresen G.* The North Anatolian fault zone in the broader Istanbul/Marmara region: Monitoring a 'seismic gap' // *Seismol. Res. Lett.* 2008. V. 79. № 2.
- Bohnhoff M., Martinez-Garzon P., Bulut F., Stierle E., Ben-Zion Y.* Maximum earthquake magnitudes along different sections of the North Anatolian fault zone // *Tectonophysics.* 2016. V. 674. P. 147–165.
- Cavers M., Vesuddevan K.* Spatio-temporal complex Markov chain (SCMC) model using directed graphs: earthquake sequencing // *Pure Appl. Geophys.* 2015. V. 172. № 2. P. 225–241.
- Cakir Z., Barka A.A., Evren E.* Coulomb stress interactions and the 1999 Marmara earthquakes // *Turkish J. Earth Sci.* 2003. V. 12. P. 91–103.
- Duman T., Emre O.D., Ozalp S.* Step-over and bend structures along the 1999 Duzce earthquake surface rupture, North Anatolian Fault, Turkey // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2005. V. 95. P. 1250–1262. <https://doi.org/10.1785/0120040082>
- Erdik M.* Report on 1999 Kocaeli and Düzce (Turkey) earthquakes. Proc. 3rd Int. Workshop on Structural Control. Paris. 2000. P. 149–186.
- Ergintav S., Reilinger R.E., Cakmak R., Floyd M. et al.* Istanbul's earthquake hot spots: Geodetic constraints on strain accumulation along faults in the Marmara seismic gap // *Geophys. Res. Lett.* 2014. V. 41. P. 5783–5788. <https://doi.org/10.1002/2014GL060985>
- Flerit F., Armijo R., King G.C.P., Meyer B., Barka A.* Slip partitioning in the Sea of Marmara pull-apart determined from GPS velocity vectors // *Geophys. J. Int.* 2003. V. 154. P. 1–7.
- Gardner J.K., Knopoff L.* Is the sequence of earthquakes in Southern California, with aftershocks removed, Poissonian? // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 1974. V. 64. № 5. P. 1363–1367.
- Hubert-Ferrari A., Armijo R., King G.C.P., Meyer B., Barka A.* Morphology, displacement, and slip rates along the North Anatolian Fault, Turkey // *J. Geophys. Res.* 2002. V. 107. <https://doi.org/10.1029/2001JB000393>
- Ito A., Balamir U., Baris S., Nakamura A., Honkura Y., Isikara A.M.* Aftershock activity of the 1999 Izmit, Turkey, earthquake revealed from microearthquake observations // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2002. V. 92. № 1. P. 418–427.
- Lorenzo-Martin F., Roth F., Wang R.J.* Elastic and inelastic triggering of earthquakes in the North Anatolian Fault zone // *Tectonophysics.* 2006. V. 424. № 3–4. P. 271–289.
- Le Pichon X., Sengor A.M.C., Kende J., İmren C. et al.* Propagation of a strike-1 slip plate boundary within an extensional environment the westward propagation of the North Anatolian Fault // *Canad. J. Earth Sci.* 2016. V. 53. <https://doi.org/10.1139/cjes-2015-0129>
- Nava F.A., Herrera C., Frez J., Glowacka E.* Seismic hazard evaluation using Markov chains: Application to the Japan area // *Pure Appl. Geophys.* 2005. V. 162. P. 1347–1366.
- Ozalaybey S., Ergin M., Aktar M., Tapırdamaz C., Biçmen F., Yoruk A.* The 1999 Izmit earthquake sequence in Turkey: seismological and tectonic aspects // *Bull. Seismol. Soc. Am.* 2002. V. 92. № 1. P. 376–386.
- Polat O., Eyidogan H., Haessler H., Cisternas A., Philip H.* Analysis and interpretation of the aftershock sequence of the August 17, 1999, Izmit (Turkey) earthquake // *J. Seismol.* 2002. V. 6. № 3. P. 287–306.
- Pondard N., Armijo R., King G.C.P., Meyer B., Flerit F.* Fault interactions in the Sea of Marmara pull-apart (North Anatolian Fault): Earthquake clustering and propagating earth-

quake sequences // *Geophys. J. Int.* 2007. V. 171. № 3. P. 1185–1197.

Reilinger R.E. et al. Coseismic and postseismic fault slip for the 17 August, $M = 7.5$, Izmit, Turkey earthquake // *Science*. 2000. V. 289. P. 1519–1524.

Sengör A.M.C., Tuysuz O., Imren, C., Sakıncı M., Eyidoğan H., Gorur N., Le Pichon X., Rangin C. The North Anatolian fault: A new look // *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 2005. V. 33. P. 37–112.

Stein R.S., Barka A., Dieterich J.H. Progressive failure on the North Anatolian Fault since 1939 by earthquake stress triggering // *Geophys. J. Int.* 1997. V. 128. P. 594–604.

Tibi R., Bock G., Xia Y., Baumbach M., Grosser H., Milkereit C., Zschau J. Rupture processes of the 1999 August 17 Izmit and November 12 Düzce (Turkey) earthquakes // *Geophys. J. Int.* 2001. V. 144. № 2. P. F1–F7.

Unal S., Celebioglu S. A Markov chain modelling of the earthquakes occurring in Turkey // *Gazi Univ. J. Sci.* 2011. V. 24. № 2. P. 263–274.

An Investigation into the Earthquake Migration Patterns in Marmara Region, Turkey

Dr. Hakan Karaca*

Department of Architecture, Niğde Ömer Halisdemir University, Niğde, 51240 Turkey

**e-mail: karaca26@hotmail.com*

The seismic migration patterns can be associated with the existing geophysical setting, the tectonic movements and the geographical distribution of seismicity. The right identification of these patterns would lead to the better hazard analysis, forecasts and precise predictions. So, in an attempt to develop a method for the identification of seismic migration pattern, the Marmara Region of Turkey is selected for investigation. Actually, seismicity in the considered region is a consequence of the movement of the neighboring plates along the system of faults that makes up Northern Anatolian Fault (NAF). Accordingly, it was decided to investigate whether the earthquakes have an identifiable migration pattern in the direction of movement. As a single assumption, the migration pattern, if it exists, is assumed to follow Markovian behavior. At the end of the study, the results shed a light not only on the pattern of seismicity but also on the geophysical processes causing earthquakes.

Keywords: earthquakes, North Anatolian Fault, migration, Markov process