

УДК 550.34.013.4 550.343.6

ЭНТРОПИЯ, МОНИТОРИНГ СЕЙСМИЧНОСТИ НА АРМЯНСКОМ НАГОРЬЕ И ДИНАМИКА ЗАПОЛНЕНИЯ АХУРЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

С.Ц. Акопян

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

Аннотация. На основе метода сейсмической энтропии выявлена сейсмическая система «Армения» с пороговой магнитудой 6.2, позволяющая производить мониторинг подготовки сильных землетрясений в диапазоне магнитуд $6.2 \leq M < 6.6$ и оценить сейсмическую ситуацию на территории Армении и сопредельных стран. Изучение энергетических и трековых диаграмм позволило выявить «веерную» тектонику концентрации напряжений с вершиной в Курдистанском узле. Проведен анализ накопления энтропии в сейсмических циклах для иерархии сейсмических систем Армянского нагорья и выявлены прогностические критерии. Результаты сопоставлены с динамикой заполнения Ахурянского водохранилища с 1983 по 2016 гг.

Ключевые слова: кинематическая модель, сейсмический цикл, математическое моделирование, анализ неустойчивости, мониторинг сейсмичности.

PACS 91.30.Ab Pх, 91.45.Ga

ВВЕДЕНИЕ

Метод сейсмической энтропии, описанный в работах [Akorian, Kocharian, 2014; Akorian, 2015; Акопян, 2016], позволяет выявлять большие объемы геологической среды — сейсмические системы (СС), ответственные за подготовку ансамбля сильных землетрясений определенного энергетического (магнитудного) диапазона. Метод сейсмической энтропии делает понятие «магнитуды землетрясения», которые всеми сейсмологами рассматриваются как непрерывные величины, дискретными. Как только вводится понятие «сейсмические системы», появляются понятия пороговой величины M_{th} для магнитуд сильных землетрясений и минимально значимый порог M_h представительности землетрясений-индикаторов, которые зависят от размеров СС и сейсмотектонических условий. Ранее в Тавро-Кавказском регионе были выявлены СС «Армянское нагорье» высшего и среднего уровня с пороговыми магнитудами 7.1 и 6.6 соответственно [Akorian, 1998; Акопян, Рогожин, 2013; Akorian, 2013], позволяющие производить мониторинг ансамбля сильных землетрясений в диапазонах магнитуд $M \geq 7.1$ и $6.6 \leq M < 7.1$ соответственно. В настоящей статье описывается СС «Армения» с пороговой магнитудой $M_{th} = 6.2$, позволяющая произ-

водить мониторинг подготовки землетрясений в диапазоне магнитуд $6.2 \leq M < 6.6$ и оценивать сейсмическую ситуацию на территории Армении и сопредельных стран. Исследовано возможное влияние эксплуатации Ахурянского водохранилища на процессы подготовки сильных землетрясений в выявленных системах.

СЕЙСМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА «АРМЕНИЯ»

Метод сейсмической энтропии открывает возможность математического моделирования и количественного описания динамического поведения больших объемов сложных геологических сред, каким является Тавро-Кавказский регион. Все активные процессы в этом регионе обусловлены направленным на север движением Аравийской плиты. В работах [Акопян, 2013; Акопян, Рогожин, 2013] была описана динамическая плитоблоковая модель Тавро-Кавказского региона, которая служит основой для выявления СС разного иерархического уровня на данной территории. Фрагмент схемы сейсмотектонического строения Тавро-Кавказского региона приведен на рис. 1, а. Видно, что эпицентры разрушитель-

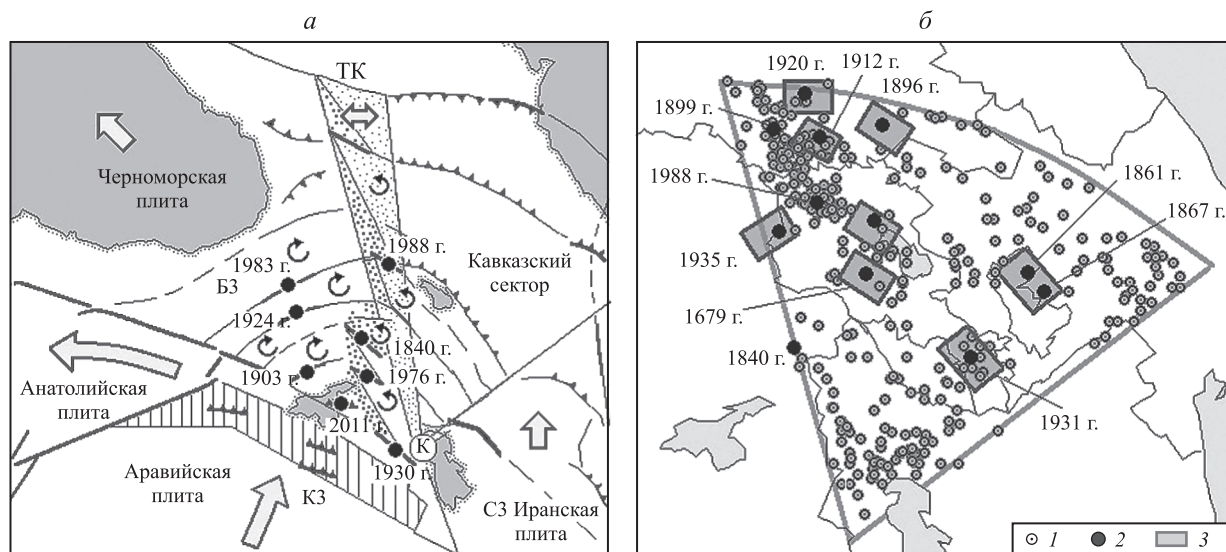


Рис. 1. Сейсмоструктурное строение Тавро-Кавказского региона (а) и сейсмическая система «Армения» (б)

ТК — Транскавказское поднятие; БЗ — буферная зона; КЗ — контактная зона; СЗ — сейсмическая зона; К — Курдистанский узел. Стрелками показаны вращения блоков
1 — эпицентры землетрясений-индикаторов; 2 — эпицентры сильных землетрясений; 3 — очаговые зоны сильных землетрясений ансамбля

ных землетрясений с $M \geq 6.6$ локализованы в буферной зоне между Транскавказским поднятием и Северо-Анатолийским разломом. Поиск СС в этом регионе ведется начиная с верхнего иерархического уровня с постепенным понижением пороговой магнитуды путем разбиения системы на подсистемы. За подготовку сильных землетрясений Армянского нагорья ответственны землетрясения-индикаторы Кавказского сектора с $M < M_{th}$ (см. рис. 1, а).

На основе разработанной плитоблоковой модели для Восточного и Западного Кавказа были выявлены около 17 СС и подсистем [Акопян и др., 2017]. Для каждой СС были построены трековые и энергетические диаграммы, позволяющие проводить мониторинг и прогнозировать возможность сильных землетрясений в режиме реального времени. С 2011 г. производится непрерывный мониторинг сейсмичности в СС Кавказского региона, результаты которого ежеквартально представляются в МЧС России. В работе [Акопян и др., 2017] были показаны границы СС «Армения», которая располагается в южной части Кавказского сектора и охватывает всю территорию Армении. На рис. 1, б показаны контуры СС «Армения», эпицентры землетрясений-индикаторов с $M < 6.2$ и сильных землетрясений с $M \geq 6.2$. СС «Армения» выявлена на основе закона производства сейсмической энтропии, который устанавливает степенную зависимость между кумулятивными параметрами энергии E_c и числа

состояний S_c землетрясений-индикаторов в сейсмических циклах, которые заканчиваются сильными землетрясениями. Энергетические и трековые диаграммы строились в логарифмическом масштабе $K_c = \lg E_c$, $W_c = \lg S_c$, где K_c — кумулятивный энергетический класс; W_c — сейсмическая энтропия.

В таблице приведены параметры эпицентров известных сильных землетрясений на территории Армении, значения кумулятивных параметров и вероятности сильных землетрясений в сейсмических циклах СС «Армения». Каталог землетрясений-индикаторов до инструментального периода (до 1900 г.) (в таблице отмечены «звездочками») считается неполным, поэтому при анализе результатов мы опирались на сейсмические циклы 6–10. Текущий (незавершенный) 11-й цикл стартовал в 1989 г. после Спитакского землетрясения. По градации надежности прогнозов [Акопян и др., 2017] СС «Армения» причисляется к уровню III (посредственному), для которого число завершившихся циклов $5 \leq N < 10$.

Средний период повторяемости сильных землетрясений в СС «Армения» порядка 18 лет. За подготовку разрушительных землетрясений (Аратского 1840 г., Спитакского 1988 г. и Ванского 2011 г.) ответственны системы верхнего иерархического уровня на Армянском нагорье [Акопян, Рогожин, 2013], однако Спитакское землетрясение хорошо прогнозируется и в СС «Армения». Подготовка этого землетрясения началась в 1935 г., ее

Параметры сильных ($M \geq 6.2$) землетрясений в сейсмических циклах СС «Армения»

| Сейсмический цикл, j | Дата землетрясения | Координаты, град. | | K_S | M_S | K_C | W_C | $P_K, \%$ | $P_W, \%$ | $P, \%$ |
|---------------------------|-----------------------|-------------------|-------|-------|-------|--------|--------|-----------|-----------|---------|
| | | с.ш. | в.д. | | | | | | | |
| 1 | 20.10.1827 г.* | 40.70 | 44.90 | 15.2 | 6.5 | 14.631 | 16.918 | — | — | — |
| 2 | 02.07.1840 г.* | 39.50 | 43.90 | 16.1 | 7.4 | 14.754 | 16.152 | — | — | — |
| 3 | 24.05.1861 г.* | 40.00 | 46.60 | 15.3 | 6.6 | 15.001 | 17.258 | — | — | — |
| 4 | 23.07.1867 г.* | 40.00 | 47.00 | 14.9 | 6.3 | 14.700 | 16.440 | 26.82 | 22.88 | 6.14 |
| 5 | 22.09.1896 г.* | 41.60 | 45.00 | 14.9 | 6.3 | 14.246 | 16.613 | 0 | 42.49 | 0 |
| 6 | 12.10.1912 г. | 41.50 | 44.20 | 14.9 | 6.3 | 14.579 | 16.598 | 33.32 | 41.47 | 13.82 |
| 7 | 20.02.1920 г. | 41.90 | 44.00 | 14.8 | 6.2 | 14.594 | 16.424 | 40.53 | 24.17 | 9.80 |
| 8 | 27.04.1931 г. | 39.40 | 46.10 | 15.0 | 6.4 | 14.935 | 16.670 | 92.22 | 53.89 | 49.70 |
| 9 | 01.05.1935 г. | 40.60 | 43.70 | 14.8 | 6.2 | 15.071 | 16.274 | 96.57 | 10.75 | 10.38 |
| 10 | 07.12.1988 г. | 40.86 | 44.17 | 16.1 | 7.0 | 15.421 | 17.920 | 100.00 | 99.99 | 100.00 |
| 11 | 30.08.2016 г. | ? | ? | | 6.4 ? | 14.619 | 16.956 | 28.19 | 67.61 | 19.06 |

*Землетрясения доинструментального периода, для которых данные каталога неполны.

длительность составила 53 года. Не исключено, что именно отсутствие сильных землетрясений с $6.2 \leq M < 6.6$ за такой продолжительный период в СС «Армения» и привело к подготовке столь сильного разрушительного землетрясения. На рис. 2 показаны трековая (а) и энергетическая (б) диаграммы СС «Армения», построенные с использованием данных таблицы. Видно, что перед Спитакским землетрясением кумулятивная энергия и энтропия достигли максимальных значений за 200-летний период наблюдений.

Используя кинематическую модель, приведенную на рис. 1, а, и результаты моделирования плитоблоковой структуры Тавро-Кавказского региона с помощью механических моделей [Акопян, Рогожин, 2013] на трековой диаграмме выделены четыре локальные зоны неустойчивости аттрактора — **A**, **B**, **C** и **D**. Внутри СС «Армения» эти зоны образуют «веерную» тектонику концентрации напряжений с вершиной в Курдистанском узле (рис. 3, а). Эпицентры сильных землетрясений приурочены к местам пересечения этих зон с дугообразными разломными зонами. На основе точек неустойчивости сильных землетрясений на энергетической диаграмме методом регрессии рассчитан линейный закон производства энтропии [Akopian, Kocharian, 2014]. На рис. 2, б показана эта осредненная прямая линия и ее уравнение. Закон производства сейсмической энтропии позволяет (по магнитуде и местоположению эпицентра) восстановить точку неустойчивости исторического землетрясения на трековой и энергетической диаграммах. Так, например, используя макроскопическую магнитуду $M \sim 6.4$ (интенсивность VII баллов) исторического разрушительного землетрясения в пос. Гарни (04.06.1679 г.), по трековым и энергетическим диаграммам можно восстановить ее приблизительное местоположение (2 на рис. 2). Энергетические и трековые диаграммы позволяют следить за подготовкой сильных землетрясений в СС на основе восполняемого каталога землетрясений и предсказывать (с некоторой точностью) их время, место и магнитуду. Чем детальнее энергетические и трековые диаграммы, тем точнее результаты прогноза. В процессе мониторинга (по мере регистрации текущей сейсмичности) область неустойчивости в рамках границ СС может перемещаться от одной разломной зоны к другой, соответственно после каждого землетрясения-индикатора будут меняться и результаты прогноза. Метод сейсмической энтропии позволяет визуализировать на карте местоположение текущей зоны неустойчивости, проследить за динамикой ее перемещения, а также оценить возможный ущерб от прогнозируемого землетрясения. При прогнозе землетрясений используется иерархический подход одно-

временного мониторинга в нескольких системах и рассчитывается динамическая вероятность [Akopian, 2013]. В таблице приведены вероятности P_K , P_W и их произведения $P = P_K \times P_W$ перед сильными землетрясениями СС «Армения». Эти вероятности зависят от времени и увеличиваются в процессе наблюдения. Применение метода сейсмической энтропии позволяет контролировать весь объем СС. Если дается прогноз землетрясения в конкретной области, то в других областях внутри СС исключается сильное землетрясение. Подробные рекомендации о применении результатов мониторинга по методу сейсмической энтропии для практического прогноза землетрясений приведены в [Акопян и др., 2017].

ОЦЕНКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ СИТУАЦИИ В СС «АРМЕНИЯ»

На основе энергетической и трековой диаграммы была оценена сейсмическая ситуация в СС «Армения». Значения контролирующих параметров для последнего (незавершенного) цикла подготовки сильного землетрясения в системе на август 2016 г. приведены в строке II таблицы. На рис. 2, а показана траектория подготовки сильного землетрясения, а на рис. 3, б — динамика роста вероятности за 28-летний период (с 1989 г. по август 2016 г.). Траектория находится в зоне **B** (см. рис. 3, а), но конкретизировать место внутри зоны затруднительно, поскольку сейсмические циклы сильных землетрясений 1827 и 1896 годов ненадежные. На энергетической диаграмме (см. рис. 2, б) видно, что магнитуда ожидаемого землетрясения — $M \approx 6.4$, и в дальнейшем она может только возрастать. Из данных, приведенных в таблице и на рис. 3, б, видно, что текущее значение вероятности землетрясения по энтропии очень высокое.

На рис. 3, а показано, что в зоне **B** на территории Армении находятся очаговые зоны (2) исторических разрушительных землетрясений Гарни (1679 г.) и Цахкадзор (1827 г.). До конца 2017 г. потенциальная опасность будет локализована в этих зонах. Если вскоре здесь не произойдет землетрясение с магнитудой $M \sim 6.5$, потенциально опасная зона переместится к северу, в очаговую область землетрясения 1896 г. на юге Грузии. В первой половине 2018 г. зона неустойчивости постепенно переместится к западу, в очаговую область землетрясения 1912 г., а затем — в Восточную Турцию. Резюмируя, можно сказать, что наиболее высокие величины напряжения в течение 2017 г. и первой половины 2018 г. будут сконцентрированы в зонах **B** и **C** (см. рис. 3, а). Поскольку результаты получены на основе качественно плохой (посредственной) системы, то их можно

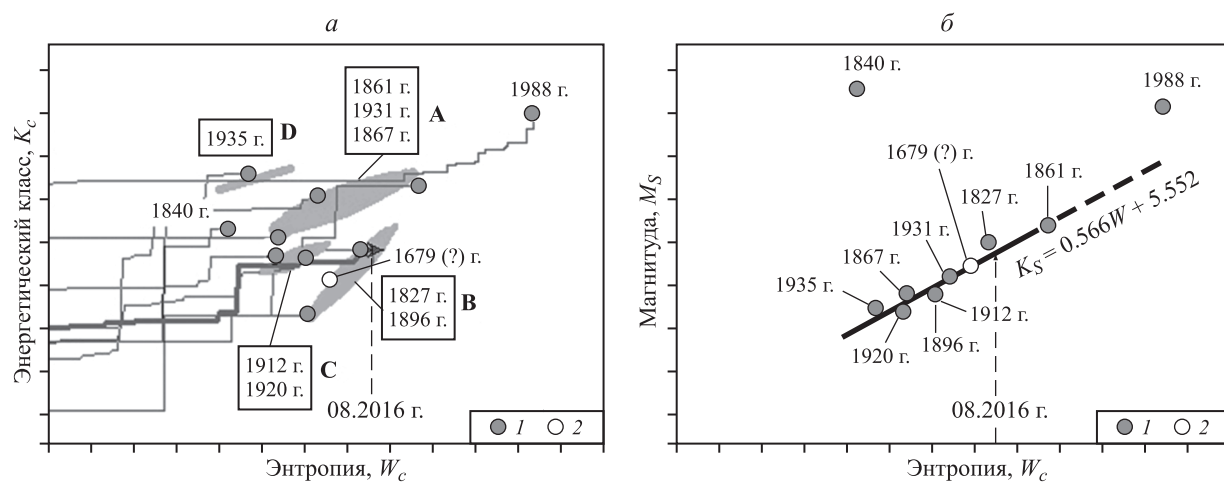


Рис. 2. Трековая (а) и энергетическая (б) диаграммы сейсмической системы «Армения»
 а. А–Д — локальные зоны неустойчивости аттрактора; — траектория подготовки землетрясения на август 2016 г. Здесь и на рис. 2, б: 1 — эпицентры сильных землетрясений; 2 — предполагаемое историческое землетрясение 04.06.1679 г. в пос. Гарни;
 б. Осредненная прямая линия — закон производства энтропии

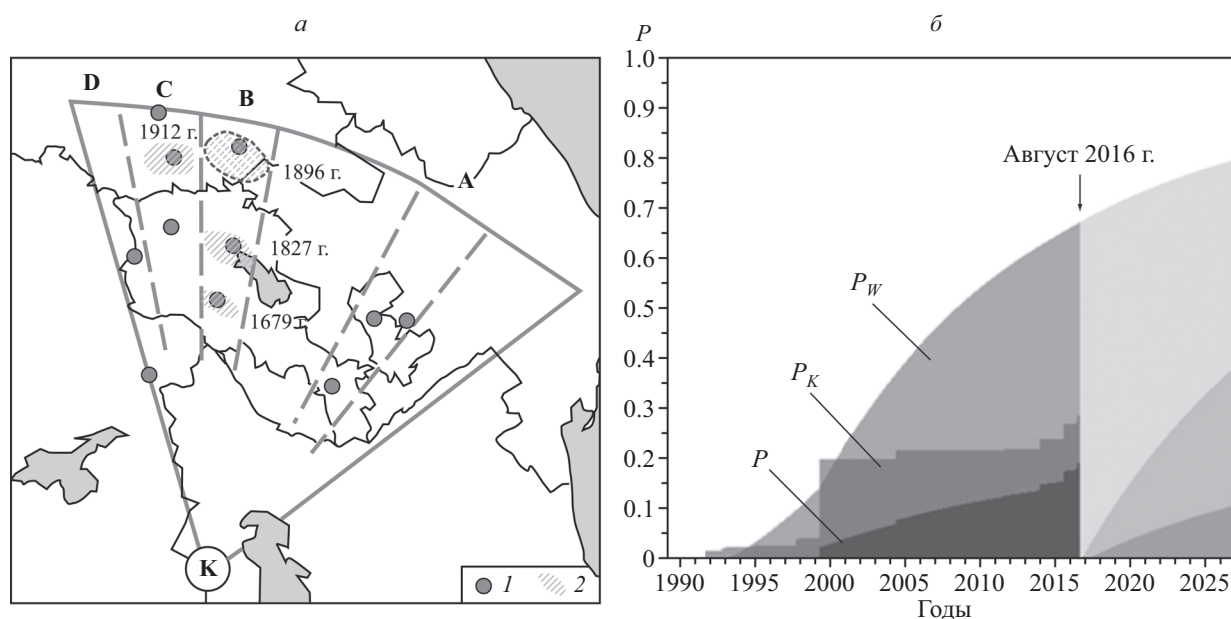


Рис. 3. «Веерная» тектоника концентрации напряжений (а) и динамика роста подготовки сильного землетрясения (б) в сейсмической системе «Армения» на август 2016 г.
 а. 1 — эпицентры сильных землетрясений; 2 — наиболее неустойчивые зоны ожидания землетрясения с $M \approx 6.4$; К — Курдистанский узел; А–Д — локальные зоны неустойчивости аттрактора

использовать только для усиления контроля за среднесрочными и оперативными предвестниками в отмеченных областях по другим методам наблюдений.

Анализ сейсмической ситуации в СС «Армянское нагорье» с более высокой пороговой магнитудой $M_{th} = 6.6$ показывает, что траектория подготовки сильного землетрясения, стартовавшая после Ванского землетрясения 23.10.2011 г. [Акопян, 2014], развивается по сценарию, очень близкому к траекториям подготовок землетрясений 1983 г. (Нарман) и 1988 г. (Спитак). Траектория будет находиться в опасной зоне точек неустойчивости этих землетрясений в течение 2017 г. при отсутствии чувствительных землетрясений-индикаторов в объеме системы в этот период. Таким образом, мониторинг в системе более высокого иерархического уровня подтверждает концентрацию высоких напряжений в зонах В и С.

МОНИТОРИНГ СЕЙСМИЧНОСТИ В СС «АРМЯНСКОЕ НАГОРЬЕ» НА ОСНОВЕ ДИНАМИКИ ЗАПОЛНЕНИЯ АХУРЯНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА

В работах [Акопян 1990; Акопян, Роров, 2011] на основе метода сейсмической энтропии было показано, что на подготовку катастрофического Спитакского землетрясения в Армении (07.12.1988 г., $M = 7.0$) мог повлиять техногенный фактор — постройка и функционирование Ахурянского водохранилища. Ахурянское водохранилище (объем — 0.525 км^3 , высота плотины — 45 м), введенное в эксплуатацию в 1982 г., расположено на северо-западе Армении, в приграничной зоне с Турцией на р. Ахурян (рис. 4). Водохранилище занимает часть (22 км) сейсмически активного разлома; а это область, в которой могут возникать большие фильтрации воды. В работе [Акопян, 1990] была приведена модель ослабления очаговой зоны Спитакского землетрясения из-за передачи порового давления от Ахурянского водохранилища в Ширакский бассейн и нарушения проницаемости Джаджурского барьера (рис. 5). На космическом снимке, приведенном на рис. 4, хорошо видно, как четвертичная лава от влк. Арагац примерно 3 млн л.н. изменила ландшафт и образовала Джаджурский барьер, который отделил Ширакский бассейн от бассейна р. Памбак. Вариации порового давления жидкости из-за изменения уровня водохранилища за 5 лет (с 1983 по 1988 г.) за счет изменения порового давления жидкости могли ослабить проницаемость Джаджурского барьера и нарушить естественный баланс между двумя бассейнами.

Сопоставим динамику заполнения Ахурянского водохранилища с сейсмическими цикла-

ми СС «Армянское нагорье» и «Армения». На рис. 6, а показана динамика заполнения Ахурянского водохранилища с 1984 по 2016 г. и отмечены времена сильных землетрясений. СС «Армянское нагорье» отвечает за подготовку сильных землетрясений с $M_s \geq 6.6$. С 1840 г. в системе произошло 16 сильных землетрясений. Два из них — землетрясение 1924 г. (Хорасан, $M = 6.8$) и землетрясение 1983 г. (Нарман, $M = 6.7$) — произошли в буферной зоне, между Транскавказским поднятием и Северо-Анатолийским разломом (см. рис. 1, а). После землетрясения 1924 г. последовало землетрясение на севере Армении (1926 г., г. Ленинакан, $M = 5.7$), а после землетрясения 1983 г. — Спитакская катастрофа. Такая пространственно-временная связь между сейсмическими событиями буферной зоны (Восточная Турция) и Транскавказским поднятием в районе Северной Армении вытекает из кинематической модели региона. На протяжении тысяч лет на северо-западе Армении не наблюдалось такого сильного землетрясения, как Спитакское. Естественно предположить, что в это время в земной коре на севере Армении, которая находится во фронтальной области максимальных давлений от Аравийской плиты, происходили изменения, которые ослабили ее несущую способность. Любая дестабилизация обстановки в этом регионе могла вызвать возникновение землетрясения. Таким стимулирующим (техногенным) фактором могло оказаться строительство Ахурянского водохранилища, которое было введено в эксплуатацию в неблагоприятных сеймотектонических условиях — в наиболее опасный период накопления напряжений.

Очередной сейсмический цикл в СС «Армянское нагорье» стартовал после землетрясения Нарман 1983 г. и практически полностью совпал с началом эксплуатации Ахурянского водохранилища. А сейсмический цикл в СС «Армения» был весьма продолжительным (стартовал в 1935 г., см. таблицу), и к концу 1980-х годов в системе накопилась огромная энтропия. В конце 1988 г. траектория подготовки сильного землетрясения в системе находилась вблизи точек неустойчивости землетрясений 1924 и 1983 годов. То есть, как было спрогнозировано в работе [Акопян, 1985], землетрясение должно было произойти в Восточной Турции в 1989–1990 гг. Однако действие техногенного фактора и большая концентрация естественных напряжений могли способствовать ослаблению очаговой зоны Спитакского землетрясения и в конце 1988 г. спровоцировать сильное землетрясение. Фактически сейсмический цикл, совпавший с началом заполнения и эксплуатации водохранилища, был самым неблагоприятным для северо-запада Армении. Небольшие



Рис. 4. Космический снимок территории Северо-Западной Армении с очаговой зоной Спитакского землетрясения

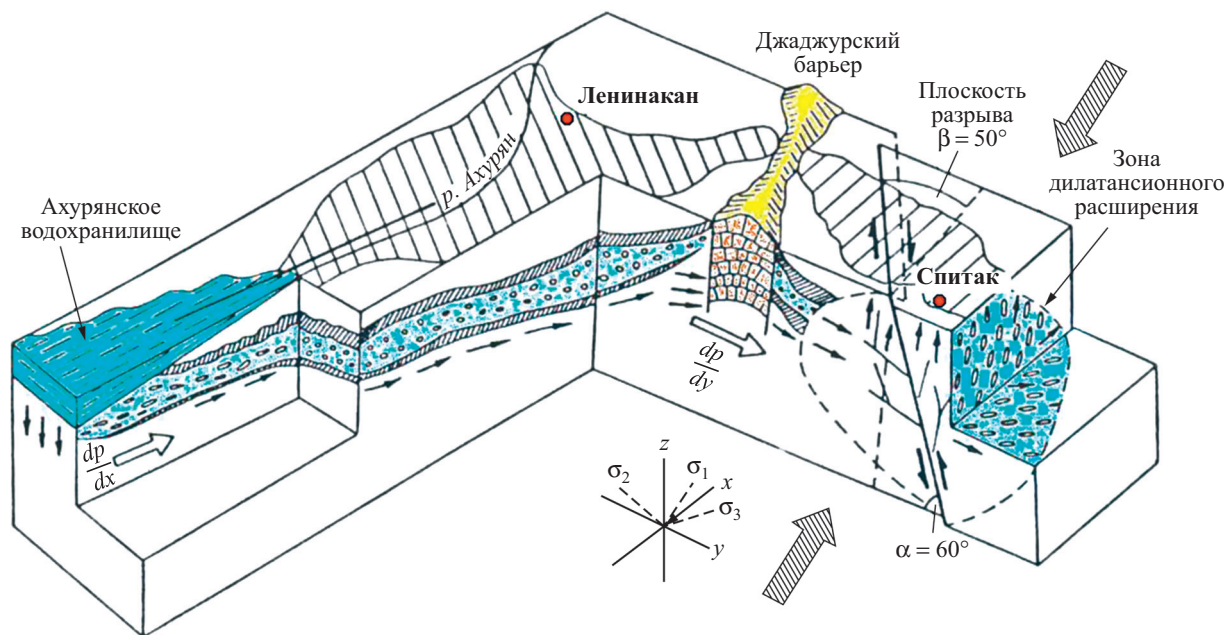


Рис. 5. Схема передачи порового давления и миграция флюидов от Ахурянского водохранилища в дилатансионную зону очага Спитакского землетрясения
Пояснения см. в тексте

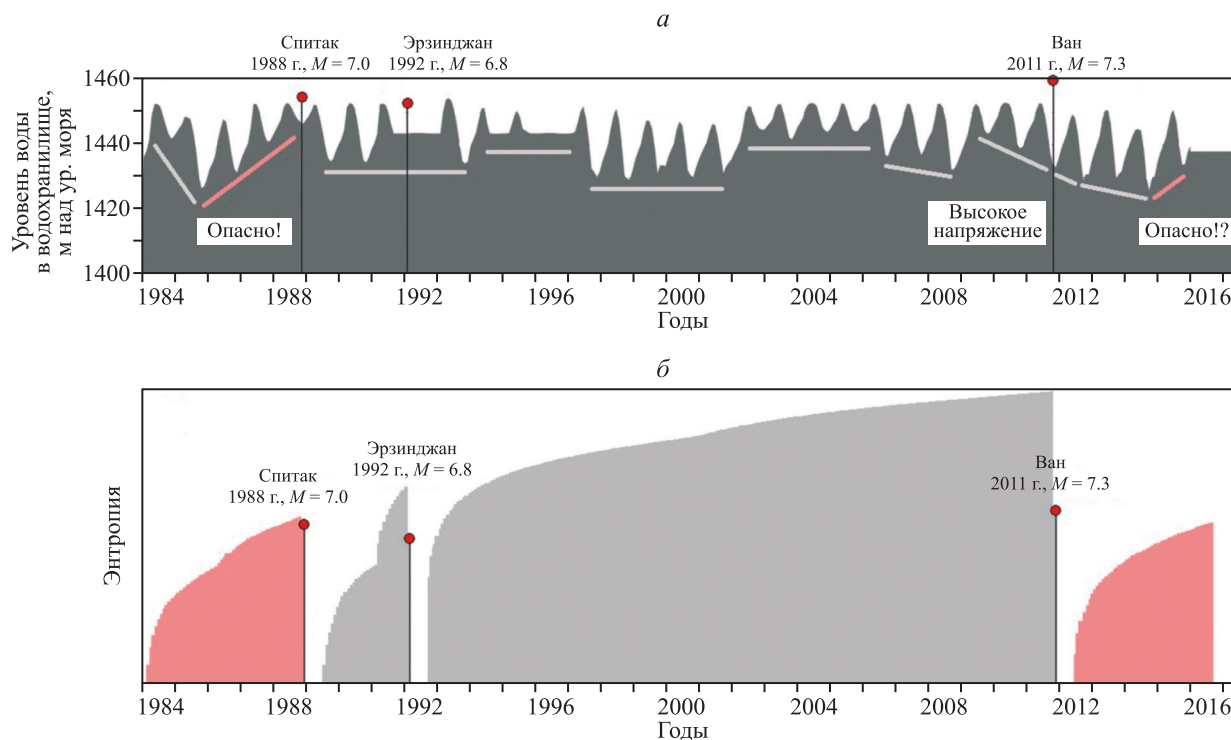


Рис. 6. Динамика заполнения Ахурьянского водохранилища с 1984 по 2016 г. (а) и ход энтропии в сейсмических циклах катастрофических землетрясений сейсмической системы «Армянское нагорье» (б)

водоемы, вопреки распространенному мнению [Гупта, Растоги, 1979], иногда могут быть более опасными, чем большие, если они находятся в сейсмически активных зонах разломов. В больших водоемах на равнинной местности сезонные колебания уровня воды незначительны (порядка нескольких десятков сантиметров); такие водоемы представляют сейсмическую опасность только во время их заполнения. В дальнейшем огромный объем воды водохранилища и оказываемая им нагрузка приходят в естественное равновесие с окружающей средой. В маленьких водоемах воздействия от нагрузок толщи воды относительно небольшие, но в горной местности сезонные колебания уровня воды достигают значительных величин (порядка десятков метров), что вызывает также большие вариации порового давления в грунте и продолжительное время сказывается на динамике поведения среды. В неблагоприятных сейсмо-тектонических условиях этот фактор может сыграть роковую роль.

Мы анализировали динамику заполнения Ахурьянского водохранилища после Спитакского землетрясения до середины 2016 г. и сопоставили ее с сейсмическими циклами СС «Армянское нагорье» (см. рис. 6, б). Как видно из представленных на рис. 6, а данных, динамика заполнения водохранилища, которая отмечалась в течение трех лет до

Спитакского землетрясения, была положительной, т.е. происходила по возрастающей сезонных значений минимального и максимального уровня заполнения. В последующие годы эксплуатации водохранилища возрастающей динамики заполнения не наблюдалось, заполнение водохранилища происходило в основном равномерно. После Спитакского землетрясения самым неблагоприятным для Армении был трехлетний период перед Ванским землетрясением (23.10.2011 г.). Мониторинг подготовки и хода этого землетрясения автор проводил в реальном масштабе времени на интернет-сайте www.geog.ru [Akopian, 2014]. Энтропия, накопленная в системе перед Ванским землетрясением (см. рис. 6, б), была максимальной за более чем 100-летний период наблюдений, но среда (дугообразные тектонические блоки) на севере Армении выдержала такую нагрузку. Из приведенных на рис. 6, а данных видно, что динамика эксплуатации водохранилища перед Ванским землетрясением была отрицательной. Не исключено, что такая динамика может упрочнять разломные зоны. Последний сейсмический цикл, стартовавший после Ванского землетрясения, почти полностью повторяет период подготовки Спитакского землетрясения. Как уже отмечалось, траектория до конца 2017 г. будет находиться в зоне неустойчивости землетрясений 1924, 1983, 1988 годов.

Динамика эксплуатации водохранилища в 2015 г. была положительной (после апреля 2016 г. данных нет). Если эксплуатация Ахурянского водохранилища и дальше будет происходить с положительной динамикой, то это может оказать неблагоприятное влияние и ослабить веерные зоны В, С (см. рис. 3), где будут сосредоточены максимальные напряжения в 2017 г. в СС «Армения».

РЕЗЮМЕ

В статье описана СС «Армения», которая позволяет выявить некоторые особенности зарождения сейсмотектонической неустойчивости в регионе. В установленной нами иерархии СС на Армянском нагорье на основе энергетических и трековых диаграмм возможен мониторинг подготовки сильных землетрясений с магнитудами $M \geq 6.2$ и визуализация сценариев развития сейсмической неустойчивости. Полученные результаты позволяют по-новому интерпретировать накопленную сейсмостатистическую информацию, выявлять опасные в сейсмотектоническом отношении временные интервалы на Армянском нагорье, сопоставлять их с динамикой эксплуатации Ахурянского водохранилища и оценивать возможное влияние техногенных факторов на естественные сейсмические процессы.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 16-17-00139) в НИИ «АЭРОКОСМОС».

ЛИТЕРАТУРА

- Акопян С.Ц. Тектоника плит Альпийско-Гималайского региона и некоторые прогностические критерии // Изв. АН АрмССР. Науки о Земле. 1985. Т. 38, № 6. С. 39–49.
- Акопян С.Ц. Сейсмические системы, закон производства энтропии и ансамбли сильных землетрясений // Физика Земли. 2016. № 6. С. 61–82.
- Акопян С.Ц., Рогожин Е.А. Моделирование кинематики Тавро-Кавказского региона и динамика подготовки сильных землетрясений с $M \geq 7.1$ // Вопросы инженерной сейсмологии. 2013. Т. 40, № 2. С. 5–24.
- Акопян С.Ц., Бондур В.Г., Рогожин Е.А. Технология мониторинга и прогнозирования сильных землетрясений на территории России с использованием метода сейсмической энтропии // Физика Земли. 2017. № 1. С. 34–53.
- Гунта Х., Расгози Б. Плотины и землетрясения. М.: Мир, 1979. С. 251.
- Akopian S.Ts. Seismoactive cycles and some date on the mechanism of the Spitak earthquake // XXII Gen. Ass. ESC, Barcelona, Spain, 1990: Progr. and Abstr. Barcelona, 1990. P. 107.
- Akopian S.Ts. Description of seismic processes on the Armenian upland based on seismic entropy // XXVI Gen. Ass. ESC: Papers. Tel Aviv, Israel, 23–28 August 1998. Tel Aviv, 1998. P. 150–154.
- Akopian S.Ts. Quantitative description of seismic processes in real medium and the algorithm of long-term prediction of large earthquakes: By examples of the Armenian Upland, North-Western Iran, Italy and Central California. M.: Triumph Publ., 2013. P. 92.
- Akopian S.Ts. Monitoring and forecast the Van earthquake (October 23, 2011) in the seismic system Armenian upland // 2-nd ECEES, Istanbul, Turkey, 24–29 August 2014. Istanbul, 2014. 3 p.
- Akopian S.Ts. Open dissipative seismic systems and ensembles of strong earthquakes: Energy balance and entropy funnels // Geophys. J. Int. 2015. V. 201. P. 1618–1641.
- Akopian S.Ts., Kocharian A.N. Critical behaviour of seismic systems and dynamics in ensemble of strong earthquakes // Geophys. J. Int. 2014. V. 196. P. 580–599.
- Akopian S.Ts., Popov E.A. Monitoring induced seismicity based on seismic entropy method // Abstr., Induc. Seism. ECGS–FKPE Workshop, Luxembourg, 15–17 November 2010. Luxembourg, 2010. P. 3–4.
- АКОПЯН Самвел Цолакович** — доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН. 123242, г. Москва, ул. Большая Грузинская, д. 10, стр. 1. Тел.: +7 (499) 254-90-95, +7 (916) 145-31-55. E-mail: sakopian@yandex.ru
- AKOPIAN Samvel Tsolakovich** — Dr. phys.-math. sci., leader researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth RAS. Russia, Moscow. Tel.: +7 (499) 254-90-95. E-mail: sakopian@yandex.ru

ENTROPY, MONITORING SEISMICITY IN THE ARMENIAN HIGHLANDS AND DYNAMICS OF THE AKHURIAN RESERVOIR FILLING

S.Ts. AKOPIAN

Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

Abstract. Based on the method of seismic entropy, the seismic system “Armenia” with a threshold magnitude of 6.2 has been identified, which makes it possible to monitor the nucleation of strong earthquakes in the magnitude range $6.2 \leq M < 6.6$ and assess the seismic situation in Armenia and neighboring countries. The study of energy and track diagrams revealed the “fan-shaped” tectonics of stress concentration with the apex in the Kurdistan knot. The analysis of entropy accumulation in seismic cycles for the hierarchy of seismic systems of the Armenian Highlands has been carried out and prognostic criteria have been revealed. The results are compared with the dynamics of the Akhurian Reservoir filling from 1983 to 2016.

Keywords: kinematic model, seismic cycle, mathematical modeling, instability analysis, seismicity monitoring.