

УДК 550.530

Сеймотектоническая активность очаговых зон землетрясений Северной и Центральной Армении за период 2019–2023 гг.

© 2024 г. Р.А. Пашаян¹, Д.К. Карапетян², Л.В. Арутюнян³, С.С. Маргарян⁴,
А.А. Геворкян⁴, Р.А. Карамян², К.Г. Товмасян¹

¹ИГИС НАН РА, г. Ереван, Республика Армения; ²ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения;
³ИОНХ НАН РА, г. Ереван, Республика Армения; ⁴ГНКО ТССЗ МВД РА, г. Ереван, Республика Армения

Поступила в редакцию 20.09.2023 г.

Аннотация. Статья посвящена изучению сеймотектонической активности очаговых зон Северной и Центральной Армении. С целью оценки степени активности сеймотектоники двух районов региона проведён анализ сейсмического режима и построен график повторяемости землетрясений, где указаны две линии: первая отражает повторяемость землетрясений в сейсмоактивном районе севера, вторая линия построена по количеству землетрясений центральной части региона. Исследовалась геодинамическая активность очаговых и разломных зон с помощью применения гидрогеологических методов изучения геодинамических процессов земной коры и выявления гидрогеодинамических и гидрогеохимических эффектов, предшествующих тектоническим движениям земной коры. Определялись характер и форма гидрогеохимических эффектов, предшествующих землетрясениям, по водам минеральных источников. Составлена карта распределения очагов землетрясений по сейсмоактивным и сейсмогенерирующим местам глубинных разломов, выделяя при этом пространственное расположение глубинных разломов земной коры в регионе. Изучено напряжённо-деформированное состояние земной коры региона и определения деформационных структур сжатия и растяжения за рассматриваемый период времени. Исследовано влияние катастрофического Турецкого землетрясения на напряжённо-деформированное состояние земной коры территории Армении. Данное землетрясение повлияло на изменение химического состава минеральных вод Центральной Армении и на динамику вод гидрогеодинамических скважин региона.

Ключевые слова: сеймотектоника, землетрясение, гидрогеодинамика, гидрогеохимия.

Для цитирования: Пашаян Р.А., Карапетян Д.К., Арутюнян Л.В., Маргарян С.С., Геворкян А.А., Карамян Р.А., Товмасян К.Г. Сеймотектоническая активность очаговых зон землетрясений Северной и Центральной Армении за период 2019–2023 гг. // Российский сейсмологический журнал. – 2024. – Т. 6, № 1. – С. 65–79. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.04>. – EDN: MCFXUI

Введение

Выявление соотношения между тектоникой и современной сейсмичностью способствует прослеживанию геодинамических процессов отдельного блока земной коры. Изучение зон активных разломов направлено на решение проблем современной геодинамики и анализ пространственно-временных изменений сейсмической активизации разломов [Караханян, 1990].

Используемая авторами дифференциация разломов на сейсмогенерирующие и сейсмоактивные зоны выражается в различных проявлениях современной сейсмической и геологи-

ческой активности. Приуроченность крупных землетрясений к активным разломам соответствует сейсмогенерирующим зонам этих разломов и подвижкам вдоль их простирания. В сейсмоактивных зонах разломов могут концентрироваться очаги слабых землетрясений.

В активных разломных зонах наблюдаются как сильная, так и слабая сейсмичность. Здесь также могут проявляться разгрузки минеральных вод. Ранее отмечались особенности динамики временных изменений сейсмической активности и её связи с тектоникой и геодинамикой земной коры региона при реализации сильных землетрясений [Пашаян и др., 2023].

Через регион Армения проходит южная ветвь Северо-Анатолийского разлома, к которому приурочены очаги сильнейших землетрясений. Значимыми глубинными разломами региона являются Северо-Анатолийский трансформный разлом и Транскавказская субмеридиональная зона разломов, которая проходит вдоль восточной границы Армении. Здесь проходит Базум-Севанская зона разломов глубокого заложения, которая протягивается от востока к западу и соединяется с Северо-Анатолийским разломом. Северо-Анатолийский глубинный разлом на севере Турции вблизи города Эрзинджана почти под прямым углом пересекается с Восточно-Анатолийским разломом. Зона пересечения двух разломов является местом, где происходят сильные землетрясения. Одна из ветвей Северо-Анатолийского разлома на территории Армении проходит от г. Ани до г. Гюмри и выходит на Спитакскую очаговую зону. Спитакское землетрясение, произошедшее 7 декабря 1988 г. ($M=7.1$), сопровождалось выходом на поверхность сейсмогенного разрыва [Назаретян, 1984].

Районы северной и центральной частей Армении характеризуются повышенной сейсмической активностью очаговых зон [Трифонов и др., 1989]. Сеймотектонический район Центральной Армении отмечен катастрофическими землетрясениями, последнее сильное из которых произошло в 1931 г. ($M=6.4$). По Гарнийскому разлому прослеживается пространственно-временная миграция сильных землетрясений [Karakhanyan, 1993].

6 февраля 2023 г. с интервалом в девять часов на юго-востоке Турции произошли два мощные землетрясения ($M=7.8$ и 7.5). Район, в котором произошли землетрясения, находится в зоне контакта Анатолийской, Аравийской и Африканской тектонических плит (в районе Шехиткамиль). Движение плит создаёт давление разломов между ними. Помимо Турции и Сирии, землетрясения ощущались в ряде других стран, в том числе в Ливане, Ливии, Грузии, Армении, Израиле и на Кипре. На территории Армении очаги произошедших землетрясений предположительно тяготеют к продольному разлому Ереван-Веди-Арагат северо-запад—юго-восточного простирания.

Целью работы является определение взаимосвязи между землетрясениями и отдельными глубинными разломами, а также оценка сейсмической активности напряжённо-деформированного состояния земной коры двух рассматриваемых районов — северного и центрального — по данным сейсмологиче-

ских и гидрогеологических наблюдений в 2019–2023 гг. В работе также рассмотрен сейсмический режим во время Турецкого землетрясения 2023 г. в системе Анатолийского разлома и отражение в геофизических полях территории Армении. Для изучения сеймотектонической активности Северного и Центрального районов Армении методом гидрогеологических наблюдений использовались данные по уровню вод в гидрогеодинамических скважинах и каталог землетрясений (Каталог землетрясений местных и близлежащих территорий с $M>2.5$), предоставленные ГНКО «Территориальная служба сейсмической защиты» (Министерство внутренних дел Республики Армения) (ТССЗ МВД РА). Данные по мониторингу химического состава минеральных вод были предоставлены лабораторией «Экологическая геофизика и гидрогеодинамика» ИГИС НАН РА. Исследования гидрогеохимического состава вод проводились по результатам мониторинговых наблюдений минеральных источников Центральной Армении [Пашаян 1998]. Данные результатов анализа и статистической обработки временных рядов химического состава вод сопоставлялись с сейсмическими событиями региона.

Оценка сейсмической активности

Ленинаканский регион является областью высокой сейсмичности. В западной части региона сейсмическая активность выше, чем в его восточной части. Северо-западная часть региона занимает высокосейсмичное как в прошлом, так и в настоящее время, Ахалкалакское (Джавахетское) нагорье. Здесь сосредоточена основная масса всех землетрясений региона. Согласно работе [Габриелян и др., 1981], на территории Ленинаканского региона проходят две крупные параллельные шовные зоны: Базум-Севанская зона разломов и Анкаван-Сюникский разлом. Для проводимых исследований учитывалась динамика изменения слабой сейсмичности Джавахетского нагорья (северная сеймотектоническая зона), поскольку этот район быстро реагирует на изменения геодинамических условий [Назаретян, 1984]. С 1976 по 1992 г. в регионе произошли землетрясения с магнитудами от 6.4 до 7.7, увеличение частоты сильных землетрясений указывает, что активизация крупнейших разломов продолжается.

Ереванский регион характерен сильными землетрясениями с $M\geq 5.0$. Расположение эпицентров землетрясений на территории неравномерное. Северная, северо-восточная и восточная

части Ереванского региона отличаются малой сейсмической активностью. Здесь сосредоточена основная масса всех землетрясений региона. Наибольшее количество эпицентров землетрясений и очаги крупных землетрясений расположены в центральной части региона. Согласно [Асланян, 1958], через территорию региона проходят в направлении с северо-запада на юг Ереванский и Ани-Ордубадский глубинные разломы «кавказского» простирания. В юго-западной части региона находится Аракс-Арагатский глубинный разлом. Очаги сильных землетрясений Ереванского региона приурочены в основном к Ереванскому, Ани-Ордубадскому и Арагатскому глубинным разломам.

В работе рассматривался сейсмический режим территории Армении за последние годы (2019–2023 гг.). Составленный график распределения количества землетрясений по годам (рис. 1) указывает на понижение сейсмической активности в 2020 г. и её повышение в 2022 году.

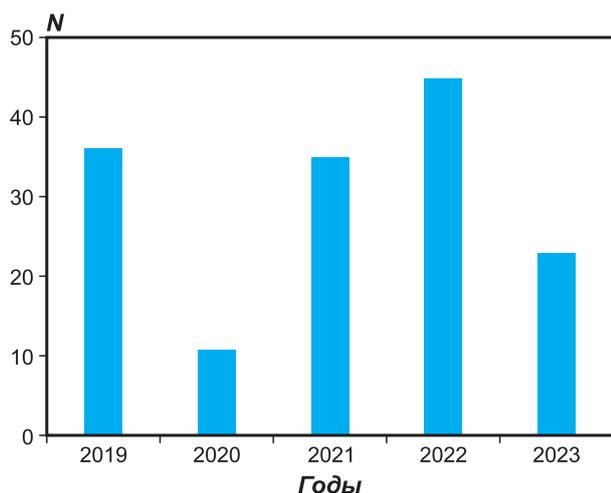


Рис. 1. Распределение количества землетрясений по годам

Построена круговая диаграмма, отражающая количество произошедших землетрясений за исследуемые годы в процентах (рис. 2).

Карта сейсмичности территории Армении за 2019–2023 гг. представлена на рис. 3. За это время землетрясения с $M > 4$ происходили, в основном, на севере и в центре региона. Скопление слабых сейсмических событий с $M > 2$ наблюдалось в юго-западной и северной частях региона. Большая часть эпицентров приурочена к глубинным разломам – Гарнийскому, Арагат-Севанскому, Ахурянскому и Памбак-Севанскому. Значительное понижение сейсмичности наблюдается на северо-востоке и юго-востоке республики.

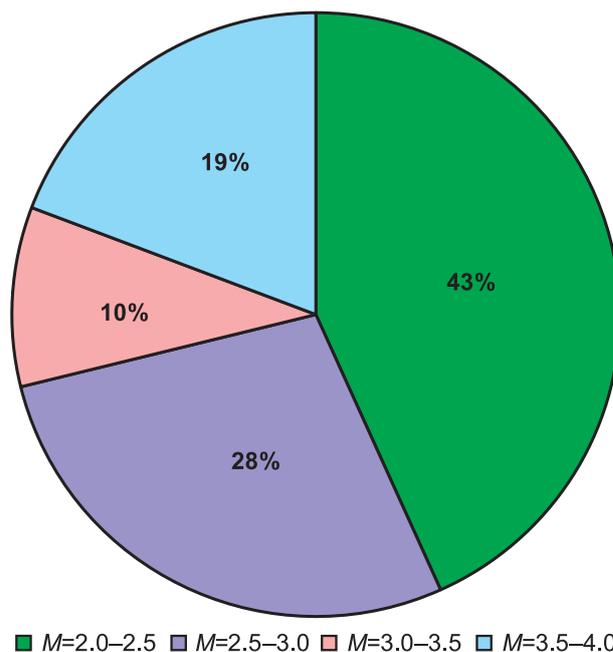


Рис. 2. Круговая диаграмма распределения количества землетрясений по магнитуде, произошедших за период 2019–2023 гг.

Рис. 2. Круговая диаграмма распределения количества землетрясений по магнитуде, произошедших за период 2019–2023 гг.

За рассматриваемый период в Армении произошло пять сильных местных землетрясений с $M \geq 5.0$. Как видно на рис. 3, эпицентры этих землетрясений локализируются на севере на пересечении Ахурянского и одной из ветвей Памбак-Севанского глубинных разломов, на восточном побережье оз. Севан в узле Арагат-Севанского и Памбак-Севанского разломов, в центральной части региона на юге Ереванского глубинного разлома.

Слабые местные землетрясения происходили на севере региона в Джавахетии и в Спитакском тектоническом блоке, в центральной части региона в Ереванском и Апаран-Анкаванском тектонических блоках.

По распределению эпицентров землетрясений можно дать возможную характеристику современной сейсмической активности глубинных разломов. Памбак-Севанский разлом по результатам исследований является сейсмогенерирующим в северной и восточных частях, где имеются подвижки по направлению разлома. Можно предположить, что Ереванский разлом в его южной части также является сейсмогенерирующим. По Гарнийскому разлому наблюдаются сейсмоактивные участки в южной и северной частях.

С целью выявления зависимости между магнитудой и общим числом землетрясений для двух сейсмоактивных частей региона Армении

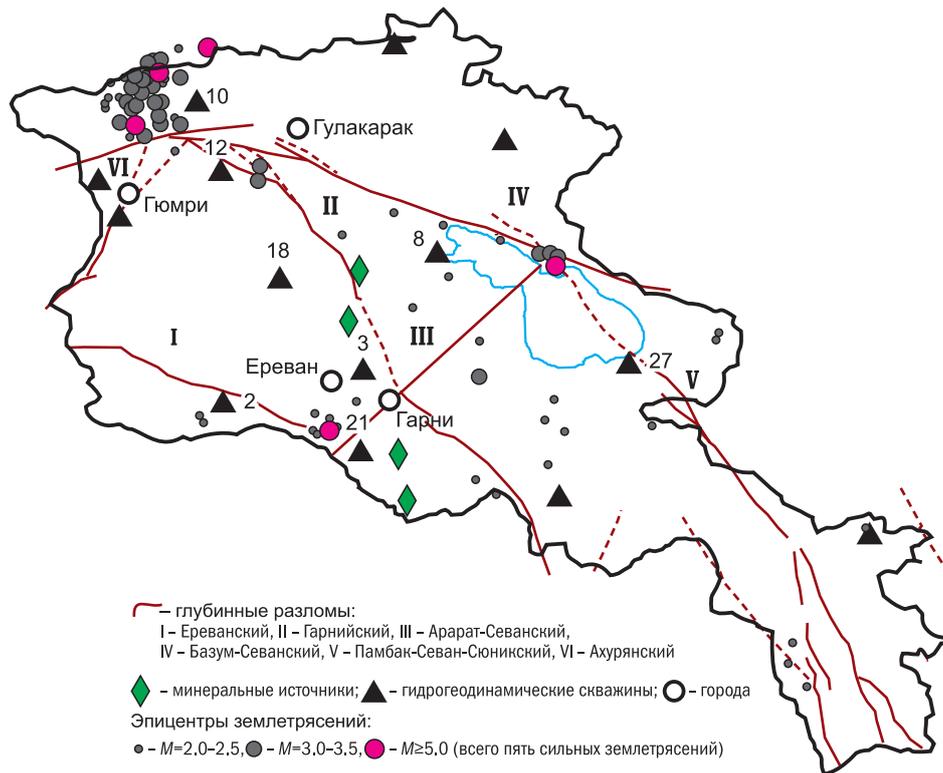


Рис. 3. Карта сейсмичности территории Армении за период 2019–2023 гг.

за период времени 2019–2023 гг. был построен график повторяемости землетрясений (рис. 4) по уравнению $\lg N = a - b \cdot M$ Б. Гутенберга и Ч. Рихтера [Рихтер, 1963], где a и b – постоянные величины, зависящие от сейсмичности в конкретном районе: a – сейсмичность, b – наклон графика повторяемости.

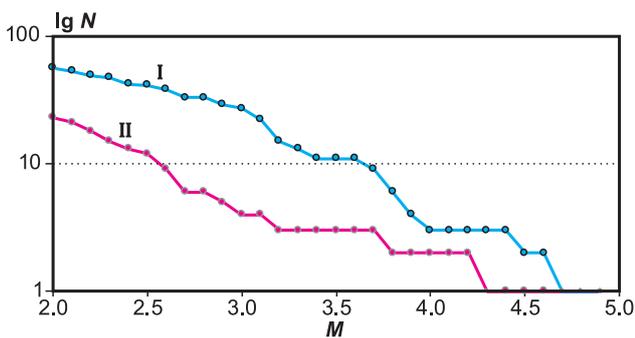


Рис. 4. Графики повторяемости землетрясений для двух сейсмоактивных районов территории Армении: I – для северной части Армении; II – для центральной части Армении

График повторяемости I (рис. 4) построен для северной части территории Армении в диапазоне координат $\varphi=40.8-41.3^\circ\text{N}$ и $\lambda=43.7-44.4^\circ\text{E}$.

График II на рис. 4 построен для центральной части региона ($\varphi=39.8-40.7^\circ\text{N}$, $\lambda=44.0-45.3^\circ\text{E}$). Коэффициенты графика повторяемости составили: для района I – $a=3.0$, $b=0.60$, для района II – $a=2.3$, $b=0.47$. Сопоставление полученных величин указывает на повышенное значение угла наклона $b=0.47$ графика II, величина которого примерно соответствует нормальному значению $b=0.5$ для территории всей Армении [Землетрясения ..., 2010]. Таким образом, график повторяемости землетрясений для района I отражает повышенную сейсмическую активность района Северной Армении. Прямолинейный участок на этом графике соответствует интервалу магнитуд $2.0 < M < 2.5$. С величин $M > 2.5$ график повторяемости землетрясений имеет нормальный вид, отражающий уменьшение числа землетрясений с ростом величины магнитуды.

Представленные на рис. 4 графики отличаются относительной высотой над осью абсцисс. График I расположен выше графика II, так как в северной части региона произошло большее количество землетрясений по сравнению с их числом в центральной зоне за одинаковый промежуток времени [Жалковский, 1988].

При рассмотрении распределения гипоцентров землетрясений было обнаружено, что

доминирующая глубина землетрясений составляет 10 км. Некоторая часть землетрясений происходила на глубинах 10–15 и 20–25 км. Такая локализация гипоцентров по глубине свидетельствует о том, что все произошедшие на территории Армении землетрясения являются коровыми.

Анализ данных о сейсмичности региона за последние годы показал, что эпицентры произошедших землетрясений были расположены преимущественно на севере и в центре Армении. Поведение графиков повторяемости для этих районов показывает, что в северном районе (Лори, Джавахетское нагорье) сейсмическая активность была выше, чем в центральной части региона.

Метод гидрогеологических предвестников

Гидрогеологический метод изучения и выявления эффектов, предшествующих тектоническим движениям земной коры Армении, применяется в Институте геофизики и инженерной сейсмологии имени А. Назарова (ИГИС) НАН РА на протяжении многих лет. В представленной работе продолжены исследования данных по уровню вод в скважинах, пробурённых по всему региону Армении [Киссин, 2009]. Расположение наблюдательных скважин и минеральных источников, на которых проводятся наблюдения, показано на рис. 3.

Гидрогеологический метод наблюдений базируется на чувствительности подземной гидросферы к изменениям напряжённо-деформированного

состояния земной коры. Гидрогеодинамические предвестники землетрясений непосредственно связаны с деформациями среды, развивающимися перед землетрясениями. Процессы деформирования геологической среды также могут отражаться в изменениях химического состава флюидов [Киссин, 2009].

Ранее изучение гидрогеологических предвестников в Армении позволило обнаружить эффекты, предшествующие землетрясениям, как по изменениям уровня подземных вод, так и по изменениям химического состава минеральных вод [Пашаян, 1998].

Исходя из мест расположения гидрогеодинамических скважин, проводилось их группирование по тектоническим блокам. Блоковая тектоника земной коры территории Армении приводится в работе геолога Г.А. Туманян [Пашаян, Туманян, 2011].

Ранее по графикам изменения уровня вод в скважинах были выявлены среднесрочные предвестники землетрясений продолжительностью от нескольких месяцев до года перед землетрясениями с $2.0 \geq M > 3.5$, произошедших на эпицентральных расстояниях до 33 км. Краткосрочные гидрогеологические эффекты проявлялись в скважинах: № 22, 27, 9, 18, 2, расположенных в активных Арарат-Спитакской и Ехегнадзор-Севанской поперечных зонах [Пашаян, Туманян, 1997]. Такие эффекты выделялись на фоне медленных повышений или понижений уровня подземных вод в виде ступенчатого падения или подъёма уровня продолжительностью не более пяти суток.

Таблица 1. Приуроченность скважин к отдельным тектоническим блокам

№ скважины	Районы пробурённых скважин	Тектонические блоки расположения скважин
1	Ноемберян	Лалварский
2	Мецамор	Мецаморский
3	Дзорахпюр	Ереванский
7	Горис	Кафанский
8	Севан	Севанский
9	Азатан	Амасийский
10	Ашоцк	Гюмрийский
11	Амасия	Амасийский
12	Ширакамут	Спитакский
15	Иджеван	Лалварский
18	Кучак	Апаран-Анкаванский
21	Арташат	Ереванский
22	Ехегнадзор	Вайский
27	Карчахпюр	Севанский

Гидрогеохимические эффекты в изменениях химического состава воды и растворённого в воде углекислого газа минеральных источников, предшествующих сейсмическим событиям (табл. 2), были обнаружены в зонах активных Гарнийского и Ереванского глубинных разломов Центральной Армении (рис. 3). В изменениях макрокомпонентов характерным признаком эффектов является уменьшение или увеличение среднего значения их концентраций. Проявлением эффекта в изменениях концентрации углекислого газа является резкое изменение этого значения. Формы вариаций гидрогеохимических эффектов в изменениях макрокомпонентов, в основном, бухтообразные (I) и ступенчатые (II), а в изменениях концентрации растворённого в воде углекислого газа CO_2 – импульсные (III) и скачкообразные (IV) (рис. 5).

В табл. 2 приводятся данные о проявлениях гидрогеохимических эффектов в связи с некоторыми землетрясениями 2021 и 2023 гг.

По полученным данным (табл. 2) видно, что продолжительность эффекта и время экстремума увеличиваются с повышением эпицентрального расстояния и магнитуды произошедшего землетрясения [Зубков, 1987]. Механизм формирования медленных и быстрых изменений концентраций растворённого вещества и газа объясняется, в общем случае, изменением напряжённо-деформированного состояния среды при подготовке сильных землетрясений [Киссин, Стеклянин, 1985].

Результаты исследований

В связи с Турецким землетрясением (06.02.2023 г., $M=7.8$) наблюдались изменения

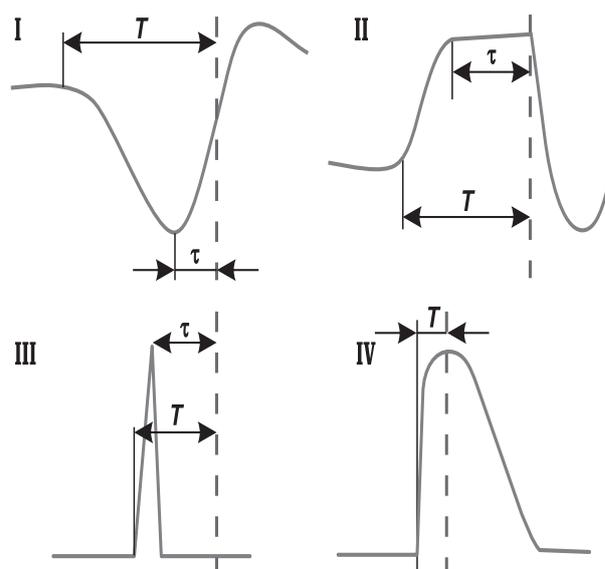


Рис. 5. Основные типы предвестниковых эффектов, зарегистрированных в вариациях химического и газового состава подземных вод: I, II, III, IV.

T – время эффекта, τ – время экстремума.
Пунктирной линией обозначен момент землетрясения

химического состава минеральных вод в источниках центрального региона Армении. На рис. 6а представлен график изменений во времени концентраций компонентов химического состава воды месторождения «Суренаван», расположенного на юго-западе центральной части Армении. Наблюдались одновременные вариации макрокомпонентов химического состава минеральной воды перед землетрясением, а также увеличение концентрации углекислого газа.

Таблица 2. Сопоставление характеристик гидрогеохимических эффектов и параметров произошедших землетрясений

Минеральные источники	Дата землетрясения, дд.мм.гггг	Δ , км	Магнитуда M	Гидрогеохимические эффекты		
				время экстремума τ	время эффекта T , месяцы	тип эффекта
Суренаван	13.02.2021	39	4.9	2.0	3.0	импульсный
Арзни	13.02.2021	38	4.9	4.0	3.0	бухтообразный
	06.02.2023*	901	7.8	1.5	7.4	бухтообразный
Бжни	05.02.2021	84	4.9	4.0	6.0	импульсный
	06.02.2023*	912	7.8	6.0	8.0	бухтообразный
Веди	13.02.2021	28	4.9	3.0	4.0	импульсный
	06.02.2023*	896	7.8	4.0	9.0	бухтообразный

Примечание – 06.02.2023* – Турецкое землетрясение.

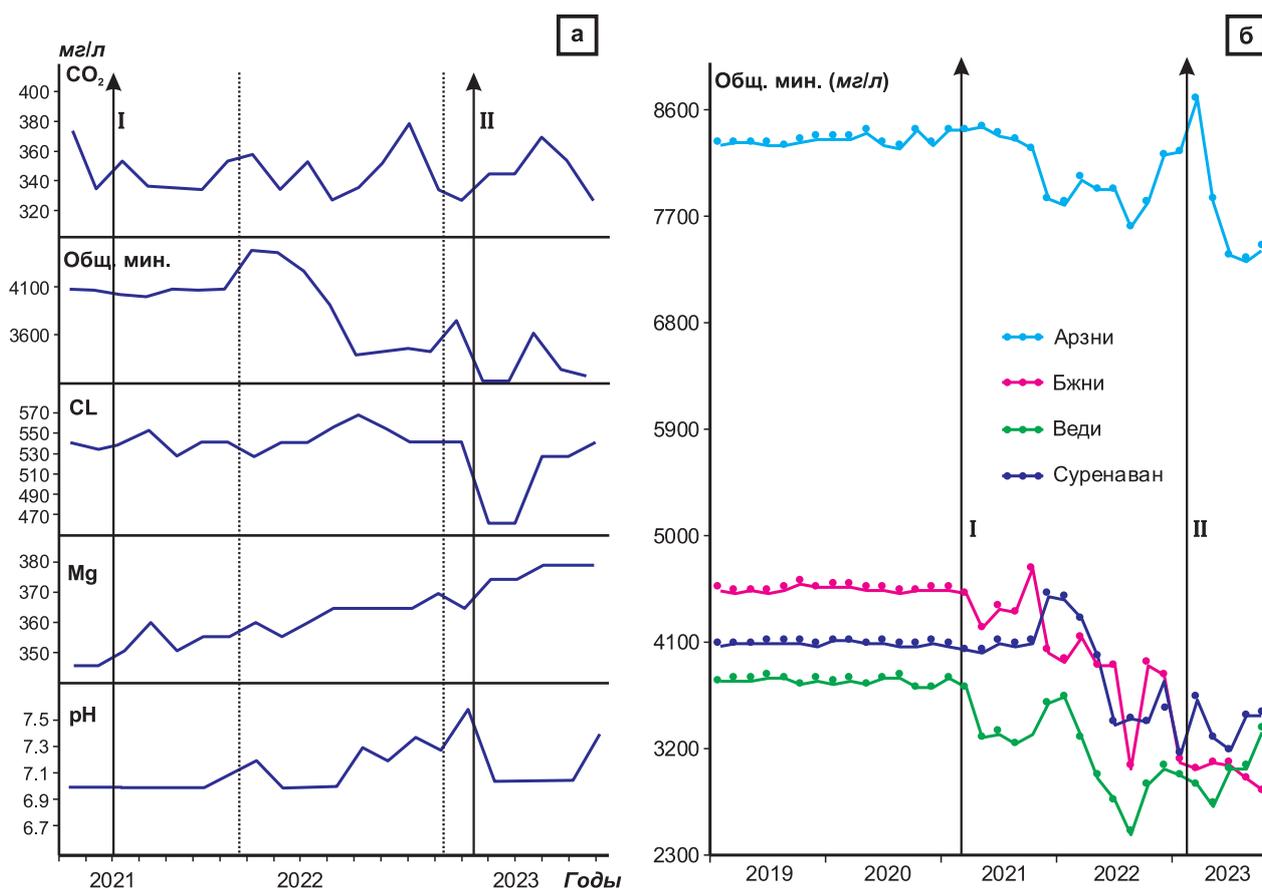


Рис. 6: а – вариации компонентов химического состава вод минерального источника «Суренаван»; б – изменение минерализации в воде месторождений Центральной Армении.

Стрелками указаны моменты землетрясений I (13.02.2021 г., $M=4.9$) и II (06.02.2023 г., $M=7.8$)

На рис. 6б представлены изменения во времени общей минерализации воды по четырём минеральным источникам. В связи с землетрясениями I (13.02.2021 г., $M=4.9$) и II (06.02.2023 г., $M=7.8$, Турция) прослеживались эффекты в изменениях химического состава воды «Суренаван», «Веди», «Арзни» и «Бжни». Как видно из графика (рис. 6б), в водах «Бжни», «Веди» и «Суренаван» наблюдается понижение значений минерализации перед Турецким землетрясением, начиная с середины 2021 года. По графику вариации минерализации воды в источнике «Арзни» перед землетрясением минерализация понизилась на 255 мг/л.

Результаты применения статистического метода обработки временных рядов изменения минерализации вод источников приводятся в табл. 3. Рассчитанный гидрогеохимический эффект $A=n \times d$ равен величине дисперсии, умноженной на n , где n – число, указывающее, во сколько раз увеличивается дисперсия во время сейсмического события для определяемо-

го химического элемента состава вод. Величина гидрогеохимического эффекта повышается с уменьшением эпицентрального расстояния (табл. 3).

Гидрогеохимические эффекты, выявленные перед местными землетрясениями на территории Армении, относились к категории среднесрочных и краткосрочных предвестников, а гидрогеохимические эффекты перед Турецким землетрясением по длительности проявления эффекта можно отнести к долгосрочным предвестникам.

Минеральные воды Центральной Армении приурочены к трещиноватым водовмещающим породам приразломных зон, формируются в результате смещения вод поверхностной и глубокой циркуляции [Киссин, 2009] и имеют повышенную минерализацию. Повышенная минерализация этих вод объясняется их связью с глубинными водами. Мы полагаем, что при сжатии водовмещающих пород происходит понижение общей минерализации минеральных вод из-за

Таблица 3. Вычисленные гидрогеохимические эффекты минеральных вод в результате произошедших землетрясений

Минеральный источник. Дата землетрясения, дд.мм.гггг	Параметры землетрясений			Δ , км	Гидрогеохимические эффекты (ГГХ). Общая минерализация			
	координаты		магнитуда M		\bar{K}^*	d	\bar{K}	$A=n \cdot d$
	φ , °N	λ , °N						
Суренаван								
13.02.2021	40.02	44.49	4.9	39	4075	14	4060	4d
06.02.2023	37.08	37.17	7.8	893	3901	363	3760	3d
Веди								
13.02.2021	40.02	44.49	4.9	28	3748	32	3700	3d
06.02.2023	37.08	37.17	7.8	896	3115	305	3030	3d
Арзни								
13.02.2021	40.02	44.49	4.9	38	8348	52	8420	2d
06.02.2023	37.08	37.17	7.8	901	8041	277	8200	2d
Бжни								
13.02.2021	40.02	44.49	4.9	56	4536	19	4520	1.5d
06.02.2023	37.08	37.17	7.8	912	3989	367	3810	2d

Примечание: \bar{K}^* – среднее арифметическое значение минерализации, δ – дисперсия, \bar{K} – фоновое значение минерализации, A – величина гидрогеохимического эффекта.

ослабления их связи с глубинными водами. При этом величина деформации в местах расположения минеральных источников перед Турецким землетрясением была не менее 10^{-8} , т.е. не менее эквивалентной величины приливной деформации.

Таким образом, несмотря на удалённость очага Турецкого землетрясения (>900 км), отмечается реакция минеральных вод Центральной Армении перед этим сейсмическим событием, что подтверждает высокую тензочувствительность приразломных зон выходов минеральных вод Армении на подготовку удалённых землетрясений. Для наглядного изображения изменения химического состава минеральных вод Центральной Армении в направлении север–юг был составлен геохимический профиль [Бродский, 1964] вдоль мест расположения месторождений минеральных вод (рис. 7). Гидрохимический профиль позволяет проследить характер вариаций химического состава минеральных вод по направлению с севера на юг, а также дать количественную оценку изменения ионного и катионного состава вод.

На рис. 8 представлена карта распределения величин расчётной деформации для мест расположения минеральных источников перед Турецким землетрясением, равная 10^{-8} , которая эквивалентна величине приливной деформации.

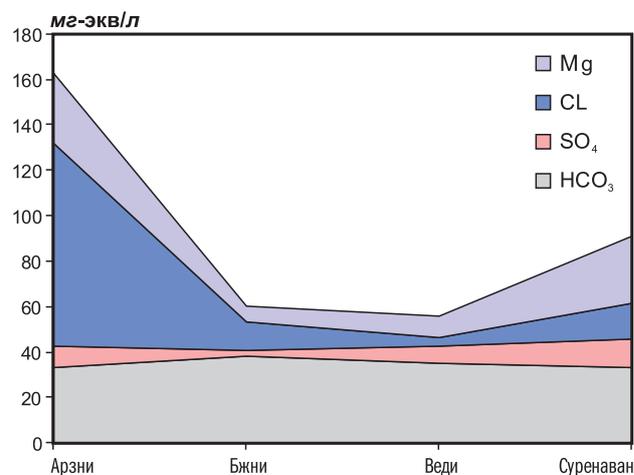


Рис. 7. Гидрохимический профиль изменения ионного состава минеральных вод месторождений Центральной Армении

Карта отражает изменения деформации земной коры территории Армении в виде сформированных по изолиниям деформации структур сжатия и растяжения.

Карта напряжённо-деформированного состояния земной коры территории Армении построена по вычисленным значениям деформации вокруг каждого пункта гидрогеологических наблюдений, исходя из количества землетрясений, произошедших за это время. Определялась

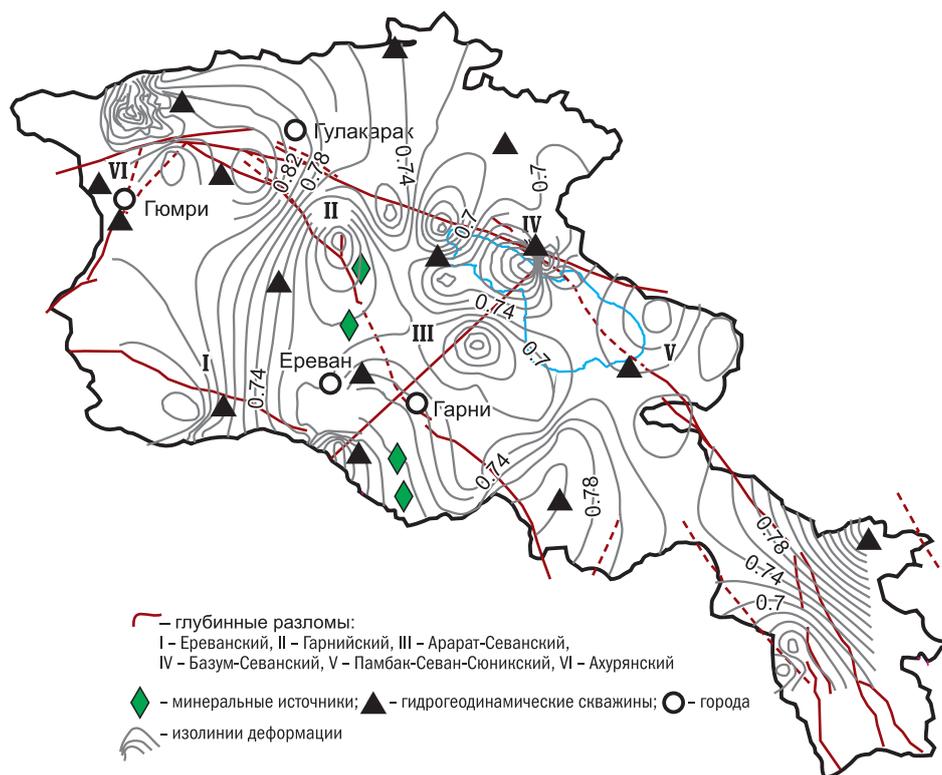


Рис. 8. Карта напряжённо-деформированного состояния земной коры территории Армении

взаимосвязь между координатами гидрогеологических пунктов наблюдений с теми сейсмическими событиями, эпицентральные расстояния и деформация которых определялись на основании методики [Добровольский и др., 1980]:

$$\varepsilon = \left(\frac{d}{10^{0.413M-2.66}} \right)^{-3},$$

где ε – деформация, d – эпицентральное расстояние, M – магнитуда землетрясения. Основное количество предполагаемых гидрогеологических предвестников регистрируется в зоне, совпадающей по своему размеру с зоной распространения деформаций. Радиус зоны проявления определялся по формуле $R=10^{-0.43M}$ (км). На основании полученных значений расчётных деформаций с использованием весовых коэффициентов строились карты изолиний равных значений деформаций.

Из рис. 8 можно сделать вывод, что за исследуемый период на территории Армении формировались деформации сжатия, приуроченные к тектоническим узлам пересечения глубинных разломов: Севанский узел на северо-западе оз. Севан, Араратский узел в районе пересечения Араратской зоны глубинных разломов с Арарат-Севанским разломом, а также к Ере-

ванскому и Ленинканскому узлам. На карте также выделяются сейсмоактивные участки вдоль Памбак-Севанского глубинного разлома, Арарат-Севанского разлома и центральной части Гарнийского глубинного разлома.

Величины расчётной деформации, определяемые для составления карты, принимали максимальные значения 10^{-6} и 10^{-7} чаще всего на севере региона в Ашоцком и Спитакском тектонических блоках и реже – в Ереванском и Вайском тектонических блоках. Как показал анализ полученных данных по двум сейсмоактивным участкам, сейсмотектоническая активность севера Армении выше таковой в центральной части региона за период 2019–2023 гг. Возможное объяснение этому – наличие сложной тектоники района, насыщенной активными глубинными разломами, и высокая активность современных движений земной коры в результате роста и расширения поднятий и активизации геодинамических процессов в пределах Гюмрийского тектонического блока и Джавахетского сектора [Бойнагарян, 1992]. По данным исследований тектонической активности северной части Армении авторами работы [Казарян, Саргсян, 2019] была дана дифференциация тектонических блоков по степени активности. Высокая тектоническая активность отмечается для блока

Восточно-Севанского хребта и восточного сегмента Памбакского блока. Средняя тектоническая активность характерна для Ашоцкого блока и восточного сегмента Базумского и Амасийского блоков. Низкая тектоническая активность характерна для западного сегмента Амасийского и Ширакского блоков.

В связи с усилением напряжённости северной и центральной частей региона за последние годы, рассмотрены вариации уровня вод в скважинах, характеристика которых приведена в работе [Григорян и др., 2015]. Построенные графики вариации уровня вод в скважинах северной и центральной частей региона за год, предшествующий Турецкому землетрясению, указывают на сильные изменения вариационных кривых, особенно по уровню воды в скважине № 10 (рис. 9).

На графике вариаций уровня вод в скважинах № 10, 12, 8 и 27 (рис. 9б) наблюдается тренд, показывающий длиннопериодное изменение напряжённо-деформированного состо-

яния среды, соответствующее сжатию земной коры Пюмрийского, Спитакского и Севанского тектонических блоков. По вариациям уровня вод в скважинах № 2, 3 (рис. 9б) проявление трендов понижения уровня воды может указывать на периодическое развитие деформации расширения коры Мецаморского и Ереванского тектонических блоков. Тренды повышения наблюдались в изменениях уровня воды в скважинах № 18 и 21 (рис. 9б). Возможно, они были связаны с подвижками внутри Апаран-Анкаванского тектонического блока и по Веди-Шоржинской системе разломов юго-восточного края Ереванского тектонического блока.

Гидрогеодинамические эффекты в виде ступенчатого подъёма или снижения уровня воды, выделяемые на фоне тренда со знаком, совпадающим с знаком тренда, ускоряют медленные деформационные процессы среды. Импульсные вариации уровня имеют в большинстве случаев противоположный знак, поэтому они слабо влияют на медленные деформационные процессы.

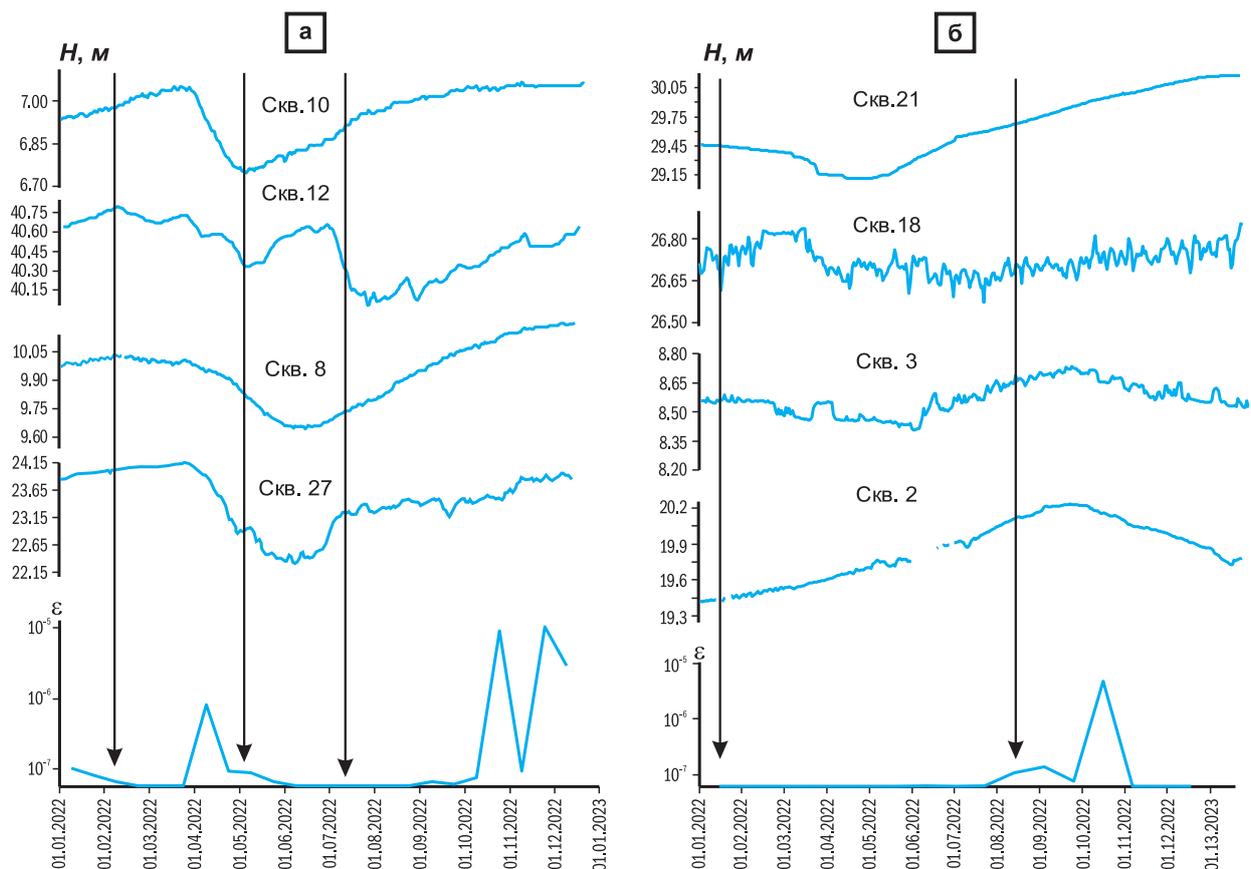


Рис. 9. Графики вариаций уровня вод в скважинах № 10, 12, 8, 27, 2, 3, 18 и 21 в сопоставлении с расчётными величинами объёмной деформаций ε перед землетрясениями.

Стрелками указаны землетрясения: 13.02.2022 г., $M=5.3$, $\Delta=13$ км; 02.05.2022 г., $M=4.6$, $\Delta=14$ км; 11.07.2022 г., $M=4.4$, $\Delta=13$ км; 19.01.2022 г., $M=2.4$, $\Delta=12$ км; 10.08.2022 г., $M=2.2$, $\Delta=11$ км

В изменениях уровня воды в скважине № 10 также проявлялись малоамплитудные периодические пилообразные колебания, показывающие подъёмы и резкие спады уровня воды. Предполагается зависимость пилообразных колебаний уровня воды от сейсмичности. Перед землетрясением периодичность пилообразных колебаний нарушалась, при этом длительность периодов проявления таких колебаний увеличивалась. На рис. 10 показаны такие колебания уровня вод в скважинах № 10, 18.

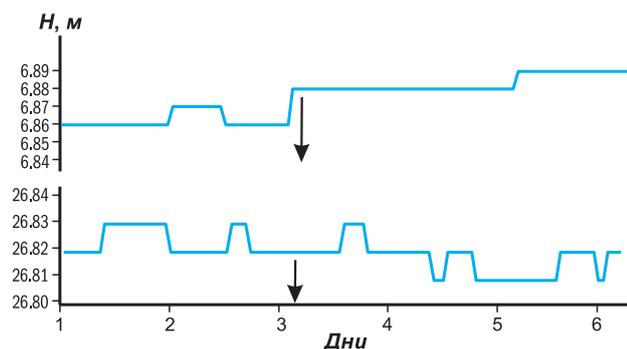


Рис. 10. Пилообразные колебания уровня воды в скважинах № 10 (вверху) и № 18 (внизу).

Стрелками указаны моменты землетрясений: 13.02.2022 г., $M=5.2$, $\Delta=88$ км; 11.07.2022 г., $M=4.4$, $\Delta=13$ км

Пилообразные колебания зафиксированы также в изменениях уровня воды в скважине № 21, расположенной в Ереванском тектоническом блоке в центральной части региона. Характерной особенностью пилообразных колебаний является то, что они происходят на фоне повышения или понижения уровня вод в скважине. В скважинах № 10, 18 пилообразные колебания зафиксированы на фоне повышения уровня вод и указывают на наличие периодических слабых деформаций земной коры. На основании приведённых данных возможно отметить активизацию геодинамических процессов земной коры рассматриваемых участков территории Армении.

Обсуждение

Анализ гидрогеохимической и гидрогеодинамической информации, получаемой в результате мониторинговых наблюдений, позволяет расширить поставленные задачи: 1 – выявление гидрогеологических эффектов в качестве возможных предвестников землетрясений, 2 – использование полученных гидрогеологических показателей в качестве индикаторов активизации геоди-

намических процессов земной коры исследуемой территории, 3 – составление карты напряжённо-деформированного состояния земной коры территории Армении по показателям гидрогеологических эффектов, отражающих напряжённые участки региона.

В результате проведённых исследований отмечена реакция минеральных вод Центральной Армении перед Турецким землетрясением, очаг которого удалён более чем на 900 км, что подтверждает высокую тензочувствительность приразломных зон выходов минеральных вод Армении.

Выводы

За исследуемый период времени выявлено, что наибольшее количество произошедших землетрясений имело место в северной и центральной частях территории Армении.

Для сопоставления режима сейсмичности отмеченных районов региона построены графики повторяемости землетрясений для северной и центральной частей. Сравнение коэффициентов графиков повторяемости показало повышенную сейсмическую активность района северной Армении.

Доминирующая глубина распределения гипоцентров землетрясений составляет 10 км, что свидетельствует о том, что все произошедшие на территории Армении землетрясения являются коровыми.

Группирование гидрогеологических скважин по тектоническим блокам и сопоставление вариаций уровня воды в скважинах с сейсмичностью позволяют оценить тектоническую активность блоков региона. Таким образом, определена тектоническая активность Гюмрийского, Ереванского и Севанского блоков.

Гидрогеодинамические эффекты, выявленные перед местными землетрясениями на территории Армении по гидрогеодинамическим скважинам № 10, 18, 3, 21, 27, относятся к категории среднесрочных предвестников. Определяемые гидрогеохимические эффекты по компонентам химического состава минеральных вод относятся к краткосрочным предвестникам.

Изменения гидрогеологических показателей перед Турецким землетрясением по длительности проявления эффекта можно отнести к долгосрочным предвестникам.

По составленной карте напряжённо-деформированного состояния земной коры следует, что за исследуемый период на территории Армении формировались деформации сжатия,

приуроченные к узлам пересечения глубинных разломов: Араратского, Ереванского и Ленинканского.

Как показал анализ сейсмичности и сейсмо-тектоники региона, активность севера Армении за период 2019–2023 гг. оказалась выше таковой в центральной части территории.

Литература

- Асланян А.Т.* Региональная геология Армении. – Ереван: Айпетрат, 1958. – 430 с.
- Бойнагрян Б.В.* Новейшая тектоника и тектонические напряжения Северо-Западной Армении: автореф. дисс. на соиск. канд. геол.-мин. наук. – М.: МГУ, 1992. – 22 с.
- Бродский А.А.* Основы гидрогеохимического метода поисков сульфидных месторождений. – М.: Недра, 1964. – 259 с.
- Габриелян А.А., Саркисян О.А., Симомян Г.П.* Сейсмоструктура Арм. ССР. – Ереван: Изд-во Ереванского университета, 1981. – 284 с.
- Григорян С.В., Пашаян Р.А., Арутюнян Л.В.* Гидрогеодинамические и гидрогеохимические предвестники землетрясений на территории Армении // Доклады НАН РА. – 2015. – № 1. – С. 50–58.
- Добровольский И.П., Зубков С.И., Мячкин В.И.* Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясения // Моделирование предвестников землетрясений. – М.: Наука, 1980. – С. 7–43.
- Жалковский Н.Д.* Закон повторяемости землетрясений и некоторые его следствия. – Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1988. – 29 с. (Препринт).
- Землетрясения Северной Евразии. 2004 год.* – Обнинск: ГС РАН, 2010. – 446 с. – EDN: UCHJAL
- Зубков С.И.* Времена возникновения предвестников землетрясений // Известия АН СССР. Физика Земли. – 1987. – № 5. – С. 87–91.
- Казарян К.С., Саргсян Р.С.* Пространственные особенности сейсмической активности морфоструктурных блоков Северной Армении в связи с тектонической активностью // Геология и Сейсмология. Ширакский государственный университет имени М. Налбандяна. – 2019. – № 2. – С. 149–163.
- Караханян А.С.* Активные разломы и сейсмичность Армянского нагорья // Современная геодинамика, активные разломы и сейсмическое районирование. Тезисы докладов XXIII Всесоюзного тектонического совещания «Геодинамика и развитие тектоносферы». – М., 1990. – С. 12–14.
- Киссин И.Г.* Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. – М.: Наука, 2009. – 328 с. – EDN: QKIMFN
- Киссин И.Г., Стеклянин Ю.И.* О формировании гидрогеохимических предвестников землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений / Отв. ред. Г.М. Варшал. – М.: Наука, 1985. – С. 23–29.
- Назаретян С.Н.* Глубинные разломы территории Армянской ССР (По геофизическим данным). – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1984. – 133 с.
- Пашаян Р.А.* Исследования гидрогеодинамических эффектов как предвестников землетрясений на территории Армении: дисс. на соиск. уч. степ. канд. мин. наук. – Ереван: НАН РА, 1998. – 163 с.
- Пашаян Р.А., Карапетян Д.К., Арутюнян Л.В., Товмасын К.Г.* Геодинамика очаговых зон сильных землетрясений Армении // Российский сейсмологический журнал. – 2023. – Т. 5, № 1. – С. 75–88. – DOI: 10.35540/2686-7907.2023.1.05. – EDN: JGRQUQ
- Пашаян Р.А., Туманян Г.А.* Краткосрочные гидрогеологические эффекты, связанные с современными движениями земной коры на территории Республики Армения // Известия НАН РА. Науки о Земле. – 1997. – Т. 50, № 1–2. – С. 74–80.
- Пашаян Р.А., Туманян Г.А.* Проявления периодичности в геодинамических процессах земной коры региона Армении по данным гидрогеодинамических скважин // Сборник научных трудов конференции, посвящённой 50-летию основания Института геофизики и инженерной сейсмологии им. академика А. Назарова НАН РА. – Гюмри: Изд-во «Гитутюн» НАН РА, 2011. – С. 166–181.
- Рихтер Ч.Ф.* Элементарная сейсмология. – М.: Иностранная литература, 1963. – С. 334.
- Трифонов В.Г., Караханян А.С., Кожурин А.И.* Активные разломы и сейсмичность // Природа. – 1989. – № 12. – С. 32–39.
- Karakhanyan A.S.* Active faults of Armenian upland // Proceedings of Scientific Meeting on the Seismic Protection, 12–13 July, 1993, Venice. – Venice, 1993. – P. 88–93.

Сведения об авторах

Пашаян Ромела Артаваздовна, канд. геол.-мин. наук, вед. науч. сотр. Института геофизики и инженерной сейсмологии имени А. Назарова Национальной академии наук Республики Армения (ИГИС НАН РА), г. Ереван, Республика Армения. E-mail: romellapashayan@sci.am

Карапетян Джон Костикович, канд. геол. наук, директор ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения. E-mail: jon_iges@mail.ru

Арутюнян Левон Варганович, канд. геол. наук, зав. лаб. Института общей и неорганической химии имени М.Г. Манвеляна Национальной академии наук Республики Армения (ИОНХ НАН РА), г. Ереван, Республика Армения. E-mail: levonharutyunyan35@mail.ru

Маргарян Сос Самвелович, канд. геол. наук, директор государственной некоммерческой организации «Территориальная служба сейсмической защиты» (Министерство внутренних дел Республики Армения) (ГНКО ТССЗ МВД РА), г. Ереван, Республика Армения. E-mail: msos78@hotmail.com

Геворгян Ани Амбацумовна, канд. геол. наук, руководитель комплексного отдела оценки сейсмической опасности ГНКО ТССЗ МВД РА, г. Ереван, Республика Армения. E-mail: ani_gevorkjan@mail.ru

Карамян Раффи Араикович, канд. геол. наук, науч. сотр. ИГИС НАН РА, г. Гюмри, Республика Армения. E-mail: rafo.karamyan@gmail.com

Товмасын Кристина Гагиковна, ст. инженер ИГИС НАН РА, г. Ереван, Республика Армения. E-mail: kristina.tovmasyan.2020@mail.ru

Seismotectonic activity of earthquake source zones in Northern and Central Armenia for the period 2019–2023

© 2024 R.A. Pashayan¹, J.K. Karapetyan², L.V. Harutyunyan³, S.S. Margaryan⁴,
A.A. Gevorgyan⁴, R.A. Karamyan², K.G. Tovmasyan¹

¹IGES NAS RA, Yerevan, Republic of Armenia; ²IGES NAS RA, Gyumri, Republic of Armenia;

³IGIC NAS RA, Yerevan, Republic of Armenia; ⁴RSSP MES RA, Yerevan, Republic of Armenia

Received September 20, 2023

Abstract The article is devoted to the study of seismotectonic activity of focal zones in Northern and Central Armenia. In order to assess the degree of activity of seismotectonics in two regions of the region. An analysis of the seismic regime was carried out and a graph of earthquake recurrence was constructed. The earthquake recurrence graph consists of two lines. The first reflects the frequency of earthquakes in the northern, the second in the central parts of the region. Through the use of hydrogeological methods for studying the geodynamic processes of the earth's crust and identifying hydrogeodynamic and hydrogeochemical effects that precede tectonic movements of the earth's crust. The nature and form of hydrogeochemical effects preceding earthquakes along the waters of mineral springs were determined. A map of the distribution of earthquake sources by seismically active and seismogenic places of deep faults has been compiled, highlighting the spatial location of deep faults in the earth's crust in the region. The study of the stress-strain state of the earth's crust in the region and the determination of deformation structures of compression and tension. The influence of the catastrophic Turkish earthquake on the stress-strain state of the earth's crust in the territory of Armenia has been studied. Turkish earthquake affected the change in the chemical composition of the mineral waters of central Armenia and the dynamics of waters in the hydrogeodynamic wells of the region.

Keywords Seismotectonics, earthquake, hydrogeodynamics, hydrogeochemistry.

For citation Pashayan, R.A., Karapetyan, J.K., Harutyunyan, L.V., Margaryan, S.S., Gevorgyan, A.A., Karamyan, R.A., & Tovmasyan, K.G. (2024). [Seismotectonic activity of source zones of earthquakes in Northern and Central Armenia for the period 2019–2023]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 6(1), 65–79. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2024.1.04>. EDN: MCFXUI

References

- Aslanyan, A.T. (1968). *Regional'naiia geologiiia Armenii* [Regional geology of Armenia]. Yerevan, Armenia: Aypetrat Publ., 408 p. (In Russ.).
- Boynagryan, B.V. (1992). [The latest tectonics and tectonic stresses of Northwestern Armenia. PhD mineral sci. abstr. diss.]. Moscow, Russia: MSU Publ., 22 p. (In Russ.).
- Brodsky, A.A. (1964). *Osnovy gidrogeokhimicheskogo metoda poiskov sul'fidnykh mestorozhdenii* [Fundamentals of the hydrogeochemical method of prospecting for sulfide deposits]. Moscow, Russia: Nedra Publ., 300 p. (In Russ.).
- Dobrovolsky, I.P., Zubkov, S.I., & Myachkin, V.I. (1980). [On assessing the size of the zone of manifestation of earthquake precursors]. In: *Modelirovanie predvestnikov zemletriasenii* [Modeling of earthquake precursors] (pp. 7–43). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Gabrielyan, A.A., Sarkisyan, O.A., & Simonyan, G.P. (1981). *Seismotektonika Arm. SSR* [Seismotectonics of the Arm. SSR]. Yerevan, Armenia: Yerevan University Publ., 284 p. (In Russ.).
- Grigoryan, S.V., Pashayan, R.A., & Harutyunyan, L.V. (2015). [Hydrogeodynamic and hydrogeochemical precursors of earthquakes on the territory of Armenia]. *Doklady NAN RA* [Reports of NAS RA], 1, 50–58. (In Russ.).
- Karakhanyan, A.S. (1990). [Active faults and seismicity of the Armenian Highlands]. In: *Sovremennaiia geodinamika, aktivnye razlomy i seismicheskoe raionirovanie. Tezisy dokladov XXIII Vsesoiuznogo tektonicheskogo soveshchaniia "Geodinamika i razvitie tektonosfery"* [Modern geodynamics, active faults and seismic zoning. Abstracts of the XXIII All-Union Tectonic Meeting "Geodynamics and development of the tectonosphere"] (pp. 12–14). Moscow, Russia. (In Russ.).

- Karakhanyan, A.S. (1993). Active faults of the Armenian Upland. In: *Proceedings of Scientific Meeting on the Seismic Protection*, 12-13 July, Venice, 88-93.
- Kazaryan, K.S., & Sargsyan, R.S. (2019). [Spatial features of seismic activity of morphostructural blocks of Northern Armenia in connection with tectonic activity]. *Geologiya i Seismologiya. Shirakskii gosudarstvennyi universitet imeni M. Nalbandiana* [Geology and Seismology. M. Nalbandian Shirak State University], 2, 149-163. (In Russ.).
- Kissin, I.G. (2009). *Fliuidy v zemnoi kore: geofizicheskie i tektonicheskie aspekty* [Fluids in the Earth's crust: geophysical and tectonic aspects]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 328 p. (In Russ.). EDN: QKIMFN
- Kissin, I.G., & Stklyanin, Yu.I. (1985). [On the formation of hydrogeochemical precursors of earthquakes]. In: *Gidrogeokhimicheskie predvestniki zemletriasenii. Otv. red. G.M. Varshal* [Hydrogeochemical precursors of earthquakes. Ed. G.M. Varshal] (pp. 23-29). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Nazaretyan, S.N. (1984). *Glubinnye razlomy territorii Armianskoi SSR (Po geofizicheskim dannym)* [Deep faults of the territory of the Armenian SSR (According to geophysical data)]. Yerevan, Armenia: AS Arm. SSR Publ., 133 p. (In Russ.).
- Pashayan, R.A. (1998). [Studies of hydrodynamic effects as precursors of earthquakes in Armenia. PhD mineral. sci. diss.]. Yerevan, Armenia: NAS RA Publ., 163 p. (In Russ.).
- Pashayan, R.A., & Tumanyan, G.A. (1997). [Short-term hydrogeological effects associated with modern movements of the Earth's crust on the territory of the Republic of Armenia]. *Izvestiia NAN RA. Nauki o Zemle* [Proceedings of NAS RA. Earth Science], 50(1-2), 74-80. (In Russ.).
- Pashayan, R.A., & Tumanyan, G.A. (2011). [Manifestations of periodicity in geodynamic processes of the Earth's crust of the Armenian region according to hydrogeodynamic wells]. In: *Sbornik nauchnykh trudov konferencii, posvyashchennoj 50-letiyu osnovaniya Instituta geofiziki i inzhenernoj seismologii im. akademika A. Nazarova NAN RA* [Collection of scientific papers of the conference dedicated to the 50th anniversary of the founding of the Institute of Geophysics and Engineering Seismology named after Ac. A. Nazarov of the NAS RA] (pp. 166-181). Gyumri, Armenia: Publ. house "Gitutyun" NAS RA. (In Russ.).
- Pashayan, R.A., Karapetyan, J.K., Arutyunyan, L.V., & Tovmasyan, K.G. (2023). [Geodynamics of source zones of strong earthquakes in Armenia]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 5(1), 75-88. (In Russ.). DOI: 10.35540/2686-7907.2023.1.05. EDN: JGRQUQ
- Richter, Ch.F. (1963). *Elementarnaia seismologiya* [Elementary seismology] (p. 334). Moscow, Russia: "Foreign Literature" Publ. (In Russ.).
- Trifonov, V.G., Karahanyan, A.S., & Kozhurin, A.I. (1989). [Active faults and seismicity]. *Priroda* [Nature], 12, 32-39. (In Russ.).
- Zemletryaseniia Severnoi Evrazii. 2004 god* (2010). [Earthquakes of the Northern Eurasia. 2004]. Obninsk, Russia: GS RAS Publ., 446 p. (In Russ.). EDN: UCHJAL
- Zhalkovsky, N.D. (1988). *Zakon povtoriaemosti zemletriasenii i nekotorye ego sledstviia* [The law of earthquake recurrence and some of its consequences]. Novosibirsk, Russia: IGiG SB AS USSR, 29 p. (In Russ.).
- Zubkov, S.I. (1987). [Times of occurrence of earthquake precursors]. *Izvestiia AN SSSR. Fizika Zemli* [Izvestiya, Physics of the Solid Earth], 5, 87-91. (In Russ.).

Information about authors

Pashayan Romela Artavazdovna, PhD, Leading Researcher of the Institute of Geophysics and Engineering Seismology after A. Nazarov of the National Academy of Sciences of Republic of Armenia (IGES NAS RA), Yerevan, Republic of Armenia. E-mail: romellapashayan@sci.am

Karapetyan John Kostikovych, PhD, Director of the IGES NAS RA, Gyumri, Republic of Armenia. E-mail: jon_iges@mail.ru

Harutyunyan Levon Vartanovich, PhD, Head of Laboratory of the Institute of General and Inorganic Chemistry after M.G. Manvelyan of the National Academy of Sciences of Republic of Armenia (IGIC NAS RA), Yerevan, Republic of Armenia. E-mail: levonharutyunyan35@mail.ru

Margaryan Sos Samvelovich, PhD, Director of the Regional Survey for Seismic Protection, Ministry of Emergency Situations, Republic of Armenia (RSSP MES RA), Yerevan, Republic of Armenia. E-mail: msos78@hotmail.com

Gevorgyan Ani Ambarcumovna, PhD, Head of Complex Department for Seismic Hazard Assessment of the RSSP MES RA, Yerevan, Republic of Armenia. E-mail: ani_gevorkjan@mail.ru

Karamyan Raffi Araikovich, PhD, Researcher of the IGES NAS RA, Gyumri, Republic of Armenia. E-mail: rafo.karamyan@gmail.com

Tovmasyan Kristina Gagikovna, Senior Engineer of the IGES NAS RA, Yerevan, Republic of Armenia. E-mail: kristina.tovmasyan.2020@mail.ru