

УДК 550.530

DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

Оригинальная статья

Оценка гидрогеологических показателей формирования напряженного состояния земной коры территории Армении

Р.А. Пашаян¹, Д.К. Карапетян¹, А.А. Геворкян², Р.А. Карамян¹

¹ Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. акад. Н. Назарова НАН РА, Республика Армения, 3515, г. Гюмри, ул. В. Саргсяна 5, e-mail: romellapashayan@sci.am;

² Региональная служба сейсмической защиты, Государственная некоммерческая организация, Республика Армения, 0082, г. Ереван, шоссе Цицернакаберд 8/1

Статья поступила: 26.01.2024, доработана: 01.04.2024, принята к публикации: 02.04.2024

Резюме: Актуальность работы. Изучение геодинамических процессов земной коры территории Армении проводится по широкому спектру геофизических полей: сейсмическое, гидрогеодинамическое, геохимическое, деформационное, тектоническое. Наблюдательная сеть включает: 14 гидрогеодинамических скважин, пробуренных в сеймотектонических зонах региона и источники минеральных вод Центральной Армении – Суренаван, Веди, Арзни и Бжни. Гидрогеологические показатели гидрогеодинамики, химического состава подземных вод территории Армении при сопоставлении с текущей сейсмичностью региона являются индикаторами формирования напряженно-деформированного состояния земной коры региона. **Цель исследований.** Анализ сейсмичности, составление карт пространственно-временного распределения сейсмичности и изучение изменений напряженно-деформированного состояния земной коры региона по вариациям гидрогеологических показателей. Задачей исследования является определение характерных вариаций гидрогеохимических и гидрогеодинамических показателей и изучение эффектов-предвестников в связи с сеймотектоническим процессом. **Методы исследования.** Применяемый метод гидрогеологического мониторинга основан на способности подземных вод реагировать на изменение напряженно-деформированного состояния земной коры региона. Для обработки временных рядов вариации подземных вод и компонентов химического состава минеральных вод применялись статистические методы и учет тензочувствительности мест расположения пунктов наблюдений. **Результаты работ.** Анализ сейсмичности территории Армении за исследуемый период указывает на приуроченность очагов землетрясений к глубинным разломам: Ереванскому, Арарат-Севанскому и Памбак-Севанскому. Наблюдается концентрация очагов землетрясений на севере региона, в Приереванской разломной зоне и на восточном побережье оз. Севан. Гидрогеодинамические эффекты, предшествующие произошедшим землетрясениям, выявлены по вариациям подземных вод в гидрогеодинамических скважинах сети наблюдений и по компонентам химического состава минеральных вод источников. Построенная карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении отражает характер деформации в виде сжатия в Гюмрийском, Ереванском и Севанском тектонических блоках. В перечисленных тектонических блоках расположены гидрогеологические пункты мониторинговых наблюдений, по которым получены аномальные изменения величин гидрогеологических показателей и содержания CO₂, растворенного в минеральных водах.

Ключевые слова: землетрясение, деформация, земная кора, мониторинг, тектоника, гидрогеодинамика, геохимия, скважина.

Для цитирования: Пашаян Р.А., Карапетян Д.К., Геворкян А.А., Карамян Р.А. Оценка гидрогеологических показателей формирования напряженного состояния земной коры территории Армении. *Геология и геофизика Юга России*. 2024. 14(2): 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

Original paper

Assessment of hydrogeological indicators of the formation of the stress state of the Earth's crust on the territory of Armenia

R.A. Pashayan¹, D.K. Karapetyan¹, A.A. Gevorkyan², R.A. Karamyan¹

¹ Institute of Geophysics and Engineering Seismology named after. acad. N. Nazarova NAS RA, 5 V. Sargsyan Str., Gyumri 3515, Republic of Armenia,
e-mail: romellapashayan@sci.am;

² Regional Seismic Protection Service, State non-profit organization, 8/1 Tsitsernakaberd highway, Yerevan 0082, Republic of Armenia

Received: 26.01.2024, revised: 01.04.2024, accepted: 02.04.2024

Abstract: Relevance. The study of geodynamic processes of the Earth's crust in Armenia involves a wide range of geophysical fields such as seismic, hydrogeodynamic, geochemical, deformational, and tectonic. The monitoring network includes 14 hydrogeodynamic wells drilled in seismotectonic zones and mineral water sources in Central Armenia. Hydrogeological indicators and the chemical composition of underground waters are compared with the current seismicity of the region to indicate the formation of stress-deformed state of the Earth's crust. **The research aims** to analyze seismicity, create maps of spatial-temporal seismic distribution, and study changes in the stress-deformed state of the region based on hydrogeological variations. The research task is to determine characteristic variations in hydrogeochemical and hydrogeodynamic indicators and study precursor effects related to the seismotectonic process. **Methods.** Application of hydrogeological monitoring method based on groundwater's response to changes in stress-deformed state of the region. Statistical methods used to process temporal variations of underground waters and chemical components of mineral waters. Consideration of the sensitivity of observation points' locations. **Results.** Analysis of seismicity in Armenia indicates that seismic sources are associated with deep faults like the Yerevan, Ararat-Sevan, and Pambak-Sevan faults. Concentration of seismic sources in the northern region, the Pre-Yerevan fault zone, and the eastern coast of Lake Sevan is observed. Hydrogeodynamic effects preceding earthquakes are identified through variations in underground waters in monitoring wells and chemical components of mineral water sources. The constructed map of stress-deformed state of the Earth's crust in Armenia reflects the deformation structure in compression form in Gyumri, Yerevan, and Sevan tectonic blocks. In the listed blocks, anomalous changes in hydrogeological parameters and CO₂ dissolved in mineral waters were obtained.

Keywords: earthquake, deformation, Earth's crust, monitoring, tectonics, hydrogeodynamics, geochemistry, well.

For citation: Pashayan R.A., Karapetyan D.K., Gevorkyan A.A., Karamyan R.A. Assessment of hydrogeological indicators of the formation of the stress state of the Earth's crust on the territory of Armenia. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2024. 14(2): 61-76. DOI: 10.46698/VNC.2024.40.17.005

Введение

С 1977 г. на Камчатке проводятся непрерывные наблюдения за режимом подземных вод. Одной из главных практических задач гидрогеологического мониторинга является выявление в реальном времени гидрогеологических предвестников сильных землетрясений [Рябинин и др., 2009]. По результатам многолетних исследова-

ний ученых всего мира, в т. ч. сейсмологов стран Центральной Азии, гидрогеологический метод прогноза землетрясений относится к одним из наиболее достоверных [Султанходжаев, 2006].

За последние годы широко используются методы мониторинга для наблюдений за состоянием различных природных сред, контроля геодинамических процессов. В частности, в представляемой работе исследования проводились методом гидрогеологического мониторинга земной коры. Метод гидрогеологического мониторинга земной коры разработан в институте Физики Земли РАН [Киссин, 1993]. Метод основан на способности подземных вод реагировать на изменения напряженно-деформированного состояния земной коры, изучении эффектов-предвестников, связанных с землетрясениями, оценке величины деформации пород по наблюдаемым вариациям гидрогеологических показателей. Мониторинг включает измерения уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, пробуренных в тектонически активных участках земной коры территории Армении, и режимные наблюдения за химическим составом вод и углекислого газа, растворенного в воде минеральных источников Центральной Армении. Метод, также включает анализ сейсмического режима территории Армении. Данные по уровню вод гидрогеодинамических скважин и каталог землетрясений предоставляет региональная служба сейсмической защиты Государственной Некоммерческой Организации Республики Армения (ГНКО РА). Мониторинг слежения за химическим составом минеральных вод проводится в лаборатории «Экологическая Геофизика и Гидрогеодинамика» ИГИС им. А.Г. Назарова. В представленной работе продолжены исследования данных по уровню вод в скважинах, пробуренных по всему региону Армении, методом гидрогеологических предвестников (ГГД) [Киссин, 2015]. Изучение гидрогеологических предвестников в Армении позволило выявить гидрогеологические эффекты, как по уровню подземных вод, так и по химическому составу минеральных вод, предшествующим землетрясениям [Пашаян, 1998]. Метод гидрогеологических предвестников включает принципы организации регистрации наблюдений, способы обработки и интерпретации данных. Обработка данных сводилась к выделению полезного сигнала на фоне помех. Для фильтрации помех использованы статистические методы обработки: вычисление интерполяционных многочленов, корреляционный анализ, выявление скрытых периодичностей и цифровая фильтрация. В результате применения метода и сопоставления полученных данных по гидродинамике и динамике концентрации элементов химического состава вод с сейсмичностью региона, выявлены гидрогеологические эффекты, предшествующие землетрясениям и другим тектоническим процессам земной коры территории Армении за исследуемый период.

Исходные данные и методы исследований

Исходными данными для исследований являются каталоги землетрясений за последние три года (2021–2023 гг.) с $M \geq 2,5$, мониторинговые данные по вариациям уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, пробуренных на тектонико-активных участках территории Армении, и по изменению концентрации параметров химического состава минеральных вод Центральной Армении. Геолого-тектонические, гидрогеологические и геофизические условия и высокая сейсмичность территории Армении дают возможность для исследований геодинамических процессов земной коры и оценки напряженно-деформированного состояния сейсмоактивных зон во времени и пространстве.

Территория Армении характеризуется зональным строением, обусловленным разграничивающими ее четырьмя разломами глубокого заложения: Лалвар-Мравская, Базумо-Севанская, Анкаван-Сюникская и Ереванская [Асланян, 1968] (рис. 1). В гидрогеологическом отношении регион представляет собой высокоприподнятую область дренажа и относится к зоне интенсивного водообмена с направлением стока поверхностных вод от складчатого сооружения в сторону Куринской и Среднеараксинской депрессий. Для размещения наблюдательных скважин выбирались участки и водоносные горизонты с низким уровнем неконтролируемых помех с тем, чтобы определить особенности режима этих горизонтов и реакции на подготовку землетрясений [Wang et al., 2010]. Гидрогеохимические наблюдения включают данные по химическому составу вод минеральных источников: Веди, Суренован, Бжни и Арзни. Сеть гидрогеохимических наблюдений размещена по всей территории Центральной Армении (рис. 1).

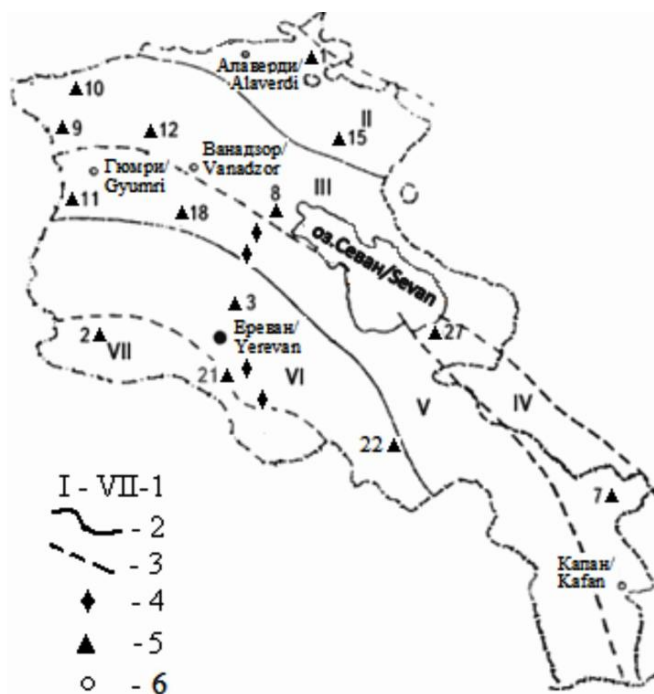


Рис. 1. Схема тектонической зональности Армении, составленная А.Т. Асланяном.
1 – номера зон; 2 – границы оротектонических поясов; 3 – границы тектонических зон;
4 – минеральные источники, 5 – гидрогеохимические скважины, 6 – города /

Fig. 1. Scheme of tectonic zonality of Armenia, compiled by A.T. Aslanyan.
1 – zone numbers; 2 – boundaries of orotectonic belts; 3 – boundaries of tectonic zones;
4 – mineral springs, 5 – hydrogeochemical wells, 6 – cities

Наблюдения за вариациями уровня вод ведутся в неглубоких водоносных горизонтах гидрогеодинамических скважин. Изучение режимобразующих факторов позволило выявить гидрогеодинамические эффекты, предшествующие изменениям напряженно-деформированного состояния среды и являющиеся индикаторами современных геодинамических процессов. Для обработки данных по изменению уровня вод в гидрогеодинамических скважинах временной ряд приводится к равномерной дискретности с периодом – 1 сутки. Далее сезонные вариации удалялись цифровым фильтром [Гриневский и др., 1983], снимающим частотный диапазон

спектра, содержащий сезонную и кратные ей гармоники. Обработанная кривая сопоставлялась с сейсмическими событиями. С целью повышения корреляции полученных данных с сейсмичностью в работе рассмотрена методика выборки сейсмических событий из каталога для различных наблюдательных скважин с учетом деформаций в окрестностях эпицентра готовящегося землетрясения [Пашаян и др., 2006]. Для выделения гидрогеологических эффектов землетрясений рассчитывалась деформация D , которая должна развиваться на месте расположения наблюдательной скважины в зависимости от ее расстояния до эпицентра и магнитуды землетрясения. Расчетная деформация определялась по формуле И.Г. Добровольского [Добровольский, 1984]

$$\varepsilon = \left[\frac{10^{0,413M-2,66}}{R} \right]^3$$

где M – магнитуда землетрясения, R – эпицентральное расстояние (км).

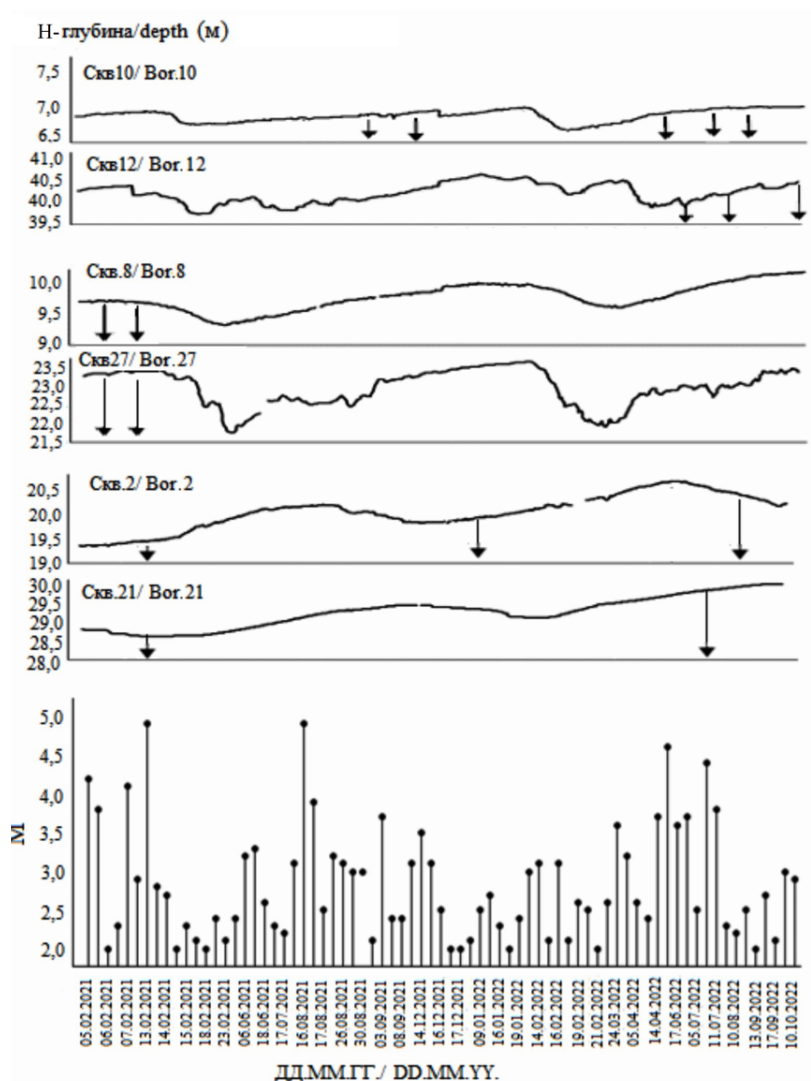


Рис. 2. Графики вариаций уровня вод в гидрогеодинамических скважинах, последняя диаграмма произошедших землетрясений по магнитуде /

Fig.2. Graph of water level variations in hydrogeodynamic wells, the last diagram of earthquakes that occurred by magnitude

При этом имелось в виду, что в процессе подготовки землетрясений могут быть выявлены эффекты в том случае, если расчетная деформация имеет величину не менее 10^{-8} , т.е. превышает величину земно-приливной деформации. В некоторых случаях рассматривается возможная высокая тензочувствительность места расположения скважины, где следует учитывать деформации порядка 10^{-9} и более. Радиус зоны проявления гидрогеологических эффектов определяется по формуле: $R = 10^{0,43M}$ (км), где M – магнитуда землетрясения [Добровольский и др., 1980]. Таким образом, обработанные временные ряды вариаций уровня вод в скважинах № 10, 12, 2, 21, 8 и 27, за 2019–2023 гг. приводятся в виде графиков (рис. 2).

Гидрогеодинамическая скважина-10 расположена на границе Севанской и Приараксинской тектонических зон и в Гюмрийском тектоническом блоке, за время исследований вокруг скважины произошло 15 землетрясений с $2 < M \leq 5.0$. Перед землетрясением 03.05.2022 с $M=4,6$ наблюдается бухтообразное понижение уровня воды в скважине (рис. 2), что вероятно, указывает на то, что в окрестности скважины преобладали деформации растяжения, которые приводили к приросту порово-трещинной емкости и повышению проницаемости пласта. Скважина-12 пробурена в зоне активного Спитакского разлома, в Спитакском тектоническом блоке. Землетрясение 02.05.2022 с $M=4,6$ вызвало ступенчатое изменение уровня воды (рис. 2) соответствующее деформации сдвига.

Скважина-2 расположена на севере Мецаморского тектонического блока, ограниченного с севера Ереванским глубинным разломом. Землетрясение 13.02.2021 с $M=4,9$ вызвало бухтообразное понижение уровня воды в скважине, это указывает на деформацию растяжения вокруг скважины. Скважина-21 расположена к ЮВ от Ереванского тектонического блока. Землетрясение 13.02.2021, $M=4,9$ вызвало ступенчатое понижение уровня воды в скважине, что так же создало деформацию растяжения вокруг скважины.

Скважина-8 расположена на СЗ Севанского тектонического блока. Землетрясения: 05.02.2021, $M=4,2$; 13.02.2021, $M=4,1$ вызвали бухтообразный подъем уровня воды в скважине. Скважина-27 расположена на ЮВ Севанского тектонического блока. Землетрясения: 05.02.2021, $M=4,2$; 13.02.2021, $M=4,1$ вызвали бухтообразный подъем уровня воды в скважине. Вариации уровня вод в скважинах 8 и 27 (рис. 2) перед перечисленными землетрясениями демонстрируют повышение уровня, связанное с воздействием сжимающих напряжений; в окрестностях скважин сформирована деформация растяжения.

Таким образом, по характеристикам гидродинамических показателей вод скважин, выявлены деформационные процессы земной коры в виде структур деформации: растяжения и сжатия [Milyukov et al., 2011].

Мониторинговые наблюдения проводятся за химическим составом минеральных вод Центральной Армении: Суренаван, Веди, Арзни и Бжни. Задачей гидрогеохимического мониторинга является выявление гидрогеохимических эффектов, выраженных преимущественно в изменениях макрокомпонентного и газового состава вод, сопутствующих геодинамическим движениям земной коры. Исследуются основные компоненты химического состава минеральных вод (Cl , HCO_3 , SO_4 , Mg), газового- CO_2 при сопоставлении с сейсмичностью.

Подземные воды района исследований относятся к межгорной Араратской котловине. Араратская котловина является областью накопления подземного стока и

формирования грунтовых и напорных водоносных горизонтов и включает большие запасы минеральных вод [Геология Армянской ССР, 1969]. **Суренованское** месторождение минеральных вод расположено в середине структурного блока Приараксинской зоны, основным структурным элементом этой зоны является Ереванский глубинный разлом. **Вединское** месторождение минеральных вод приурочено к зоне тектонического нарушения. В динамике минеральных вод месторождения некоторую роль играет смешивание с минеральными глубинными грунтовыми водами, что приводит к изменению общей минерализации. **Арзни** в структурном отношении приурочено к средней части Разданской впадины тектонического происхождения. В гидрогеологическом отношении Разданская впадина представляет артезианский бассейн. **Бжнинское** месторождение минеральных вод приурочено к пересечению Разданского и Бжнинского тектонических нарушений. Участок месторождения расположен в ядре Арзаканской складки, сложенной метаморфическими сланцами, прорванными гранитами. В пределах месторождения ядро складки разорвано крупным тектоническим нарушением постэоценового возраста. Приуроченность минеральных вод к глубинным тектоническим разломам, которым характерна повышенная геодинамика, отражается на химическом составе минеральных вод в виде аномальных изменений некоторых химических параметров. Для наглядного изображения химического состава вод по каждому месторождению вод составлена формула М.Г. Курлова [Самарина, 1977], (табл. 1). Газонасыщенность (CO_2 , г/л) вод минеральных источников: Бжни и Арзни – высокое (1–0,5), Веди – среднее (0,5–1,0), Суренаван – низкое (0,1–0,5). Общая минерализация вод месторождений составляет от 3,7 мг/л до 8,3 мг/л, по величине рН (6,7–7,0) относятся к типу нейтральных вод.

Таблица 1 / Table 1

**Формулы химического состава вод минеральных источников /
Formulas of the chemical composition of mineral spring waters**

Минеральные воды / Mineral water	Формулы вод / Water formulas	Наименования воды / Names of water
Бжни / Bjni	$CO_2 1.2 M 4.5 \frac{HCO_3 71 CL 23 SO_4 6}{Na 71 Ca 15 Mg 10} pH 6.7 T 21$	Гидрокарбонатно-натриевая-хлоридная / Hydrocarbonate-sodium-chloride
Арзни / Arzni	$CO_2 1.3 M 5.9 \frac{CL 67 HCO_3 26 SO_4 7}{Na 73 Mg 14 Ca 10} pH 6.8 T 22$	Хлоридно-натриево-гидрокарбонатная / Chloride-sodium-bicarbonate
Веди / Vedi	$CO_2 1.2 M 3.7 \frac{HCO_3 79 SO_4 15 CL 6}{Ca 43 Na 33 Mg 22} pH 6.7 T 22$	Гидрокарбонатно-кальциево-магниевая / Hydrocarbonate calcium magnesium
Суренаван / Surenavan	$CO_2 0.35 M 4.0 \frac{HCO_3 46 SO_4 30 CL 23}{Mg 50 Na 37 Ca 10} pH 7.0 T 22$	Магниево-гидрокарбонатно-натриево-сульфатно-хлоридная / Magnesium-Hydrocarbonate-Sodium-Sulfate Chloride

Статистический анализ фактического материала показал, что наиболее информативной характеристикой для получения критерия краткосрочного прогноза времени землетрясений служит дисперсия содержания углекислого газа в воде на некотором временном интервале. Рассматриваемый метод прогноза основан на статистической оценке изменчивости дисперсии содержания углекислого газа в смежных временных интервалах [Барсуков и др., 1992]. При этом используется среднее значение дисперсии, а также скорость ее изменения. Статистическая обработка временного ряда изменения концентрации углекислого газа проводилась по воде минерального источника Суренаван (рис. 3). Среднее значение содержания углекислого газа в воде составляет – 321 мг/л. Построен график вариации временного ряда углекислого газа (рис. 3) по данным лабораторного анализа проб воды минерального источника. График вариации дисперсии CO_2 составлен по значению дисперсии, которая равняется среднему квадрату отклонений отдельных значений параметра от общего среднего значения их. Полученная картина отражает периоды повышения и соответствующего снижения значений дисперсии. Полученный результат сопоставлялся с сейсмическими событиями, имевшими место на разном удалении от пункта наблюдения (мин. источник Суренаван). Перед сейсмическими событиями вначале происходит повышение величины дисперсии, а потом ее понижение. Чаще всего сейсмические события соответствуют минимальным значениям дисперсии, что допустимо принять в качестве прогнозного признака.

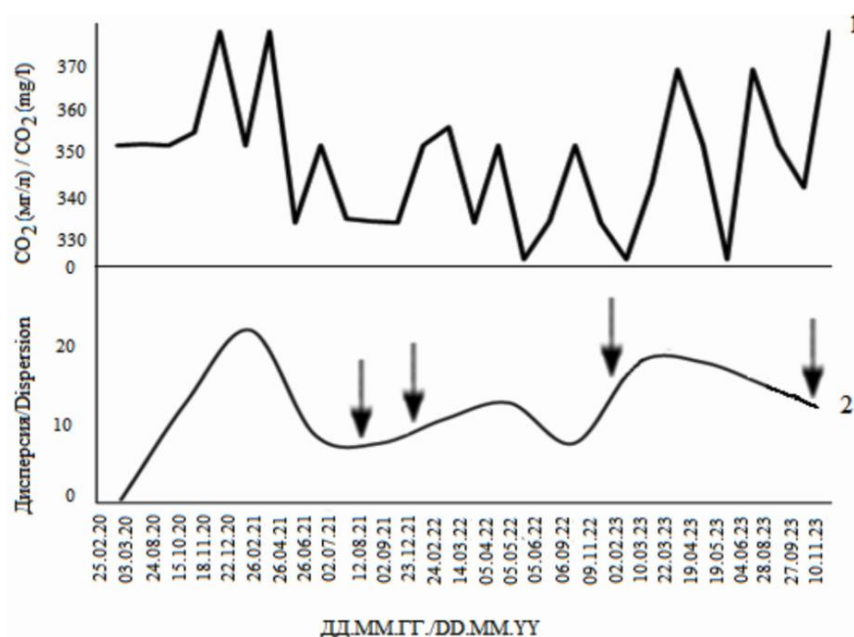


Рис. 3. Изменение величин дисперсии содержания углекислого газа, растворенного в воде минерального источника – Суренаван. 1 – фактические данные содержания CO_2 , 2 – дисперсия содержания CO_2 , стрелками указаны землетрясения /

Fig.3. Change in the dispersion of carbon dioxide dissolved in the water of a mineral spring - Surenavan. 1 – actual data – CO_2 , 2 – dispersion, CO_2 , arrows indicate earthquakes

Как видно из рисунка 3 сейсмические события (табл. 2) отразились на дисперсии содержания углекислого газа в воде минерального источника Суренаван. Землетрясения происходят на спаде величины дисперсии после соответствующего его повышения, и имеют бухтообразную форму.

Таблица 2 / Table 2

**Параметры землетрясений, произошедших на эпицентральной
расстоянии 36-893 км от минерального источника Суренаван /
Parameters of earthquakes that occurred at the epicentral distance (36-893 km)
from the mineral spring – Surenavan**

Дата землетрясений/ Date of earthquakes	φ , °	λ , °	M	R, км/ R, km	Объемная деформация/ Volumetric deformation	Минеральный источник/ Mineral spring
26.08.2021	40,12	45,03	3,3	49	$1,10 \cdot 10^{-9}$	Суренаван/Surenavan
13.02.2022	41,14	43,99	5,4	172	$9,93 \cdot 10^{-9}$	Суренаван/Surenavan
06.02.2023	37,17	37,08	7,8	893	$6,64 \cdot 10^{-8}$	Суренаван/Surenavan
13.11.2023	39,48	44,62	4,3	36	$4,66 \cdot 10^{-8}$	Суренаван/Surenavan

φ – широта, λ – долгота, M – магнитуда, R – эпицентральной расстояние /
 φ – latitude / λ – longitude, M – magnitude, R – epicentral distance

Как видно из таблицы 2, эпицентры землетрясений находились на расстоянии от 36 км до 893 км, а напряженно-деформированное состояние земной коры в окрестностях минерального источника Суренаван оценивалось величиной объемной деформации от 10^{-9} до 10^{-8} . В таблице 2 указано землетрясение (06.02.2023, M=7,8) [Геодакян и др., 2023], произошедшее на эпицентральной расстоянии 893 км от минерального источника Суренаван, при этом расчетная деформация составила 10^{-8} , что эквивалентно величине приливной деформации. Таким образом, несмотря на удаленность очага Турецкого землетрясения (>800 км), отмечается реакция минеральной воды Суренаван на это сейсмическое событие, что ещё раз подтверждает высокую тензочувствительность приразломных зон выхода минеральных вод Армении на удалённые землетрясения [Киссин, 1985].

Результаты исследования

Динамика изменения сейсмического режима в регионе, за последние три года (согласно каталогу сейсмических событий за 2020–2023 гг.), приводится на рис. 4. Составленный график распределения землетрясений по годам указывает на ослабление сейсмичности в 2023 году. За период наблюдений на территории Армении локализован 101 эпицентр местных землетрясений с M>2.

N-количество землетрясений/
N-quantity of earthquakes

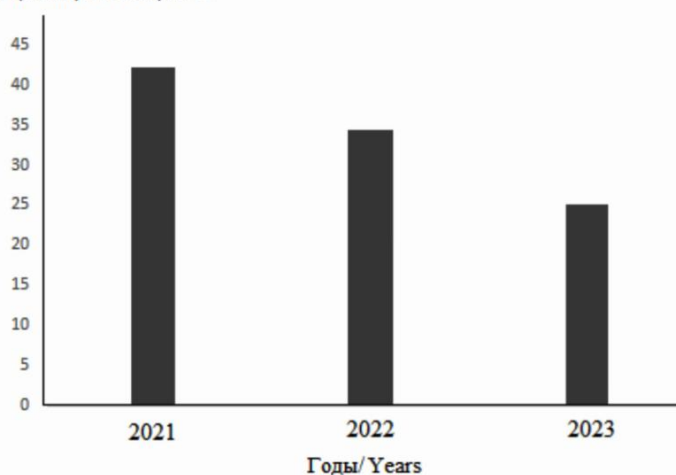


Рис. 4. Распределение количества землетрясений на территории Армении за 2021–2023 гг. (N – количество землетрясений) /
Fig. 4. Distribution of the number of earthquakes on the territory of Armenia for 2021–2023 (N – quantity of earthquakes)

Карта эпицентров произошедших землетрясений отражает сейсмичность во времени и пространстве на напряженных участках (концентрация эпицентров землетрясений) земной коры с повышенной активностью геодинамических процессов (рис. 5). Карта сейсмичности указывает на концентрацию эпицентров землетрясений на севере региона, на Джавахетском нагорье. Концентрация эпицентров землетрясений наблюдается также на восточном побережье оз. Севан, где скопления очагов землетрясений приурочены к Памбак – Севанскому глубинному разлому. Эпицентры землетрясений фиксируются в центральной части региона, где очаги произошедших землетрясений тяготеют к Ереванскому глубинному разлому. Ряд сейсмических событий зарегистрирован на юге территории Армении [Karapetyan et al., 2023].

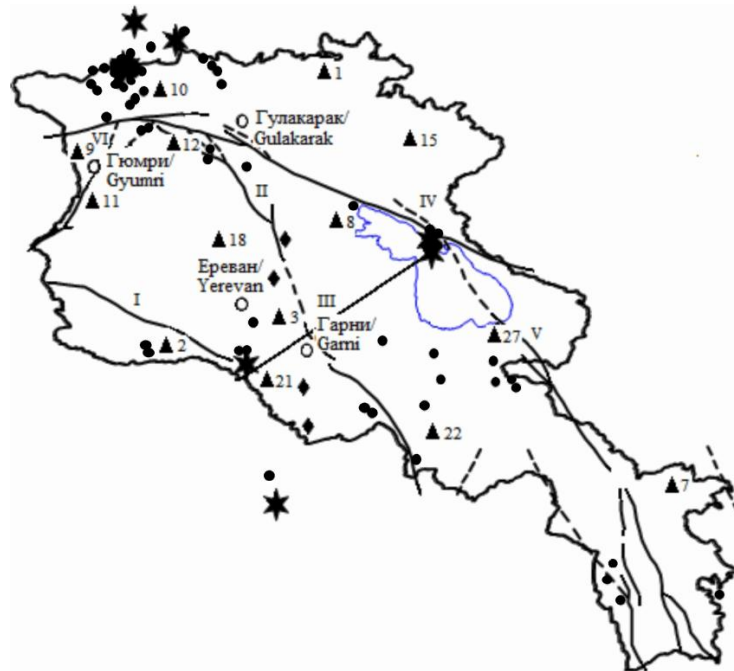


Рис. 5. Карта сейсмичности территории Республики Армения.

— глубинные разломы: I – Ереванский, II – Гарнийский, III – Арарат-Севанский, IV – Базум-Севанский, V – Памбак-Севан-Сюникский, VI – Ахурянский, ◆ – минеральные источники, ▲ – гидрогеодинамические скважины, o – города,

● – $M=2\div 3.5$, ★ – $M \geq 4.0$ /

Fig. 5. Seismicity map of the territory of the Republic of Armenia.

— deep faults: I – Yerevan fault, II – Garni fault, III – Ararat-Sevan fault, IV – Bazum-Sevan fault, V – Pambak-Sevan-Syunik fault,

VI – Akhuryan fault, ◆ – mineral springs, ▲ – hydrogeodynamic wells, o – cities, ● – $M=2\div 3.5$, ★ – $M \geq 4.0$

Карта сейсмичности территории Армении (рис. 5) при сопоставлении с картой предыдущих лет показывает на активизацию сейсмичности на восточном побережье оз. Севан. Сильные землетрясения с $M > 4.5$, имели место на севере, на границе с Грузией, в центральной части региона, на восточном побережье оз. Севан и на границе с Ираном.

На основе анализа сейсмичности региона в сопоставлении с вариациями напряженно-деформированного состояния земной коры выявлена корреляционная связь между ними. Корреляционная связь наблюдается между магнитудой, про-

изошедшего землетрясения, и величиной расчетной деформации. Карта напряженно-деформированного состояния земной коры (рис. 6) составляется по вариациям показателей гидрогеодинамических и гидрогеохимических пунктов наблюдений. Показатели гидрогеодинамики и гидрогеохимии это форма, амплитуда и продолжительность изменения уровня подземных вод в скважинах и изменение химического состава минеральных вод перед землетрясениями и другими тектоническими процессами земной коры [Пашаян и др., 2006]. Карта напряжённо-деформированного состояния земной коры Армении отражает тектонические блоки наращивания деформаций и напряжённости в приразломных зонах региона. Изменения деформации земной коры территории Армении, на карте показаны в виде сформированных по изолиниям деформаций структур сжатия и растяжения. Структура деформационного сжатия (сгущения изолиний равных величин расчетной деформации) сформирована: на Джавахетском нагорье, в Гюмрийском блоке, Спитакском тектоническом блоке, Севанском и Ереванском тектонических блоках и разломной зоне. Деформация растяжения наблюдается в Мецаморском и Апаран-Анкаванском тектонических блоках. Ослабление напряженности земной коры наблюдается на СВ и Юге территории Армении.

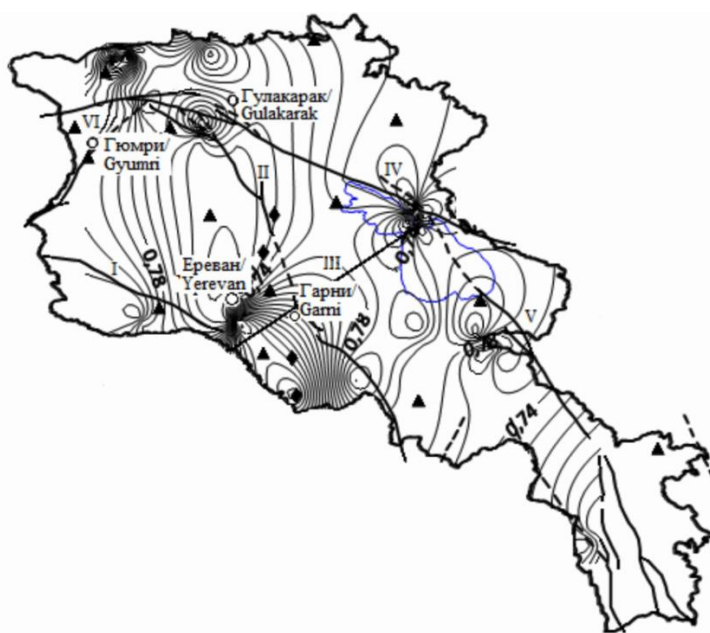


Рис. 6. Карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении за 2021-2023 гг.

↗ – глубинные разломы, ⌘ – изолиния деформации,

◆ – минеральные источники, ▲ – гидрогеодинамические скважины, о – города /

Fig. 6. Map of the stress-strain state of the earth's crust on the territory of Armenia for 2021-2023.

↗ – deep faults, ⌘ – deformation isoline,

◆ – mineral springs, ▲ – hydrogeodynamic wells, o – cities

При сопоставлении карты эпицентров землетрясений (рис. 5) с описанием динамики сейсмичности, карта напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении отражает распределение деформации на сейсмоактивных участках земной коры региона [Латынина, 1981].

По результатам мониторинговых наблюдений за химическим составом вод минеральных источников, составлен график вариаций временного ряда величины минерализации вод источников (рис. 7).

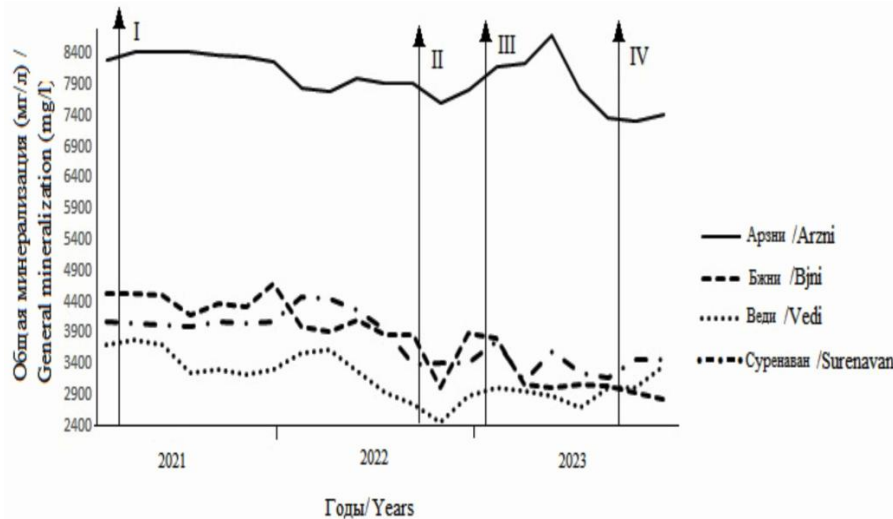


Рис. 7. График вариаций величины минерализации вод минеральных источников, I-IV- землетрясения /
Fig. 7. Graph of variations in mineralization values of mineral spring waters, I-IV- earthquakes

На графике приводятся обработанные временные ряды величины общей минерализации вод источников Центральной Армении. Обработка проводилась с учетом сезонных изменений и исключения тренда [Rubinin et al., 2017]. Вертикальными линиями отмечены моменты землетрясений. Рассмотрены изменения во времени параметра общей минерализации воды по источникам (рис. 7). На рисунке учтены землетрясения: I–13.02.2021 M=4.9 (Армения); II–11.07.22 M=4.4 (Армения); III–06.02.2023 M=7.8 (Турция), IV–21.08.23 M=4.1 (Армения). Определены гидрогеохимические эффекты по водам месторождений: Суренаван, Веди, Арзни и Бжни (табл. 3) в результате, произошедших землетрясений [Корулова et al., 2023].

Таблица 3 / Table 3

**Вычисленные гидрогеохимические эффекты (общей минерализации) вод источников по параметрам, произошедших землетрясений /
Calculated hydrogeochemical effects (total mineralization) of source waters according to parameters of earthquakes that occurred**

Минеральные источники / Mineral springs	Параметры землетрясений / Earthquake parameters				Гидрогеохимические эффекты (ГТХ) / Hydrogeochemical effects (HGC)			
	Дата землетрясений дд.мм.гг./ date earthquakes dd.mm.yy	Координаты / Coordinates	Магнитуда / Magnitude	Эпи-о-е расстояние (км)/ Epicentral distance (km)	Общая минерализация / General mineralization			
	j °	l °	M	Δ	\bar{K}^*	δ	\bar{K}	$A = n \delta$
Суренаван/Surenavan								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	39	4075	14	4060	4δ

11.07.2022	41,17	43,95	4,4	178	3917	464	3400	-
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	893	3901	363	3760	3 δ
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	96	3397	363	3470	3 δ
Веди/Vedi								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	28	3748	32	3700	3 δ
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	163	3072	399	2750	-
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	896	3115	305	3030	3 δ
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	86	3118	305	3360	-
Арзни/Arzni								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	38	8348	52	8420	2 δ
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	116	7835	122	7910	5 δ
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	901	8041	277	8200	δ
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	78	7790	277	7420	5 δ
Бжни/Vjni								
13.02.2021	40,02	44,49	4,9	56	4536	19	4520	1.5 δ
11.07.2022	41,17	43,95	4,4	108	3818	336	3880	2 δ
06.02.2023	37,08	37,17	7,8	912	3989	367	3810	2 δ
21.08.2023	40,45	45,30	4,1	72	3067	367	2830	-

\bar{K}^* – среднее значение минерализации; A – гидрогеохимический эффект, \bar{K} – фоновое значение минерализации / \bar{K}^* – average value of mineralization; A – hydrogeochemical effect; \bar{K} – background value of mineralization.

Как видно из таблицы 3, между параметрами произошедших землетрясений (магнитуда, эпицентральное расстояние) и величинами гидрогеохимических эффектов наблюдается корреляционная зависимость, чем выше магнитуда землетрясения и близость эпицентра землетрясения к пункту наблюдения, тем выше величина гидрогеохимического эффекта.

Результаты применения статистического метода обработки временных рядов минерализации вод источников приводятся в таблице 3. Рассчитанный гидрогеохимический эффект: $A=n*\delta$, равен величине дисперсии умноженной на n , где n – число, указывающее, во сколько раз увеличивается дисперсия во время сейсмического события для определяемого химического элемента состава вод [Григорян и др., 2016]. Изменения гидрогеохимических показателей, рассматриваемые в качестве прогностического признака, должны иметь «аномальный» характер, т.е. значительно отличаться от фоновых вариаций. Таким образом, мониторинг изменений гидрогеологических показателей подземных вод территории Армении имеет краткосрочное и среднесрочное прогностическое значение. Мониторинг содержания и изменений углекислого газа, растворенного в минеральных водах, имеет краткосрочное прогностическое значение.

Выводы

Карта сейсмичности, составленная по каталогу землетрясений за исследуемый промежуток времени, отражает концентрацию эпицентров землетрясений на севере и в Центральной части Армении, а также показывает на активизацию сейсмичности на восточном побережье оз. Севан.

Гидрогеологические эффекты, выявленные перед местными землетрясениями на территории Армении, по продолжительности эффекта, относятся к категории: среднесрочных и краткосрочных предвестников, а эффекты перед Турецким землетрясением, согласно длительности эффекта, можно отнести к долгосрочным предвестникам.

Мониторинг изменений углекислого газа, растворенного в минеральных водах Армении, может быть использован в качестве экспресс-информации при взятии проб воды минеральных источников.

Построено напряженно-деформированное поле земной коры территории Армении; концентрация напряженности тектонических структур пропорциональна значениям гидрогеологических показателей. Величина или аномальные значения показателей зависят от количества и параметров произошедших землетрясений.

Выявленные гидрогеологические показатели формируют напряженно-деформированное состояние земной коры территории Армении, которое отражает активизацию динамики тектонических блоков: Гюмрийского и Севанского, а также Приереванской зоны разломов и глубинных разломов: Гарнийского и Арарат-Севанского.

Комплексная интерпретация данных о гидрогеологических показателях (химических и гидродинамических) способствует повышению достоверности их в качестве предвестников землетрясений и оценки напряженно-деформированного состояния земной коры территории Армении.

Литература

1. Асланян А.Т. Региональная геология Армении. Ереван: Айпетрат, – 1968. 408 с.
2. Барсуков В.Л., Беляев А.А. Геохимические методы прогноза землетрясений. М.: Наука, – 1992. 213 с.
3. Геодакян Э.Г., Карапетян Дж.К., Заалишвили В.Б., Саакян Б.В., Оганесян С.М., Мкртчян М.А., Мкртчян Г.А. Региональная сейсмотектоника очаговых зон восточно-турецких землетрясений 06 февраля 2023г. и геодинамическая модель очага сильнейшего землетрясения ($M_w=7.8$). // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. –Т. 13. № 4. – С.42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004.
4. Геология Армянской ССР. Том IX. Минеральные воды. / ред. Мкртчян С.С. Ереван: Издательство АН Армянской ССР, – 1969. 505 с.
5. Григорян С.В., Пашаян Р.А., Арутюнян Л.В. Результаты гидрогеологического мониторинга геодинамических процессов территории Армении. // Доклады НАН РА. – 2016. – Т. 116. № 2. – С. 141–147.
6. Гриневский А.О., Барабанов В.Л. Методика обработки гидрогеодинамических данных в целях прогноза землетрясений. Москва: ВСЕГИНГЕО, – 1983. С. 44–47.
7. Добровольский И.Г. Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ, – 1984. 188 с.
8. Добровольский И.Г., Зубков С.И., Мячкин В.И. Об оценке размеров зоны проявления предвестников землетрясений. // В сборнике Моделирование предвестников землетрясений. М.: Наука, – 1980. С. 7–43.
9. Киссин И.Г. Гидрогеологический мониторинг земной коры. // Физика Земли. – 1993. – № 8. – С. 58–69.

10. Киссин И.Г. Флюиды в земной коре. Геофизические и тектонические аспекты. М.: Наука, – 2015. 327 с.
11. Киссин И.Г. Чувствительные зоны земной коры и амплитуда аномалий предвестников землетрясений. // Доклады Академии наук СССР. – 1985. – Т. 218. № 2. – С. 304–307.
12. Латынина Л.А. Гидрогеологические эффекты в деформациях земной поверхности. // Изв. АН СССР. Физика Земли. – 1981. – № 11. – С. 10–16.
13. 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.
14. Пашаян Р.А., Саргсян А.З. Гидрогеодеформационная характеристика земной коры региона Армении (2002-2004 гг.). // Известия НАН РА. Науки о Земле. – 2006. – Т. LXX. № 3. – С. 30–36.
15. Рябинин Г.В., Хаткевич Ю.М. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ. // Вестник КРАУНЦ. Серия наук о Земле. – 2009. – № 13. – С. 107–122.
16. Самарина В.С. Гидрогеохимия. Л.: Издательство Ленинградского университета, – 1977. 353 с.
17. Султанходжаев А.Н. Основы гидрогеосейсмологии. Ташкент. – 2006. 164 с.
18. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. // EGU General Assembly. – 2023. – Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI: 10.5194/egusphere-egu23-16905.
19. Kopylova G.N., Boldina S.V. Seismohydrogeological phenomena as an Earthquakes' Trigger Impact on Groundwater (by the example of the Wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula). // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. – 2023. – Vol. 59. No. 3. – pp. 405–420. DOI: 10.1134/S1069351323030072.
20. Milyukov V.K., Kravchyuk V.K., Mironov A.P., Latynina L.A. Deformation Processes in the Litosphere Related to the Nonuniformity of the Earth's Rotation. // Izvestiya, Physics of the Solid Earth. –2011. – Vol. 47. Issue 3. – pp. 246–258.
21. Rubinin G.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Changes in the concentrations of chloride ion in the mineral waters of central Armenia. // Academy of Sciences of RA. Electronic journal of Natural Sciences. – 2017. – Vol. 28. Issue 1. – pp. 21–24.
22. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. // Lecture Notes in Earth Sciences. – 2010. – Vol. 114. Berlin. Springer. 249 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.

References

1. Aslanyan A.T. Regional geology of Armenia. Yerevan. Aypetrat. 1968. 408 p. (In Russ.)
2. Barsukov V.L., Belyaev A.A. Geochemical methods for earthquake prediction. Moscow. Nauka. 1992. 213 p. (In Russ.)
3. Geodakyan E.G., Karapetyan J.K., Zaalishvili V.B., Sahakyan B.V., Hovhannisyan S.M., Mkrtchyan M.A., Mkrtchyan G.A. Regional seismotectonics of focal zones of the east Turkey earthquakes on 06 February 2023 and geodynamic model of the source of the strongest earthquake ($M_w = 7.8$). Geology and Geophysics of Russian South. 2023. Vol. 13. № 4. pp. 42–54. DOI: 10.46698/VNC.2023.57.90.004. (In Russ.)
4. Geology of the Armenian SSR. Vol. IX. Mineral waters. Ed. Mkrtchyan S.S. Yerevan. The Academy of Sciences of the Armenian SSR. 1969. 505 p. (In Russ.)
5. Grigoryan S.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Results of hydrogeological monitoring of geodynamic processes in the territory of Armenia. Doklady NAS RA. 2016. Vol. 116. No. 2. pp. 141–147. (In Russ.)
6. Grinevsky A.O., Barabanov V.L. Methodology for processing hydrogeodynamic data for earthquake prediction. Moscow. VSEGINGEO. 1983. pp. 44–47. (In Russ.)

7. Dobrovolsky I.G. Mechanics of tectonic earthquake preparation. Moscow. IPE. 1984. 188 p. (In Russ.)
8. Dobrovolsky I.G., Zubkov S.I., Myachkin V.I. On assessing the size of the zone of manifestation of earthquake precursors. In: Modeling of earthquake precursors. Moscow. Nauka. 1980. pp. 7–43. (In Russ.)
9. Kissin I.G. Hydrogeological monitoring of the Earth's crust. Physics of the Earth. 1993. No. 8. pp. 58–69. (In Russ.)
10. Kissin I.G. Fluids in the Earth's crust. Geophysical and tectonic aspects. Moscow. Nauka. 2015. 327 p. (In Russ.)
11. Kissin I.G. Sensitive zones of the Earth's crust and the amplitude of earthquake precursor anomalies. Doklady Earth Sciences USSR. 1985. Vol. 218. No. 2. pp. 304–307. (In Russ.)
12. Latynina L.A. Hydrogeological effects in deformations of the Earth's surface. In: Proceedings of the USSR Academy of Sciences. Physics of the Earth. 1981. No. 11. pp. 10–16. (In Russ.)
13. Pashayan R.A. Research of hydrogeodynamic effects as precursors of earthquakes on the territory of Armenia: Ph.D. dissertation. Yerevan. NAS RA. 1998. 163 p. (In Russ.)
14. Pashayan R.A., Sargsyan A.Z. Hydrogeodeformation characteristics of the Earth's crust in the Armenian region (2002-2004). Izvestiya NAS RA. Earth Sciences. 2006. Vol. LLX. No. 3. pp. 30–36. (In Russ.)
15. Ryabinin G.V., Khatkevich Yu.M. Hydrogeochemical effects preceding strong earthquakes in Kamchatka. Identification algorithm and morphological analysis. Bulletin of KRAUNC. Earth Science Series. 2009. No. 13. p. 107-122. (In Russ.)
16. Samarina V.S. Hydrogeochemistry. Leningrad. Leningrad University Press. 1977. 353 p. (In Russ.)
17. Sultankhojaev A.N. Fundamentals of hydrogeoseismology. Tashkent. 2006. 164 p. (In Russ.)
18. Karapetyan J., Geodakyan E., Karapetyan R., Hovhannisyan L., Matevosyan G. Study of modern regional and local anomal variations of seismicity in the Tavro-Caucasian region. EGU General Assembly. 2023. Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-16905. DOI: 10.05194/egusphere-egu23-16905.
19. Kopylova G.N., Boldina S.V. Seismohydrogeological phenomena as an Earthquakes' Trigger Impact on Groundwater (by the example of the Wells of the Petropavlovsk-Kamchatsky test site, Kamchatka Peninsula). Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2023. Vol. 59. No. 3. pp. 405–420. DOI: 10.1134/S1069351323030072.
20. Milyukov V.K., Kravchuk V.K., Mironov A.P., Latynina L.A. Deformation Processes in the Litosphere Related to the Nonuniformity of the Earth's Rotation. Izvestiya, Physics of the Solid Earth. 2011. Vol. 47. Issue 3. pp. 246–258.
21. Rubinin G.V., Pashayan R.A., Harutyunyan L.V. Changes in the concentrations of chloride ion in the mineral waters of central Armenia. Academy of Sciences of RA. Electronic journal of Natural Sciences. 2017. Vol. 28. Issue 1. pp. 21–24.
22. Wang C.-Y., Manga M. Earthquakes and Water. Lecture Notes in Earth Sciences. 2010. Vol. 114. Berlin. Springer. 249 p. DOI: 10.1007/978-3-642-00810-8.