



УДК 551.49:550. (575.2)

## ФРАКТАЛЬНОСТЬ ПОДЗЕМНЫХ ВОД КЫРГЫЗСТАНА ДЛЯ ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ



## FRACTALITY OF UNDERGROUND WATERS AND FORECAST OF EARTHQUAKES OF KYRGYZSTAN

**Кендирбаева Дж.Ж.**

доктор геолого-минералогических наук,  
заведующая лабораторией,  
Институт сейсмологии  
Национальной Академии наук  
Кыргызской Республики  
jumaevna48@gmail.com

**Kendirbaeva J.J.**

Doctor of Geological  
and Mineralogical Sciences,  
Head of the lab,  
Institute of Seismology  
National Academy of Sciences  
Kyrgyz Republic  
jumaevna48@gmail.com

**Аннотация.** Рассмотрена на основе сопоставления пространственно-временного распределения эпицентров сейсмических явлений, произошедших в Кыргызстане, динамика изменения параметров термоминеральных вод Джеты-Огуз. Выявлена роль не только локальных, но и региональных землетрясений, сгруппированных в зонах крупных структур. Это Гиссаро-Кокшаальская зона, которая тянется вдоль пересечения Памира и Тянь-Шаня.

**Ключевые слова:** гидроаномалии, термоминеральные воды, прогноз землетрясений, территория Кыргызстана, статистические и спектральные способы, временные ряды, пункты наблюдений, изменение параметров, эпицентры, крупные структуры, эпицентрально-расстояние.

**Annotation.** The dynamics of changes in the parameters of the Jet-Oguz thermal mineral waters is considered based on the analysis of the spatio-temporal distribution of epicenters of seismic events that occurred in Kyrgyzstan. The role of not only local, but also regional earthquakes grouped in large structures is revealed. This is the Gissaro-Kokshaal zone, which stretches along the intersection of the Pamir and Tien Shan.

**Keywords:** hydroanomalies, thermomineral waters, earthquake prediction, territory of Kyrgyzstan, statistical and spatial methods, time series, observation points, change of parameters, epicenters, large structures, epicentral distance.

### Введение

Изучение влияния сейсмической активности на пространственно-временную динамику физико-химических показателей подземных вод является важным научно-практическим направлением современности. Подходы к использованию гидрогеологических сведений для решения их задач рассмотрены во многих работах и выявлены связи, доступные не только визуальному определению, но и скрытые закономерности, осложненные другими факторами [1–4]. По этим данным их реакции, фиксируемые до, во время и после сейсмической активизации, описываются в свободной интерпретации, а роль эпицентрального расстояния неоднозначна, даже в условиях, когда эпицентры расположены непосредственно в районах пунктов мониторинга.

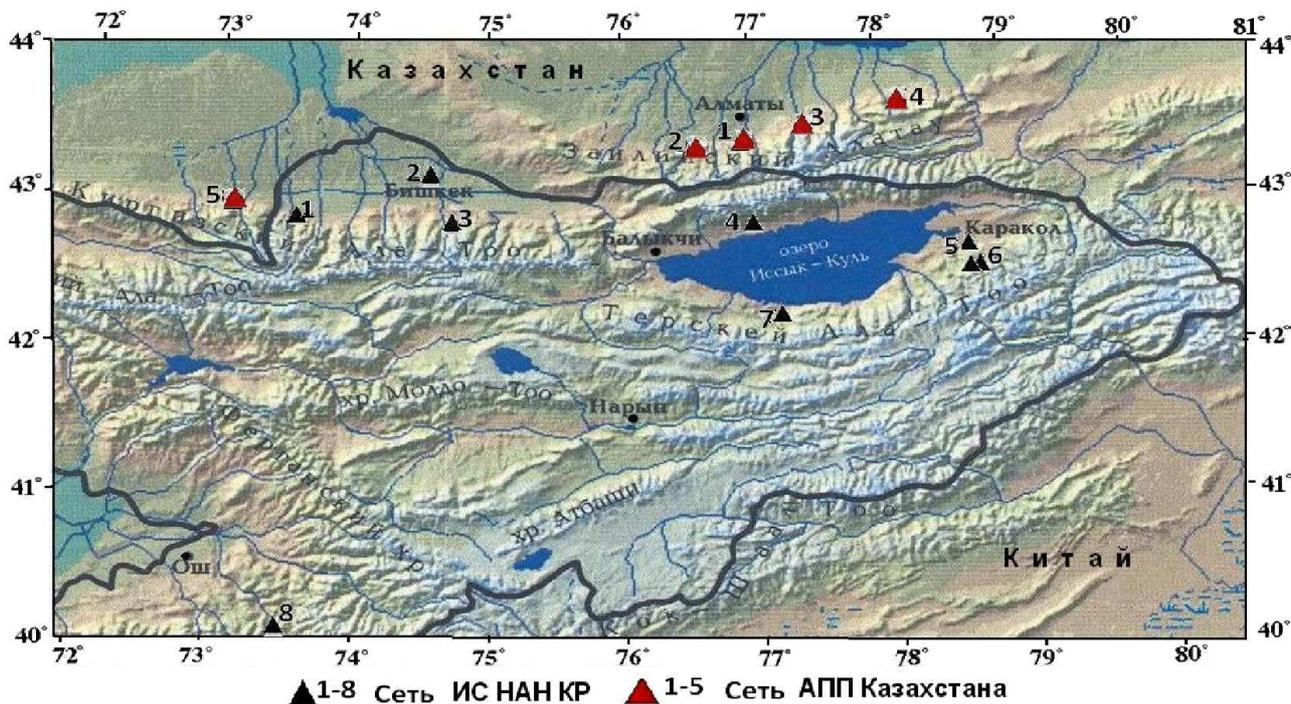
Замеры проводятся на 8-ми участках, из которых «Джеты-Огуз», «Сопу-Курган» и «Аламедин» находятся в горных массивах, а «Кара-Ой» и «Каракол», «Эркин-Сай», «Бишкек» и «Каджи-Сай» – в равнинной части. Каждый пункт своеобразен по условиям морфотектоники структур, а для сопоставления с геодинамической обстановкой временные ряды идентифицируются по глубине циркуляции (400–1500 м), литологической представленности, т.е. метаморфическими породами, а также отложениями кайнозоя [5]. Их результирующим итогом можно считать разделение на тектонические и экзогенно-техногенные режимообразующие факторы. При этом величина их амплитудного разрыва между верхним и нижним пределом от одного землетрясения к другому вообще не повторяется.

С нашей позиции, широкий разброс количественных уровней компонентов в подземных водах заключен в нестационарной и нелинейной природе их формирования, а также из-за многообразия механизмов развития внутри земных напряжений. В связи с этим, классические методы, основанные на анализе стационарных неоднородностей (Фурье – анализ), а также линейных корреляций бессильны для выделения гидровариаций, связанных с процессами подготовки землетрясений. Вследствие этого и по мере увеличения объема накопления фактического материала подвергаются к совершенствованию способы обработки и интерпретации параметров.

О том, что гидрогеохимические аномалии носят фрактальный характер известно давно, т.к. такая фильтрация изначально разработана для создания критериев при оконтуривании скопления полезных ископаемых, а в нашем случае – для отделения гидроаномалий от фоновых уровней. Этот подход апробирован при анализе временной динамики температуры верхней тропосферы над эпицентрами сильных



землетрясений в сейсмически активных регионах Азии [6–7]. Поэтому думается, что он пригоден и для изучения свойств подземных вод, связанных с сейсмичностью, поскольку расхождения полей повторяют как структурно-тектонический план, так и геохимический облик активных разломов:



**Рисунок 1** – Схема сейсмогидрогеологического мониторинга:

1–8 – Сеть ИС НАН КР:

1 – Эркин-Сай; 2 – Бишкек; 3 – Аламедин; 4 – Кара-Ой;

5 – Каракол; 6 – Джети-Огуз; 7- Каджи-Сай; 8 – Сопу-Коргон;

1–5 – Сеть Алматинского прогностического полигона (АПП) Казахстана:

1 – Алма-Арасан, 2 – Нижняя-Каменка, 3 – Тау-Тургень, 4 – Курам, 5 – Мерке

### 1. Закономерные связи

так, о закономерно обусловленных и статистических связях между источниками ТМВ и неоднородностями земной коры, а именно, между структурно-тектоническими, литолого-петрографическими и водно-механическими свойствами опубликовано в работах [8–10]. Например, максимальные концентрации гелия зафиксированы в ТМВ из источников Алтын-Арашан и скважин Аксу (Теплоключенка), циркулирующих в интрузиях восточной части Тескейского массива, а также Барбулак, выводящей из карбоновых образований в центральной части бассейна, тогда как таковые в аналогичных условиях Чуйского региона составляют лишь первые сотни долей об. % (Аламедин, Иссyk-Ата). Эти сведения позволили допустить о латеральной циркуляции по глубинным разломам Северного Тянь-Шаня газо-водной смеси, внедряющейся из высоких геотермических полей, где сосредоточены эпицентры сильных подземных толчков, особенно, Сары-Камышского (1970) Джаланаш-Тюпского (1978) и Суусамырского (1992) землетрясений.

### 2. Случайные сигналы на основе фрактального анализа

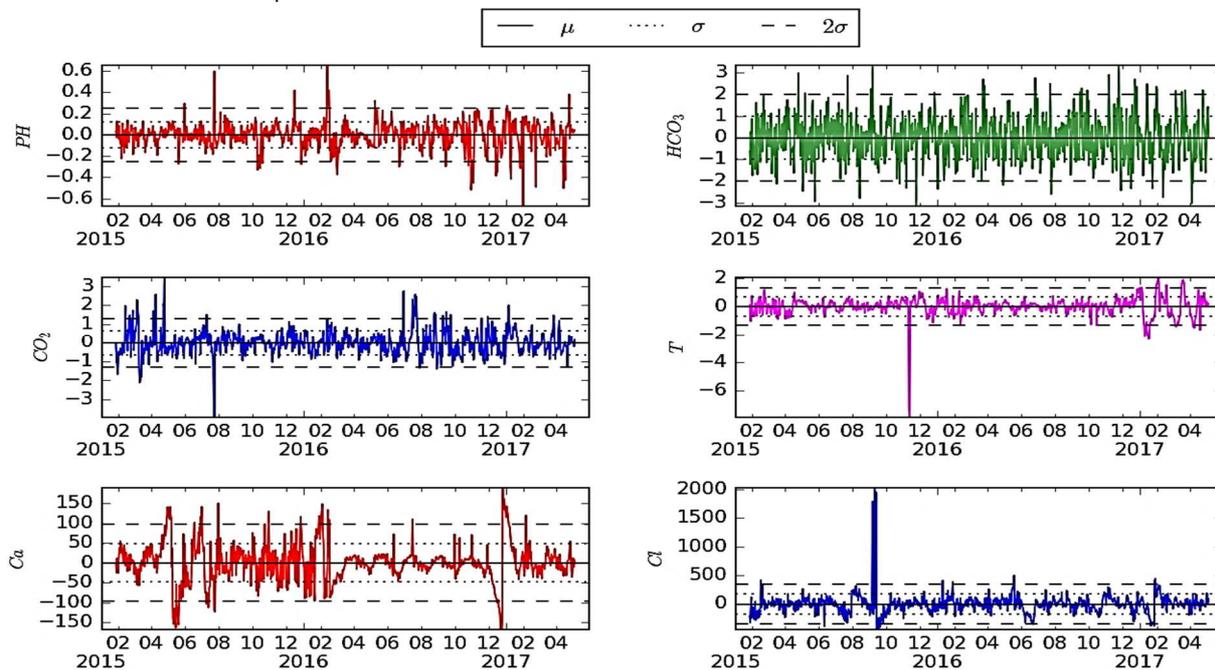
Подготовка временных рядов для расчета коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования произведена в среде Matlab с использованием Wavelet Toolbox. При этом низкочастотный тренд удален нелинейной пороговой фильтрацией, а по модулю PyWavelets на основе дискретного вейвлет-преобразования строятся высокочастотные вариации, после чего рассчитываются интегральный параметр D (matplotlib, numpy).

Необходимо добавить, что нелинейная пороговая фильтрация основана на комплексировании дискретного вейвлет-преобразования (ДВП) с вейвлетом Добеши 6-го порядка и универсального порога Донохо-Джонстона, с «мягким» вычитанием порога (soft thresholding), этим самым повышается достоверность исследований на 2–3 порядка.

Из временных рядов исключение неинформативных составляющих, связанных с пунктом мониторинга, сезонностью и синоптическими процессами, выполнено с помощью непрерывного вейвлет-преобразования. Полученные высокочастотные вариации проанализированы на предмет аномалии, наличие которой после объединения образует последовательность значений интегрального параметра, отдельно рассчитываемого как сумма параметра во временных рядах, нормированного на свои максимальные значения.

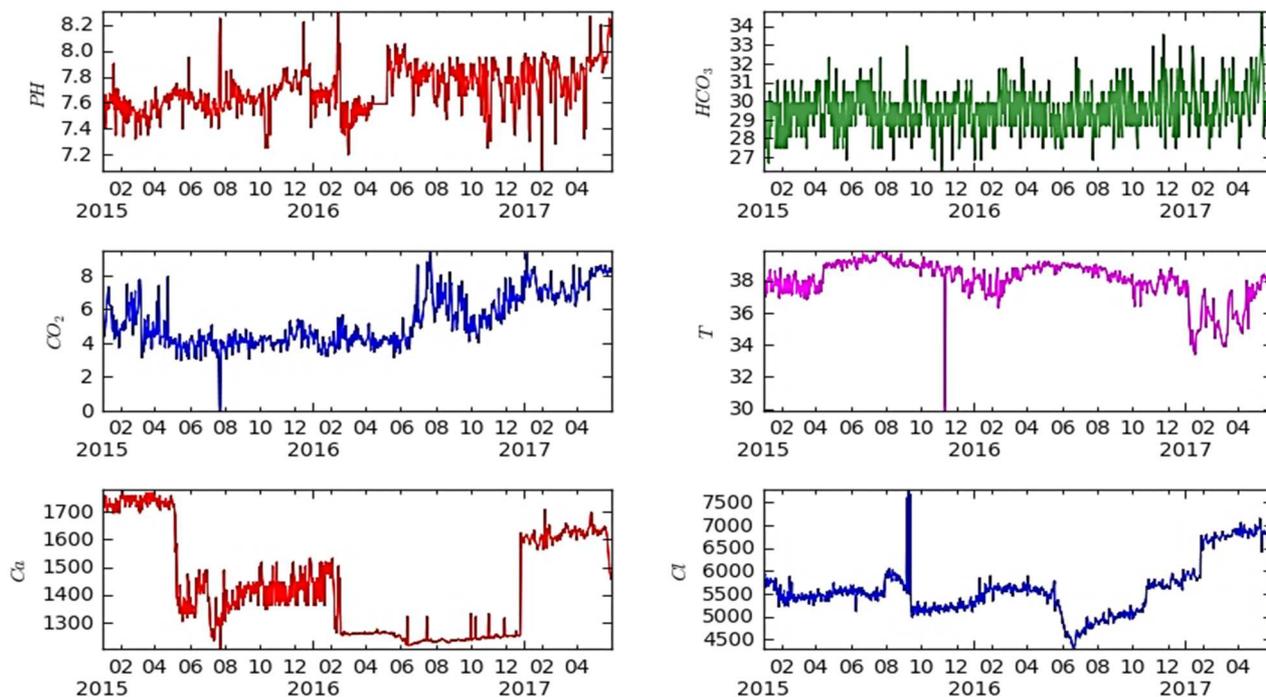


На рисунке 2 представлены вариации pH, температуры T °C и содержания CO<sub>2</sub>, HCO<sub>3</sub>, Ca, Cl, Mg, полученные после удаления тренда и периодической составляющей. По горизонтали нанесены среднее значение (равное 0), среднеквадратичное отклонение (СКО) и уровень 2СКО. Поскольку амплитуды колебаний, превышающие 2СКО, считаются аномальными, то они анализированы в связи с сейсмической активизацией.



**Рисунок 2** – Вариации физико-химических параметров проб воды после устранения тренда и периодических составляющих (сплошная линия – среднее значение, пунктирная – СКО и штриховка – 2СКО)

Ниже рассмотрим параметры, устранив тренд и сезонную составляющую (рис. 3), где видно преимущества этого способа обработки временных рядов на фоне полинома высокого порядка и скользящего среднего. Для выделения интегральных аномалий в режиме конкретного параметра D применяется пороговая фильтрация, благодаря чему во временных рядах остаются только те уровни, которые, не выходя за пределы коридора среднеквадратичного отклонения ( $\pm 2\delta$ ), будут отражать процессы их взаимосвязи с проявлениями сейсмичности.

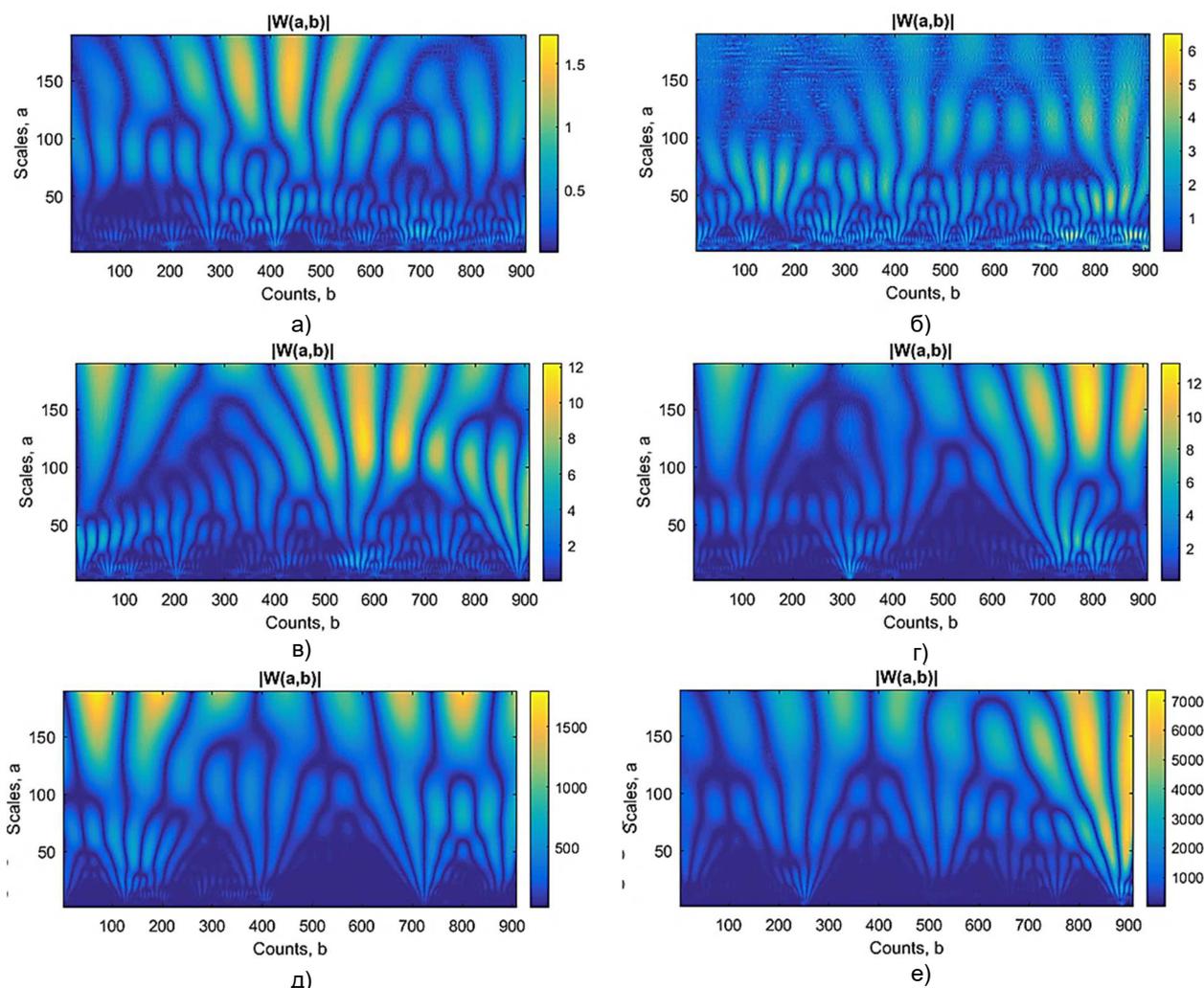


**Рисунок 3** – Вариационные кривые показателей скв. 6 ТМВ «Джети-Огуз»



Как сказано выше, количественные уровни параметров, не укладывающиеся в пределы 2СКО, считаются аномальными, а отклонения в любые стороны – это отсутствие закономерных «помех», т.е. переход к условиям преобладания внутри земных напряжений, т.е. приближение процессов подготовки и реализации сейсмической активизации. На рисунке 4 представлены абсолютные значения коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НПВ), где анализирующим принят вейвлет Морле, который, внося минимальный краевой эффект, полностью фиксирует как низкочастотные, так и высокочастотные компоненты сигнала. Для этого по горизонтали отложены среднее значение, условно принятое как 0, среднеквадратичное отклонение (СКО) и выход на два порядка за рамки доверительного уровня (2СКО).

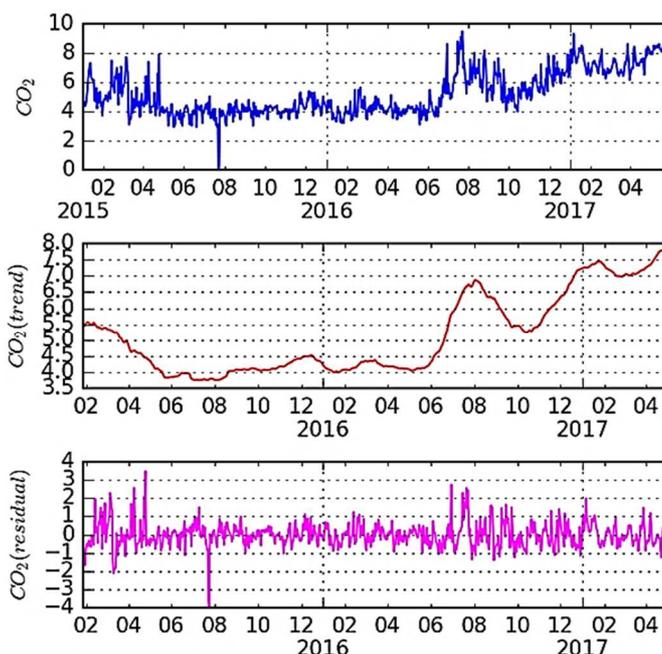
Для достижения отчетливых границ колебаний устанавливаются корреляционные связи между набором определяемых параметров с периодами подготовки и энергетическим классом ( $K \geq 10$  землетрясений, а в дальнейшем по каждому параметру проводится объединение с помощью синтетического параметра  $D$ , учитывающего суммарный эффект. Так, на участке ТМВ «Джеты-Огуз» две скважины расположены в непосредственной близости, но каждая из них несет различные информации по своей природе формирования и развития, например по глубине циркуляции, геолого-стратиграфической принадлежности водовмещающих пород [7]: из скв. 6 скрытые закономерности по вейвлетограммам состоят из квазистационарных компонентов с периодами 180–200, 120–150 и 70–80 суток, устраняемыми совместно с низкочастотным трендом. Так, об этом подтверждают вариации содержания  $CO_2$ , представленные на рисунках 5, 6. Режим  $CO_2$ , как видно из рисунка 5, выглядит следующим образом: в верхней части показаны истинные значения, т.е. до обработки вейвлет-преобразованием, на среднем графике – тренд, тогда как внизу – концентрационные уровни, оставшиеся после удаления тренда и сезонных составляющих.



**Рисунок 4** – Коэффициенты НПВ (вейвлет Морле) параметров ТМВ «Джеты-Огуз»: по оси абсцисс- время от 01-01-2015 по 31-05-2017, по оси ординат – масштабный коэффициент; а) –  $PH$ ; б)  $HCO_3$ ; в) –  $CO_2$ ; г) температура; д) –  $Ca^{2+}$ , е) –  $Cl$

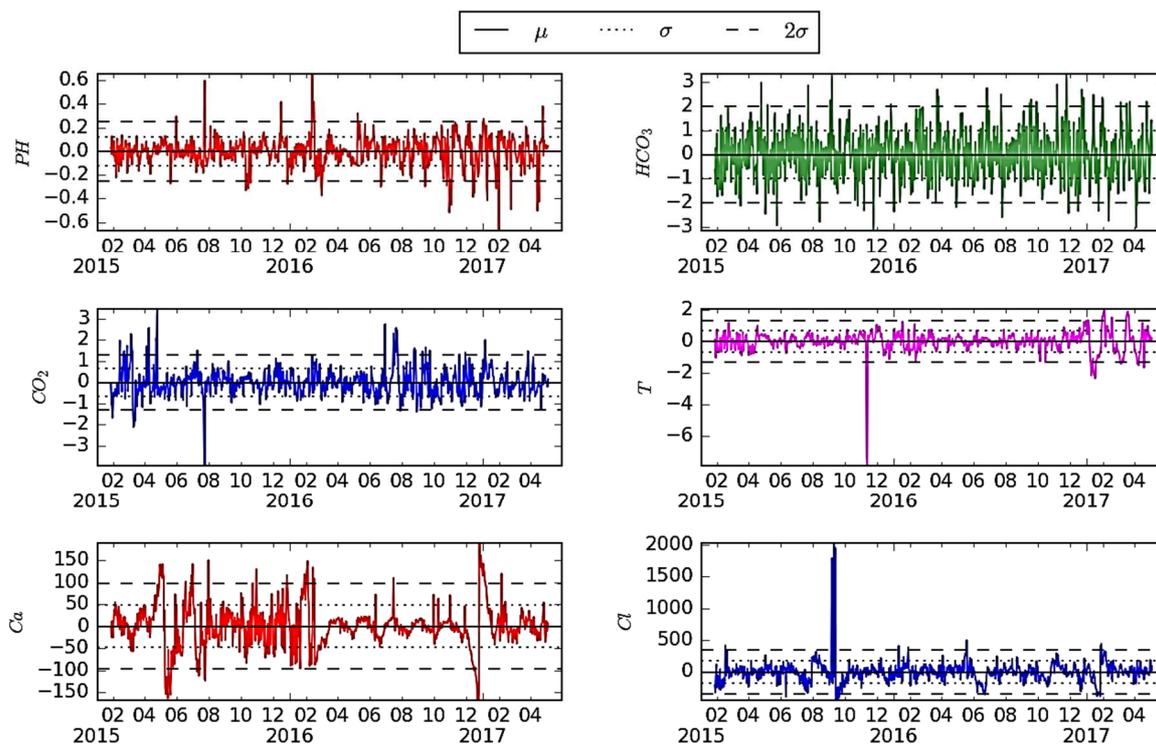


Анализируя и сопоставляя эти три вариационные кривые о содержаниях растворенного  $CO_2$ , в его пространственно-временном распределении можно выделить два уровня, в соответствии с которыми в пределах каждого амплитудно-частотные характеристики компонента, четко отделяясь друг от друга, связаны с природой воздействия доминирующих сил- экзогенных факторов или внутри земных напряжений.



**Рисунок 5** – Выделенные вариации по содержанию  $CO_2$  в ТМВ «Джеты-Огуз»: исходные значения (а), низкочастотный тренд (б) и после устранения тренда и периодических составляющих (в)

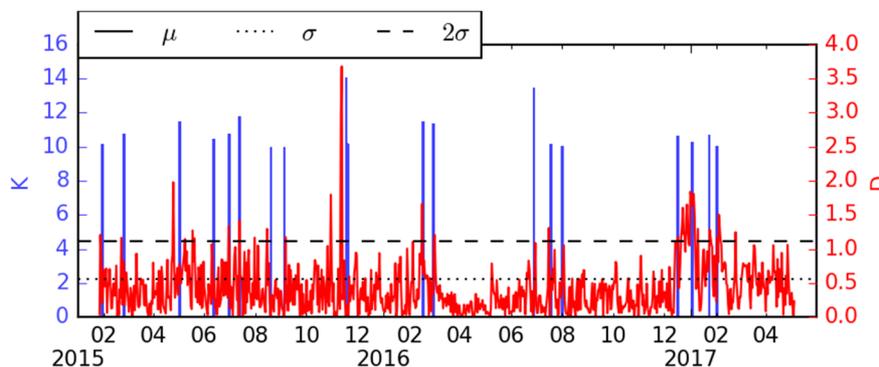
Иными словами, параметры ТМВ «Джеты-Огуз» после удаления тренда и периодической составляющей, показанные по коэффициентам НГВ (вейвлет Морле), обладают совершенно другими очертаниями: в них отражаются не только траектории вещественного состава разреза, с которого ведется мониторинговое слежение, но и землетрясения с параметрами-механизмами интенсивностью и глубиной очага.



**Рисунок 6** – Вариации параметров воды без тренда и периодических составляющих – уровни: сплошная линия – среднее значение, пунктирная – СКО и штриховая – 2СКО

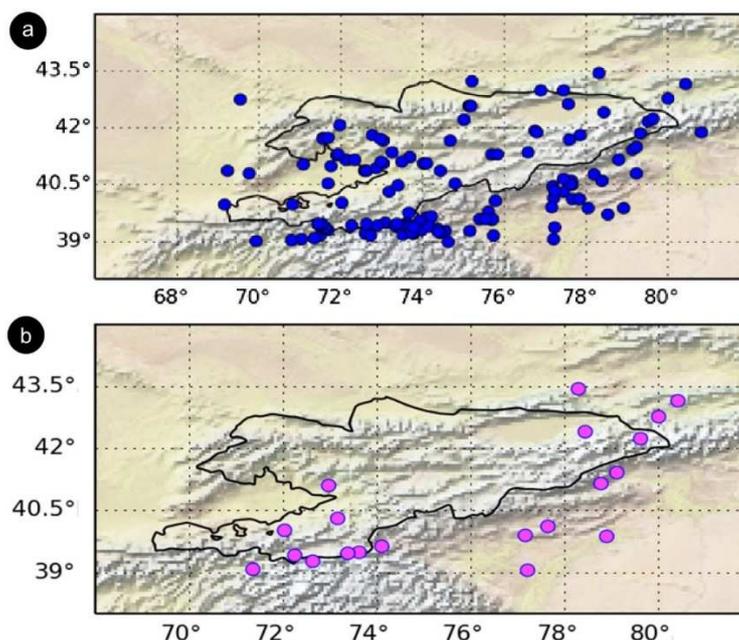


Далее, все исследуемые параметры с учетом аномального уровня отклонения от средних значений, объединены в общий временной ряд (D), состоящий из суммы отдельных временных рядов, нормированных на свои максимальные значения (рис. 7).



**Рисунок 7** – Интегральный вид временных вариаций параметров ТМВ «Джеты-Огуз» без тренда и периодических составляющих: сплошная линия- среднее значение  $\mu$ , пунктирная –  $\sigma$  (СКО) и штриховая –  $2\sigma$ . Красный цвет- энергетический класс землетрясений, ближайших (по времени) из каталога ИС НАН КР [11]

Для сопоставления также приведены энергетические классы землетрясений (K), по времени ближайших к аномалиям. Выяснилось, что взаимосвязи между изменениями параметров ТМВ «Джеты-Огуз» с эпицентрами отдельных сейсмических событий имеют общие очертания, расположенных не только в районе наблюдаемых ТМВ, т.е. локально, но и регионально, т.е. на большом расстоянии от них (рис. 8 а, б).



**Рисунок 8** – Сейсмическая активность за 01.01 2015- 31.05. 2017 г. по; распределение эпицентров:  
 а – эпицентры землетрясений за рассматриваемый период;  
 б – землетрясения, ближайšie по времени после аномалий в ТМВ (D)

Сопоставление пространственного распределения эпицентров всех сейсмических событий, произошедших за рассматриваемый период (рис. 8а), с землетрясениями, выделенными на основе интегрированного эффекта аномалий параметров ТМВ «Джеты-Огуз» (рис.8б), допускает, что здесь имеет место роль не только локальных, но и региональных событий. Дело в том, что очевидна корреляция аномалий изучаемых данных с сейсмическими событиями, эпицентры которых сгруппированы вдоль южной границы Кыргызстана, где простирается Гиссаро-Кокшаальская зона, западная часть которой (Дарваз-Каракульская) тянется вдоль сочленения Памира и Тянь-Шаня. Положительные результаты этого подхода получены и по динамике распределения температуры атмосферы над эпицентрами землетрясений [6] и временных рядов в среде со сложной геофизической природой [7].



## Выводы

Таким образом, пространственно-временная динамика вариаций параметров ТМВ, по-видимому, находится во взаимосвязи с особенностями геологического строения и деформационного состояния структур. В пространственно-временном выражении об этом свидетельствуют три вариационные кривые растворенного  $\text{CO}_2$ , на которых выделяются два уровня, в пределах каждого из них амплитудно-частотные характеристики компонента, четко отделяясь друг от друга, демонстрируют воздействие экзогенных и внутри земных напряжений.

## Литература

1. Кендирбаева Дж.Ж., Гребенникова В.В. Основные результаты гидрогеологических исследований для прогноза сильных землетрясений в Северном Тянь-Шане // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – Бишкек, 2013. – С. 37–43.
2. Кендирбаева Дж.Ж. Современная геохимическая обстановка термальных вод Кыргызского Тянь-Шаня как основа развития динамических процессов земной коры / Мат-лы конференции: Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. – Бишкек, 2014. – С. 251–254.
3. Кендирбаева Дж.Ж. Основные принципы регионального анализа гидрогеологической системы Кыргызстана как источника информации прогноза землетрясений // Вестник Института сейсмологии НАН КР. – 2014. – № 2. – С. 65–69. – URL : kis@mail.elcat.kg
4. Кендирбаева Дж.Ж. Пространственно-временное взаимодействие в системе «сейсмичность-термальные воды-солнечная неоднородность» на территории Кыргызстана // Вестник КРАУНЦ физико-математических науки. – 2019. – Т. 29. – № 4. – С. 114–124.
5. Сычев В.Н., Долгополов Б.К., Имашев С.А. Методика мультифрактального анализа сейсмического шума // Геосистемы переходных зон. – 2017. – № 2 (2). – С. 62–68.
6. Свердлик Л.Г., Имашев С.А. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности // Журнал Сибирского федерального университета. – 2017. – Серия: Техника и технологии. – Т. 10. – № 6. – С. 783–793.
7. Кендирбаева Дж.Ж., Гребенникова В.В. О взаимосвязи геохимических условий и гидрогеотермической обстановки Кыргызского Тянь-Шаня / Мат-лы конф.: Глубинное строение, геодинамика, тепловое поле, интерпретация геофизических полей.
8. Кендирбаева Д.Ж. К дискретности гидрогеологических условий и разрывно-блоковой делимости Кыргызского Тянь-Шаня / Мат-лы конф. Глубинное строение, тепловое поле земли, интерпретация геофизических полей. – Екатеринбург, 2017. – С. 206–210.
9. Кендирбаева Д.Ж. Результаты и перспективы сейсмогидрогеологического мониторинга на территории Северного Тянь-Шаня / Мат-лы конф.: Проблемы геодинамики и геоэкологии внутриконтинентальных орогенов. – Бишкек, 2018. – С. 159–165.
10. Каталог землетрясений Института сейсмологии НАН КР.
11. Имашев С.А., Кендирбаева Дж.Ж., Свердлик Л.Г. Алгоритмы и технологии программного обеспечения «GeoChemistry» для выявления гидрогеохимических эффектов // Вестник Кыргызско-Российского (Славянского) университета. – Бишкек, 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 164–169.

## References

1. Kendirbaeva J.J., Grebennikova V.V. Basic results of hydrogeological investigations for forecast of the strong earthquakes in Northern Tien Shan // Vestnik of Institute of Seismology NAS KR. – Bishkek, 2013. – P. 37–43.
2. Kendirbaeva J.J. Modern geochemical situation of the Kyrgyz Tien Shan thermal waters as a basis for the development of dynamic processes of the Earth's crust / Conference materials: Problems of geodynamics and geo-ecology of intracontinental orogens. – Bishkek, 2014. – P. 251–254.
3. Kendirbaeva D.Zh. Main principles of regional analysis of hydrogeological system of Kyr-Gyzstan as a source of information for earthquake prediction // Bulletin of the Institute of Seismology NAS KR. – 2014. – № 2. – P. 65–69. – URL : kis@mail.elcat.kg
4. Kendirbaeva J.J. Spatial-temporal interaction in the system «seismicity-thermal water- solar heterogeneity» on the territory of Kyrgyzstan // Vestnik KRAUNCH of physical and mathematical sciences. – 2019. – Vol. 29. – № 4. – P. 114–124.
5. Sychev V.N., Dolgoplov B.K., Imashev S.A. Multifractal analysis technique of the seismic shuma // Geo-systems of the transition zones. – 2017. – № 2 (2). – P. 62–68.
6. Sverdlik L.G., Imashev S.A. Anomalies of the atmosphere temperature during the seismic activity periods // Journal of Siberian Federal University. – 2017. – Series: Technique and technologies. – Vol. 10. – № 6. – P. 783–793.
7. Kendirbaeva D.J., Grebennikova V.V. About interrelation of the geochemical conditions and hydrogeothermal situation in the Kyrgyz Tien Shan / materials conf.: Deep structure, geodynamics, thermal field, interpretation of the geophysical fields.
8. Kendirbaeva D.J. To discrete hydrogeological conditions and break-block separability of the Kyrgyz Tien-Shan / materials conf. Deep structure, thermal field, interpretation of geophysical fields. – Ekaterinburg, 2017. – P. 206–210.
9. Kendirbaeva, D.J. Results and prospects of the seismohydrogeological monitoring on the territory of the Northern Tien Shan / materials conf.: Problems of geodynamics and geoecology of the intra-continentals orogens. – Bishkek, 2018. – P. 159–165.
10. Earthquake Catalogue of the Institute of Seismology NAS KR.
11. Imashev S.A., Kendirbaeva D.J., Sverdlik, L.G. Algorithms and technologies of software «GeoChemistry» for revealing of the hydrogeochemical effects // Vestnik of Kyrgyz-Russian (Slavonic) University. – Bishkek, 2018. – Vol. 18. – № 4. – P. 164–169.