

УДК 550.341.5

**АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ СЕЙСМИЧЕСКОГО РЕЖИМА НА  
МАКРОКОМПОНЕНТНЫЙ СОСТАВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
ЮГО-ВОСТОКА ПОЛУОСТРОВА КАМЧАТКА  
(НА ПРИМЕРЕ СКВАЖИНЫ ГК-1, СТАНЦИЯ ПИНАЧЕВО)**

**Г. В. Рябинин, Ю. М. Хаткевич**

*Камчатская опытно-методическая сейсмологическая партия Геофизической службы РАН  
г. Петропавловск - Камчатский*

**Аннотация.** На временном интервале 1985 – 2004 гг., анализируется влияние процессов подготовки и реализации землетрясений на изменения макрокомпонентного состава воды скважины ГК-1, расположенной в окрестностях г. Петропавловска-Камчатского. Установлено существование статистически значимой связи между характеристиками сейсмического режима и изменениями концентраций хлора, натрия и гидрокарбонат-иона в воде скважины ГК-1. Показано, что для разных показателей ионного состава характер связи может быть различным. С использованием оценки кросскорреляционных функций в скользящем временном окне определено, что теснота корреляционной связи не постоянна во времени и может увеличиваться в периоды подготовки и реализации сильных сейсмических событий. Рассмотрены возможные модели изменения концентраций основных показателей ионно-солевого состава подземных вод при изменении напряжённо-деформированного состояния среды в периоды подготовки землетрясений

**ANALYSIS OF RELATIONSHIP BETWEEN SEISMIC ACTIVITY  
AND GROUNDWATER ION CONTENT  
IN THE SOUTH – EASTERN KAMCHATKA,  
A CASE STUDY OF WELL GK-1, PINACHEVO STATION**

**G. V. Ryabinin, Yu. M. Khatkevich**

*Kamchatkan Methodical Seismological Department., Geophysical Service, RAS  
Petropavlovsk-Kamchatsky*

**Abstract.** We have analyzed the relationship between processes of an earthquake preparation and occurrence and changes in groundwater ion content at well GK-1, located nearby town of Petropavlovsk – Kamchatsky, since 1985 to present day. It has revealed the statistically significant linkage between seismic parameters and changes in  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$  and hydro carbonate-ion concentrations in water at well GK-1. Correlation coefficient varies at different groundwater ion-content. Using cross-correlation function in the running window we came to conclusion that the correlation coefficient is not stable in time and can increase at the moment of preparation and occurrence of large earthquakes. We suggest possible models that explain changes in values of groundwater ion-salt content when stress-strain seismic setting varies before and after large earthquakes.

## Введение

К настоящему времени накоплено большое количество данных, доказывающих существование взаимосвязи между сейсмическим и гидрогеологическим режимами. Качественно эта взаимосвязь характеризуется появлением в периоды подготовки и реализации землетрясений аномальных изменений в гидродинамической, гидрохимической, газохимической и изотопной составляющих режима подземных вод. Наблюдаемые предвестники обладают исключительным разнообразием форм своего проявления. Одни и те же компоненты могут иметь различные прогностические признаки в зависимости от районов исследований. Это обусловлено разнообразием геолого-тектонического строения зон подготовки землетрясений и пунктов наблюдений, гидрогеологических условий, гидрохимических типов вод, механизмов очагов землетрясений и многих других факторов.

В большинстве работ, посвященных поиску гидрогеологических предвестников землетрясений рассматриваются в основном гидродинамическая (изменение уровней воды и напоров в скважине) и газохимическая составляющие, тогда как макрокомпонентному составу уделяется незаслужено мало внимания. Напротив, опыт наших многолетних наблюдений показывает, что изменения основных показателей ионно-солевого состава воды является одним из наиболее устойчивых признаков подготовки сильных сейсмических событий.

Одной из первых работ, где упоминается о влиянии сильных землетрясений на режим подземных вод, являются исследования, проводившиеся в 1965 – 66 гг., под руководством Е. К. Мархинина на острове Кунашир [14]. Несмотря на достаточно низкую дискретность наблюдений (1 проба в месяц) авторам удалось установить, что в период повышенной сейсмической активности в воде источников Горячего пляжа и источников у подножия вулкана Менделеева наблюдается увеличение средних содержаний сульфатов, хлоридов, их соотношений, а также других химических компонентов подземных вод. Анализ результатов наблюдений за поведением макрокомпонентного состава подземных вод в периоды подготовки и реализации землетрясений в различных сейсмоактивных районах бывшего СССР (Дагестан, Армения, Таджикистан, Киргизия, Казахстан, Крым) показывает, что аномальные изменения концентраций основных ионов различаются как по форме (имеется в виду знак аномалии, уменьшение – увеличение), так и по длительности прогностических или послесейсмических вариаций. К примеру, для иона хлора наиболее часто отмечается кратковременное увеличение концентрации незадолго до сейсмического события [16, 2, 7, 4, 8, 12], реже её уменьшение [6]. Встречаются случаи, когда изменение содержания хлора может носить противоположный характер в одном и том же районе наблюдения. Подобная картина, например, отмечалась перед Салатаусским землетрясением 23.12.1974 г. (Дагестан). Здесь, за несколько суток до события, в воде термальных источников наблюдалось увеличение концентрации хлоридов, тогда как в неглубокой артезианской скважине содержание хлора уменьшилось [16]. Такая ситуация может складываться при наличии нескольких водоносных горизонтов вмещающих воды разного состава и имеющих гидравлическую связь между собой, что и полагают авторы. В работе [15] приводится пример зависимости времени проявления аномалии от минерализации вод. Что касается других ионов ( $\text{Ca}$ ,  $\text{Na}$ ,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{K}$ ), то формы их вариаций, в основном, совпадают с вариациями концентрации хлора, но имеют менее выраженный характер. Особняком в этом списке стоит гидрокарбонат-ион ( $\text{HCO}_3^-$ ) аномальные изменения которого в большинстве случаев приурочены к послесейсмической стадии.

Исследования влияния сильных Камчатских землетрясений на режим подземных вод района г. Петропавловска-Камчатского были начаты в 1977 г. К настоящему времени сеть наблюдений состоит из четырёх гидросейсмологических станций: станция Пиначево, включающая в себя скважину ГК-1 глубиной 1261 м и четыре слаботер-

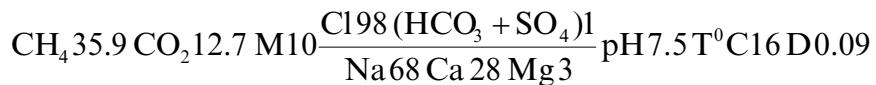
мальных источника; станция Морозная (скв. №1 глубиной 600 м); станция Хлебозавод (скв. Г-1 – 2542 м); станция Верхняя Паратурка (скв. ГК-5 – 240 м, скв. ГК-15 - 1209 м, скв. ГК-17 - 1186 м, скв. ГК-44 – 650 м, скв. ГК-88 - 815 м). Все скважины работают в режиме самоизлива. В каждой точке опробования ведутся наблюдения за температурой и расходом воды, анализируются концентрации растворённых в воде ионов и кислот, а также содержание растворённых и свободных газов. Дискретность наблюдений для скважин расположенных на ст. Верхняя Паратурка составляет 1 раз в 6 дней, для остальных скважин – 1 раз в 3 дня. Все водопункты находятся в различных геолого-структурных условиях. Обобщая результаты исследований проводимых на Камчатском гидрогеодинамическом полигоне можно констатировать, что все сейсмические события, проявившиеся в г. Петропавловске – Камчатском с интенсивностью 4 и более баллов, вызывают высокоамплитудные послесейсмические изменения расхода, ионного и газового состава воды, наиболее ярко проявляющиеся в режиме Пиначевских источников. Землетрясениям силой 5 и более баллов в большинстве случаев предшествуют аномальные вариации макрокомпонентного и газового состава. Более подробно с основными результатами исследований можно познакомиться в публикациях [18, 17, 11, 19].

Целью настоящей работы является количественный анализ взаимосвязи сейсмического и гидрохимического режимов. Постановка такой задачи не случайна и имеет непосредственное отношение к проблеме прогноза сильных и, в первую очередь, катастрофических землетрясений. Примеры аномальных вариаций разного рода геофизических полей в периоды предшествующие сильным сейсмическим событиям известны довольно давно, однако, ни один из обнаруженных предвестниковых признаков не обладает достаточной устойчивостью, как по времени, так и по характеру своего проявления. Это, фактически, сводит на нет любые попытки достоверно прогнозировать сейсмическое событие, не говоря уже о вероятностном подходе. К сожалению, не решает проблемы и использование комплекса компонентов – предвестников даже в пространственно разнесённых пунктах наблюдения, поскольку все они, в силу целого ряда причин, имеют различную прогностическую ценность. Именно здесь возникает необходимость количественной оценки взаимосвязи вариаций каждого конкретного компонента – предвестника с сейсмическим режимом, что является своего рода “тестом на доверие”. С другой стороны, попытка количественной оценки сразу же обнажает, в общем-то, очевидный факт, что корреляция, к примеру, между вариациями макрокомпонентного состава воды и такой распространённой характеристикой, как энергетический класс землетрясения ( $K_s$ ) не будет иметь значимых величин даже в силу того, что сравниваемые характеристики имеют разные распределения. При этом временное соответствие аномалий гидрохимического режима наиболее сильным землетрясениям может быть заметно, что называется “невооружённым глазом”. Одно из возможных решений данной проблемы и представлено в настоящей работе.

В качестве характеристик гидрохимического режима для анализа были выбраны временные ряды изменения концентраций хлор – иона ( $Cl^-$ ), иона натрия ( $Na^+$ ) и гидрокарбонат – иона ( $HCO_3^-$ ) в воде скважины ГК-1 (станция Пиначево) на интервале 1985 - 2003 гг. Выбор именно этой скважины не случаен, поскольку вариации макрокомпонентного состава воды здесь носят наиболее устойчивый прогностический характер по сравнению с другими наблюдательными скважинами, где такие изменения либо менее выражены, либо менее устойчивы. Кроме вышеупомянутых ионов в воде скважины ГК-1 анализируются ещё ионы кальция ( $Ca^{2+}$ ), магния ( $Mg^{2+}$ ), калия ( $K^+$ ) и сульфат ион ( $SO_4^{2-}$ ). Причина, по которой эти ионы не вошли в анализ заключается в недостаточной длительности их временных рядов ( $Ca, K, Mg$ ) или в наличии больших пропусков данных ( $SO_4^{2-}$ ). Оправданием использования столь ограниченного анионно-cationного набора компонентов может служить тот факт, что ионы хлора, натрия и гидрокарбоната практически полностью характеризуют химизм воды скважины,

которая имеет хлоридный, натриевый состав. Кроме того, хлор и натрий – ионы в силу своих генетических особенностей характеризуют глубинную составляющую воды скважины, а гидрокарбонат – поверхностную (метеорную). Ошибки химического анализа растворённых в воде ионов Cl, Na и HCO<sub>3</sub> составляют 2, 10 и 2 процента соответственно.

Скважина ГК-1 расположена в 35 км от г. Петропавловска-Камчатского и в 14 км от г. Елизово, у подножья высоты 202. Здесь же находятся и слаботермальные Пиначевские источники. В структурном отношении район заложения скважины находится у южной границы большого массива андезитов плиоценового возраста, слагающего окрестные возвышенности и приурочен к разлому северо-западного простирания являющегося, по-видимому, фрагментом Петропавловского глубинного разлома. Скважина ГК-1 пробурена в 1970 г. Скважина вскрыла: в интервале 0 – 151 м - прибрежно-морские, дельтовые, ледниковые, водно-ледниковые и озёрные гравийно-галечные отложения, нижне-среднеплейстоценового возраста; в интервале 151 – 843 м – вулканогенно-осадочные, пирокластические отложения андезитобазальтового состава алнейской серии неогена (*Nal*). Далее до забоя (на глубине 1260 м) залегают рассланцованные песчаники с прослойками филлитовых сланцев хозгонской свиты верхнего мела (*K2hz*). В интервале 372 – 406 м встречены хорошо окатанные отложения Пра-Авачи, к которым приурочен основной приток воды и газа. Ниже представлена формула химического состава воды скважины.

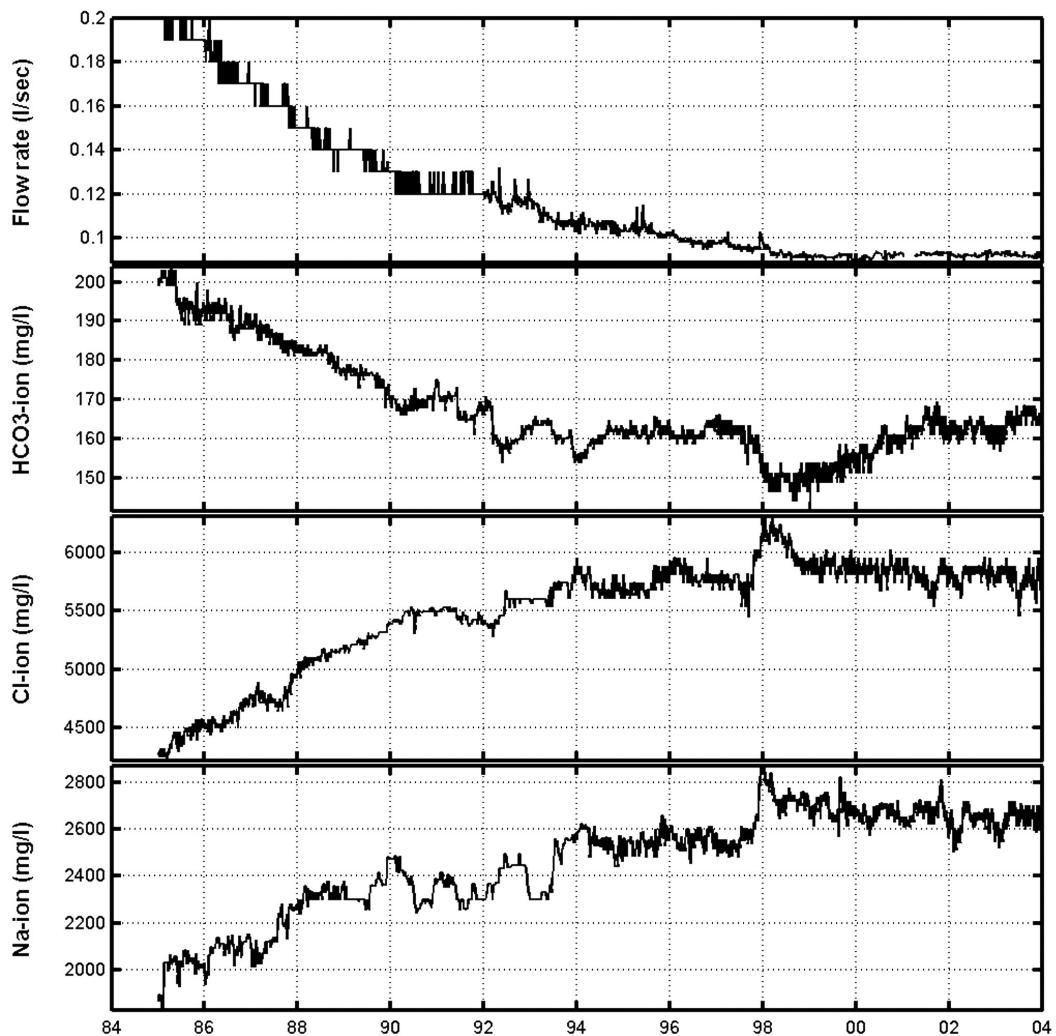


### Подготовка гидрохимических данных к анализу

На рисунке 1 представлены фактические данные изменения концентраций хлора, натрия и гидрокарбонат-иона, а также расхода воды скважины ГК-1. Некоторое различие в вариациях расхода воды до и после 1992 г. обусловлено ошибкой округления. До 1992 г. значения расхода, измеряемого объёмным методом, округлялись до второго десятичного знака, а после 1992 г. – до третьего. Из рисунка видно, что расход воды и концентрация гидрокарбонат-иона экспоненциально уменьшаются, а содержание хлор-натриевой составляющей увеличивается. Это может быть вызвано с одной стороны, потерей напора в водовмещающих породах дренируемой скважиной (уменьшение расхода и концентрации гидрокарбоната) и с другой стороны, перетеканием из нижележащих горизонтов (комплексов) более минерализованных вод, за счёт увеличения градиента напора между верхними и нижними горизонтами (увеличение концентраций хлор и натрий ионов). Тренды компенсировались полиномами 2 – 3 ей степеней. Коэффициенты детерминированности во всех случаях были не ниже 0,85. Далее временные ряды стандартизировались относительно их среднего значения и дисперсии и приводились к равномерной дискретности методом линейной интерполяции с шагом дискретизации равным одним суткам.

### Подготовка данных о сейсмической активности

В качестве исходной характеристики сейсмического режима использовалась величина энергетического класса землетрясений (Ks). Выборка проводилась по региональному и оперативному каталогам КОМСП ГС РАН и включала в себя события с Ks>10, глубиной гипоцентров менее 50 км, эпицентры которых попадали в четырёхугольную область с координатами вершин (широта/долгота): 49/159, 51/156, 161/56 и



**Рис. 1.** Графики изменения расхода и основных показателей макрокомпонентного состава воды скважины ГК-1, станция Пиначево.

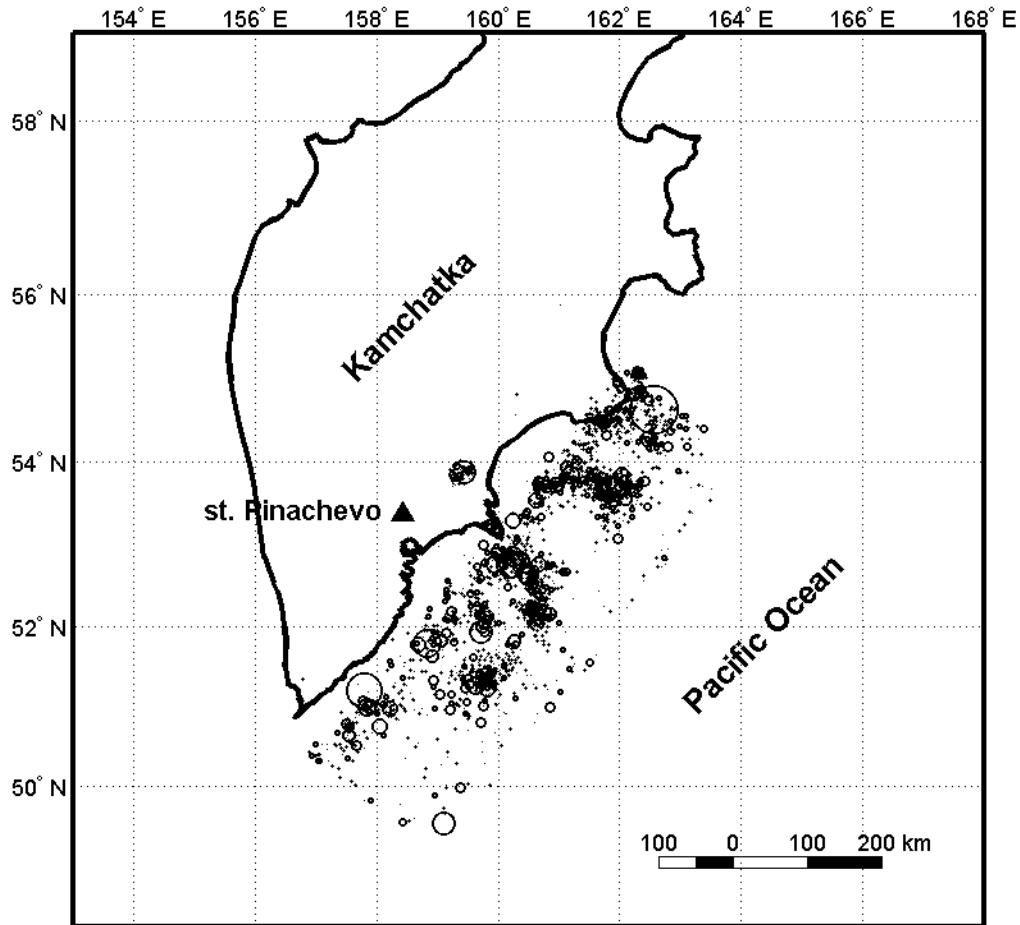
**Fig. 1.** Diagrams show variations in water discharge and groundwater ion content at well GK-1, Pinachevo station.

164/54 (рис. 2). Классы землетрясений, произошедших в течение 1 суток, суммировались по следующему правилу:

$$K_s = \lg \sum_{i=0}^n 10^{K_{s_i}}$$

где  $n$  – количество землетрясений произошедших внутри интервала дискретности. Из получившихся “суммарных” величин  $K_s$  рассчитывались значения энергии ( $E$ ) и корня квадратного из энергии ( $E_s$ ) землетрясений. Значения величины  $E$  характеризуют количество энергии высвобожденной в результате того или иного сейсмического события, а характеристика  $E_s$  пропорциональна величине сброшенной деформации. Далее, из характеристик  $K_s$ ,  $E$  и  $E_s$  рассчитывались так называемые авторегрессионные характеристики  $K_{s_{ar}}$ ,  $E_{ar}$  и  $E_{s_{ar}}$ , которые получаются из исходных в результате линейного преобразования вида

$$X_{ar_{j+1}} = \alpha(X_{ar_j} - \bar{X}) + X_{j+1}$$



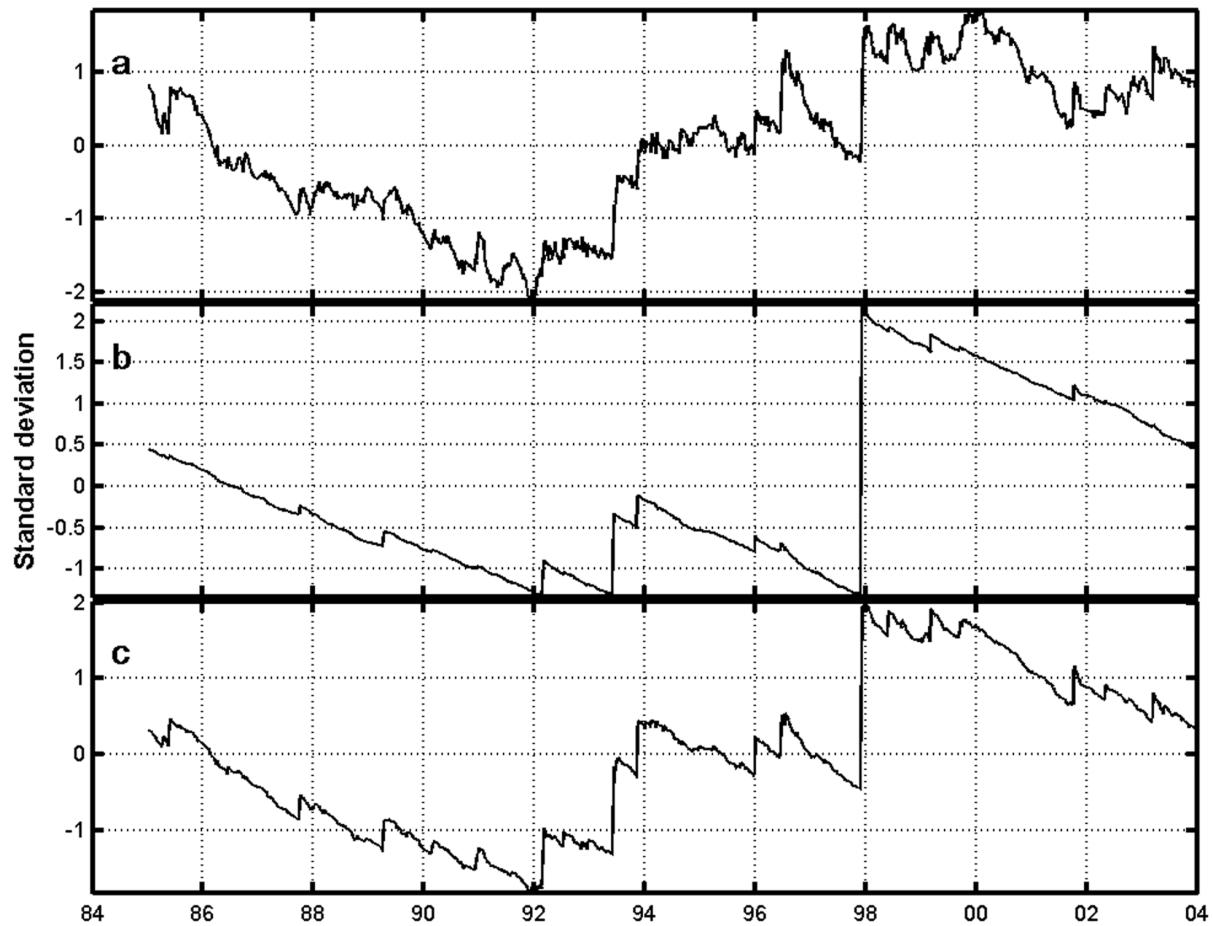
**Рис. 2.** Схема местоположения станции Пиначево и эпицентров землетрясений участвующих в анализе. Размер маркеров пропорционален энергии сейсмических событий.

**Fig. 2.** Location scheme of Pinachevo station and epicenters of analyzed earthquakes. The circles' size corresponds to the energy of the earthquakes.

которое носит название уравнения авторегрессии первого порядка. Здесь  $X_{ar}$  - значения авторегрессионной характеристики,  $X$  - значения исходной характеристики,  $\bar{X}$  - среднее значение исходной характеристики,  $\alpha$  - коэффициент авторегрессии который в данном случае принимался равным 1,  $j=0...N-2$ ,  $N$  - длина выборки. Линейное преобразование подобного рода, при условии, что  $\alpha=1$ , эквивалентно операции расчёта кумулятивной кривой (кривой Беньофа) по центрированным данным (среднее значение равно нулю). Тогда вариации авторегрессионных характеристик соответствуют стадиям накопления и разгрузки суммарной сейсмической энергии ( $E_{ar}$ ), её логарифма ( $K_{S_{ar}}$ ) и стадиям накопления и разгрузки условных деформаций ( $E_{S_{ar}}$ ). Далее, характеристики сейсмического режима стандартизировались и приводились к равномерной дискретности аналогично гидрохимическим данным. Графики полученных кривых представлены на рисунке 3.

### Обработка и интерпретация данных

В качестве критерия для оценки взаимосвязи сейсмического и гидрохимического режимов использовалась кросскорреляционная функция (далее ККФ). Естественно, и это вытекает из самого подхода, что связь между оцениваемыми параметрами предполагается линейной. Другими словами, имеется в виду, что система пласт – скважина обладает линейной реакцией относительно воздействующих на неё про-

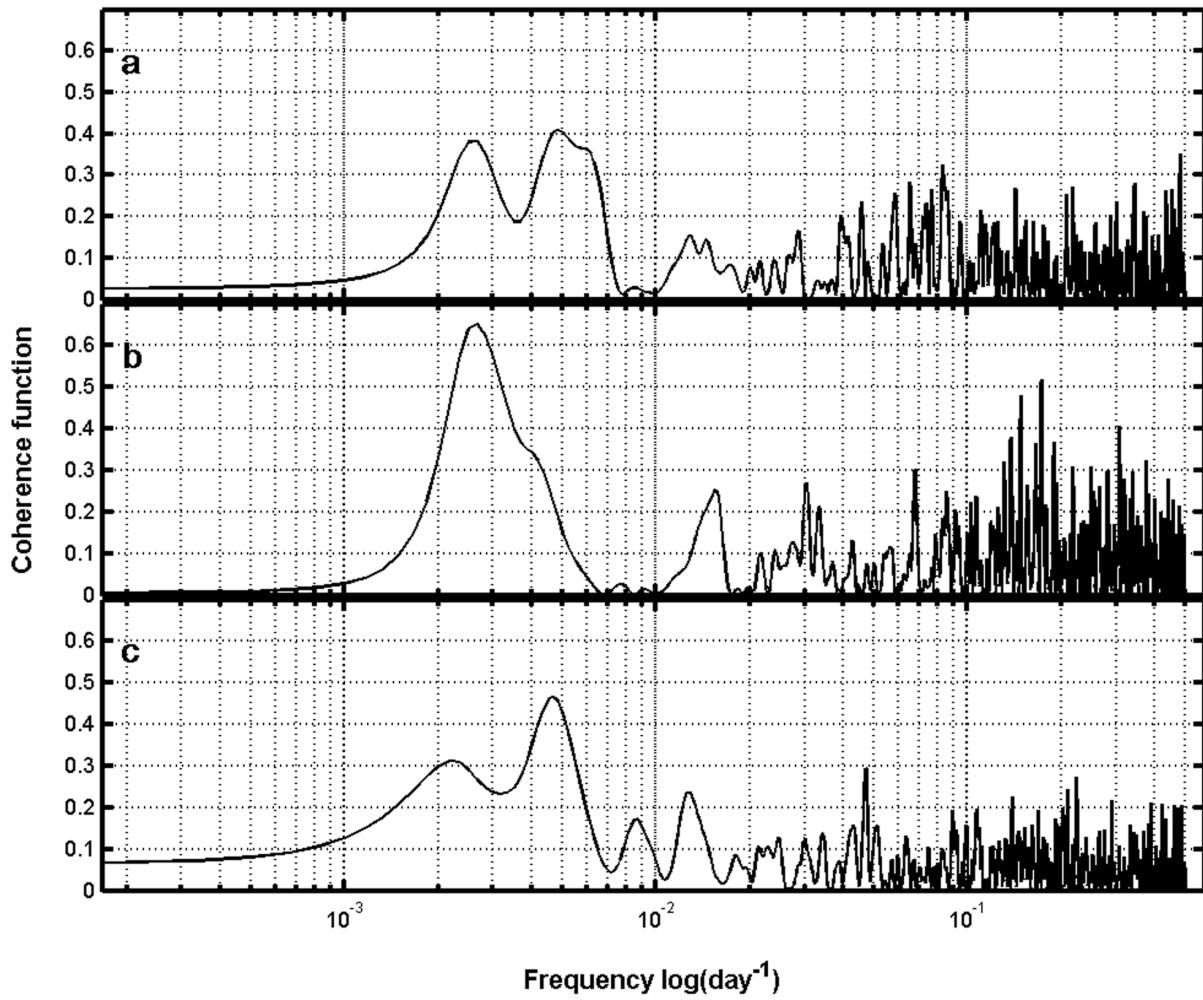


**Рис. 3.** Графики авторегрессионных характеристик сейсмического режима: **a** –  $K_{S_{ar}}$ , **b** –  $E_{ar}$ , **c** –  $E_{S_{ar}}$ .

**Fig. 3.** Diagrams of auto-regressive parameters of seismicity: **a** –  $K_{S_{ar}}$ , **b** –  $E_{ar}$ , **c** –  $E_{S_{ar}}$ .

цессов подготовки и реализации землетрясений. Необходимо отметить, что кросскореляционный анализ связи данных гидрохимических наблюдений по станции Пинячево с сейсмичностью уже проводился. Авторами работы [10] была выполнена схематизация основных форм кросскореляционных функций по целому ряду компонентов химического состава воды скважины ГК-1 и расположенных здесь же слаботермальных источников. Сами значения экстремумов ККФ оказались не высоки ( $0,2 - 0,4$ ). В данной статье представлен несколько иной подход, основанный на использовании более оптимальных временных функций сейсмического режима (авторегрессионных характеристик) результата которого, представлены ниже.

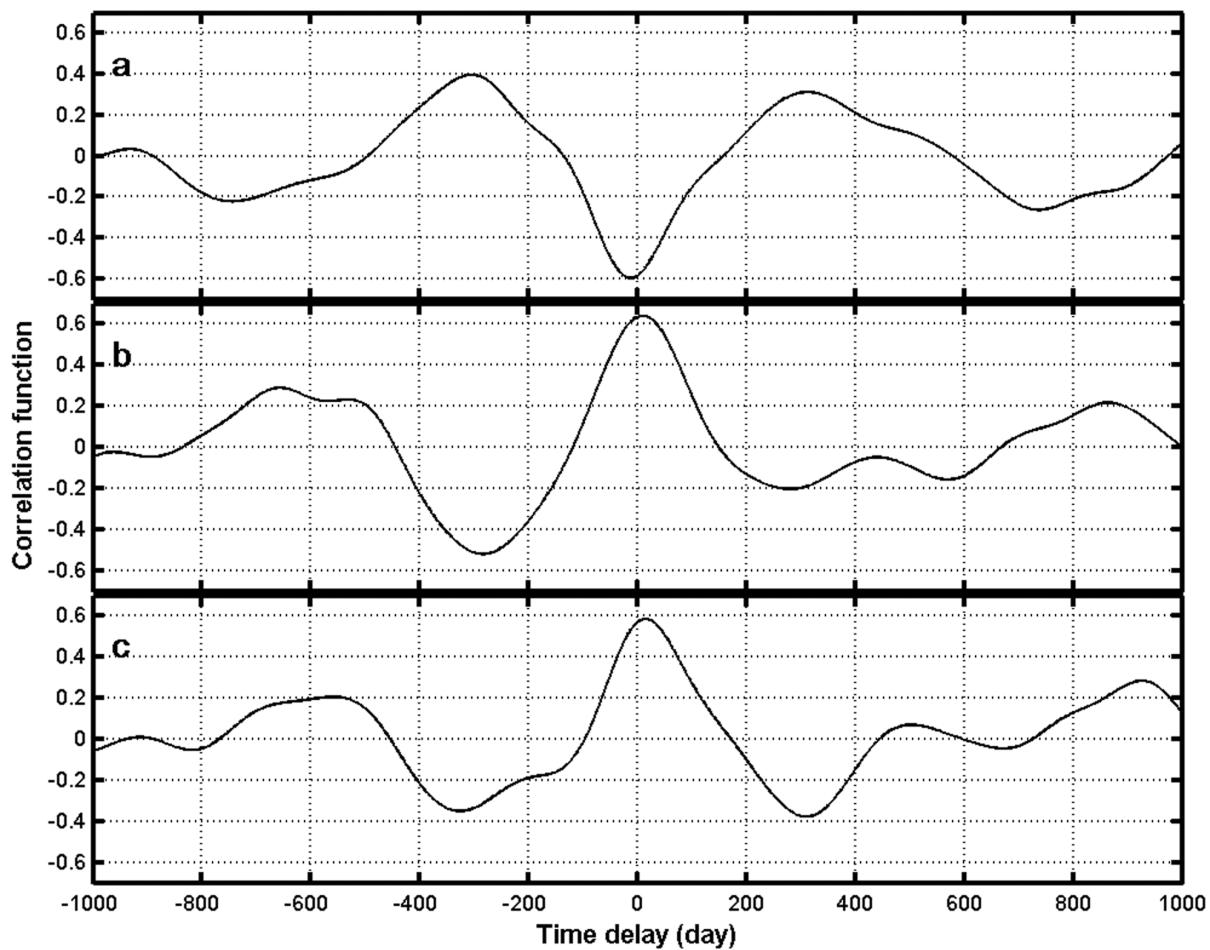
На предварительной стадии анализа проводилась оценка ККФ между показателями макрокомпонентного состава и каждой из полученных авторегрессионных характеристик. Предварительный анализ проводился с целью выбора таких показателей сейсмического и гидрохимического режимов, корреляция между которыми была бы наибольшей. В результате обнаружилось, что максимальные значения ККФ имеют при сравнении гидрохимических характеристик с характеристикой  $E_{S_{ar}}$ . Как известно, величина корреляции находится в сильной зависимости от соотношения сигнала – шум. Одним из наиболее распространённых подходов к задаче компенсации помехообразующих (шумовых) факторов, является идентификация и устранение воздействия каждого из таких факторов или определённой их совокупности. В случае выраженных узкополосных помех, например, таких как сезонные и приливные воздействия, задача их компенсации оказывается довольно простой и состоит в обнулении некоторой, достаточно узкой полосы спектра с центральной частотой равной частоте помехи.



**Рис. 4.** Графики спектров когерентности рассчитанных для характеристик: **a** – Es<sub>ар</sub>-HCO<sub>3</sub> ион, **b** – Es<sub>ар</sub>-Cl ион, **c** – Es<sub>ар</sub>-Na ион.

**Fig. 4.** Coherent spectrum diagrams: **a** – Es<sub>ар</sub>-HCO<sub>3</sub>, **b** – Es<sub>ар</sub>-Cl, **c** – Es<sub>ар</sub>-Na.

Устранение воздействия широкополосных помех таких как, атмосферное давление, атмосферные осадки, не сезонные вариации температуры воздуха и т. д., является гораздо более сложной задачей. Методы и алгоритмы многомерной компенсации подобного рода помех изложены в работе [13] и с успехом применяются на практике. Тем не менее, при последовательном выделении и компенсации каждого помехообразующего фактора или определённой, известной их совокупности, полезный сигнал до конца будет оставаться в постепенно сокращающемся агломерате реальных шумовых факторов [1]. Поэтому, в данной работе был использован принципиально иной подход, основанный на непосредственном разделении анализируемых временных рядов на полезную и шумовую составляющие. Суть процедуры заключалась в анализе спектров когерентности рассчитанных для каждой гидрохимической характеристики и величины Es<sub>ар</sub>. Считалось, что полезный сигнал заключён в том частотном диапазоне, в котором функция когерентности имеет максимальные значения. Пример спектров когерентности, рассчитанных для характеристики Es<sub>ар</sub> и гидрохимических показателей воды скв. ГК – 1, представлены на рисунке 4. Из рисунка видно, что максимальные значения функций когерентности сосредоточены в низкочастотном диапазоне в интервале периодов 100 – 1000 сут. Таким образом, чтобы увеличить соотношение сигнал – шум достаточно, в простейшем случае, осуществить низкочастотную фильтрацию анализируемых процессов полосно-пропускающим фильтром. Для этого использовался цифровой рекурсивный фильтр Баттерворда 6 порядка.



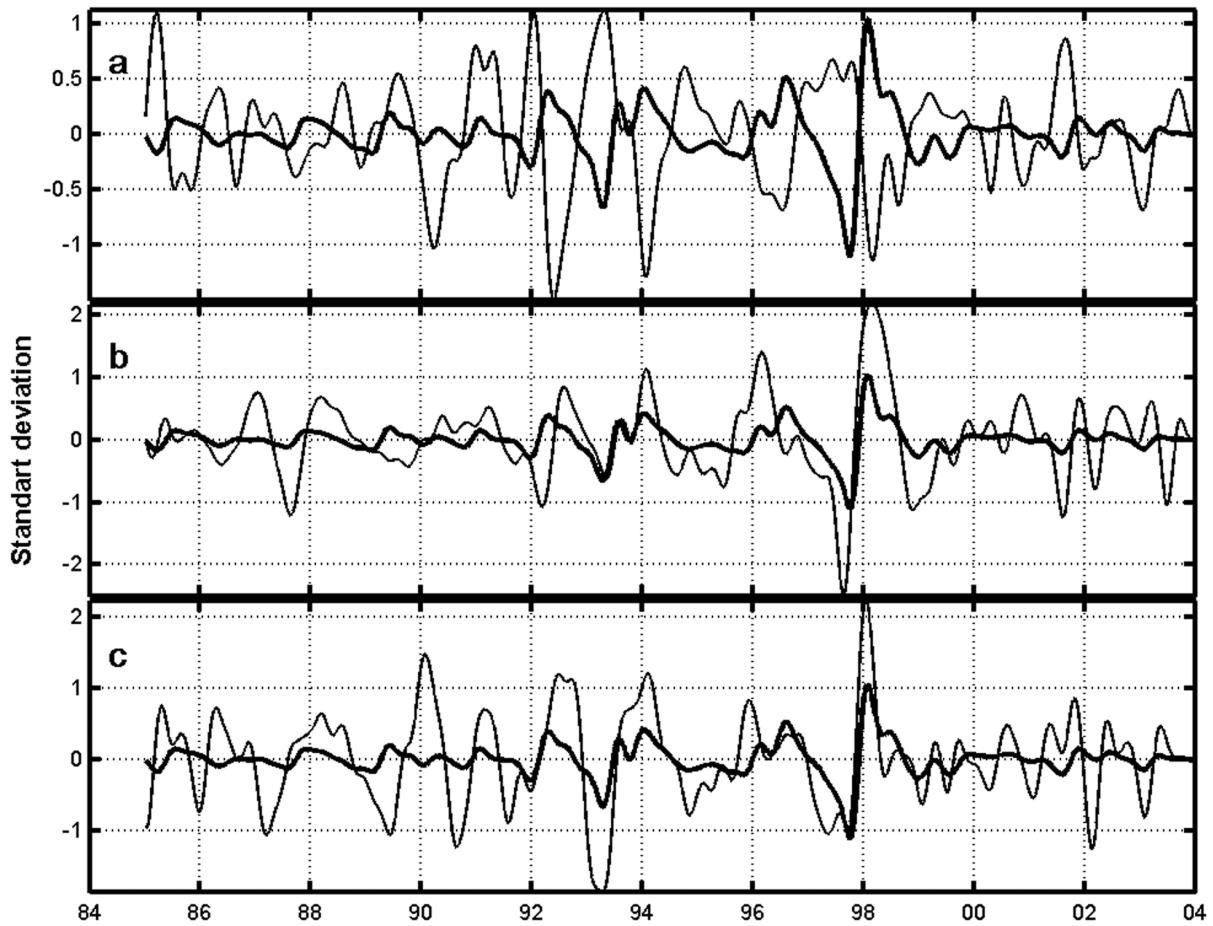
**Рис. 5.** Графики кросскорреляционных функций рассчитанных для характеристик:  
а –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{HCO}_3$  ион, б –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Cl}$  ион, в –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Na}$  ион.

**Fig. 5.** Diagrams of cross-correlation functions: а –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{HCO}_3$ , б –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Cl}$ , в –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Na}$ .

Обобщая вышеизложенное, структуру алгоритма количественной оценки тесноты связи между вариациями макрокомпонентного состава воды и сейсмическим режимом можно представить в следующем виде.

1. Подготовка к анализу данных гидрохимических наблюдений и данных о сейсмической активности (расчет авторегрессионных характеристик).
2. Предварительный кросскорреляционный анализ.
3. Кросспектральный анализ, оценка функции когерентности.
4. Определение угловых частот, проектирование полосно-пропускающего цифрового фильтра, фильтрация.
5. Кросскорреляционный анализ временных рядов после фильтрации и, собственно, количественная оценка взаимосвязи.

На рисунке 5 представлены графики ККФ для рядов после фильтрации, а на рисунке 6 сами ряды. Видно, что все ККФ имеют хорошо выраженные экстремумы, локализованные в окрестности нуля приёма, в случае ионов хлора и натрия наблюдается прямая связь, а в случае гидрокарбонат иона – обратная. Значения коэффициентов корреляции для  $\text{HCO}_3$ ,  $\text{Cl}$  и  $\text{Na}$  ионов составляют  $-0.60$ ,  $+0.64$  и  $+0.59$ , а соответствующие им временные сдвиги равны  $-13$ ,  $+9$  и  $+14$  суток. Таким образом, получается, что вариации концентраций ионов хлора и натрия, характеризующих глубинную составляющую воды скважины ГК-1, в среднем совпадают, а точнее несколько опережают вариации кривой  $\text{Es}_{\text{ar}}$ . Для  $\text{HCO}_3$  иона, который поступает в подземную гидросферу в основном за счёт инфильтрации поверхностных вод и ат-



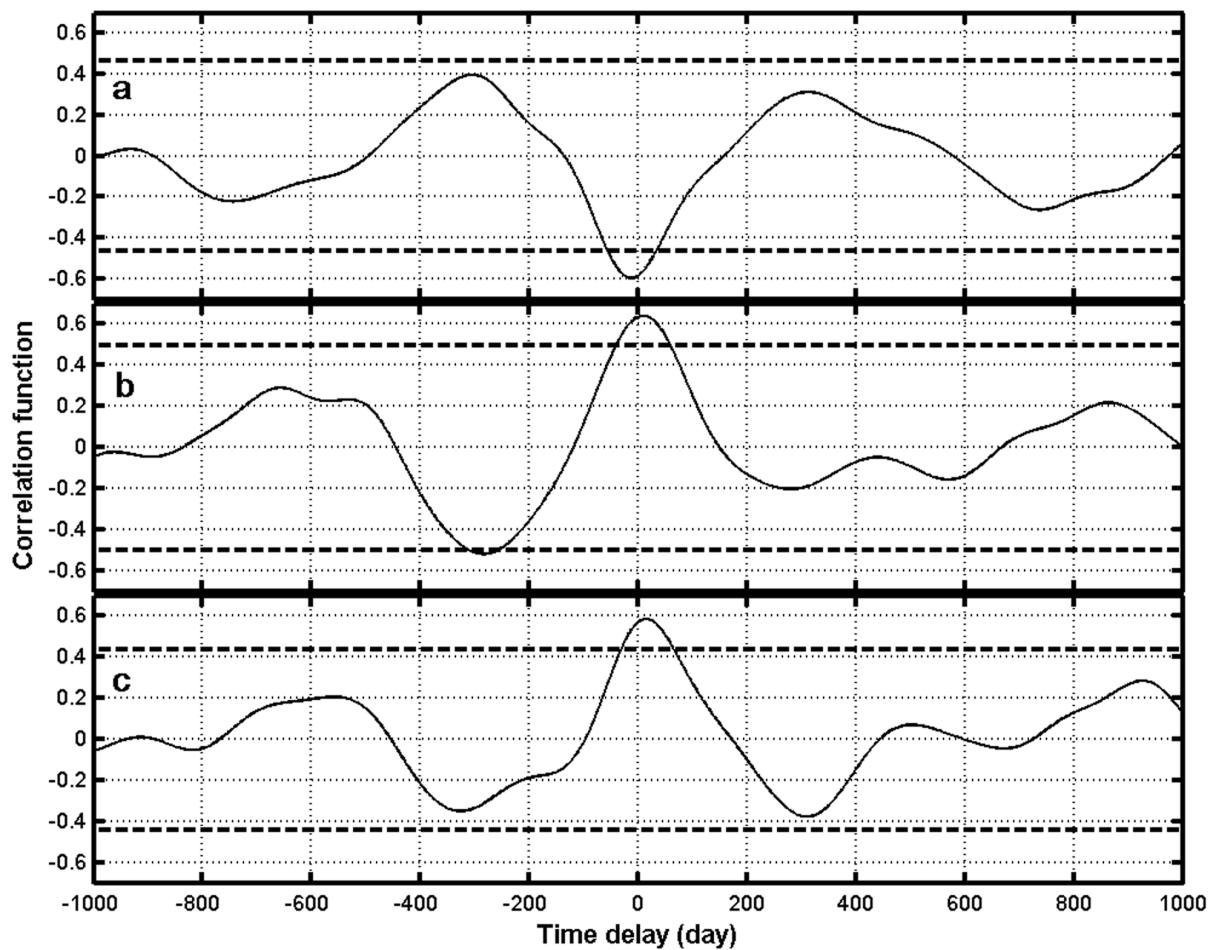
**Рис. 6.** Временные ряды вариаций анализируемых характеристик после фильтрации: **a** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  и  $\text{HCO}_3$  ион, **b** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  и  $\text{Cl}$  ион, **c** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  и  $\text{Na}$  ион. Жирной линией показаны вариации характеристики  $\text{Es}_{\text{ar}}$ .

**Fig. 6.** Variations of time series after filtering out: **a** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  –  $\text{HCO}_3$ , **b** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  –  $\text{Cl}$ , **c** –  $\text{Es}_{\text{ar}}$  and  $\text{Na}$ . Bold line shows variations of  $\text{E}_{\text{Sar}}$  parameter.

мосферных осадков, напротив, в период накопления условных деформаций наблюдается рост концентрации, которая достигает своего максимума уже после сейсмического события.

Несмотря на достаточно высокие коэффициенты корреляции, есть основание предполагать, что их величины могут быть в значительной степени обусловлены автокоррелированностью самих временных рядов [5]. Другими словами, необходимо проверить действительно ли значения экстремумов кросскорреляционных функций отражают тесноту связи рассматриваемых процессов или же они объясняются высокими автокорреляциями. Наиболее простой способ оценки влияния автокорреляций (автоковариаций) на величину взаимной корреляции заключается в том, чтобы с помощью фильтрации превратить исследуемые ряды в “белые шумы”, а затем произвести расчёт кросскорреляционных функций [5]. Но тогда, во-первых, уменьшается соотношение сигнал – шум, что нивелирует корреляцию, во-вторых, предполагается, что исследуемые ряды коррелируются не по всему частотному диапазону, а лишь по достаточно узкому отрезку низкочастотной части спектра. По этим причинам для оценки влияния автокорреляций на результаты кросскорреляционного анализа использовался другой метод, алгоритм которого представлен ниже.

1. Исходная выборка сейсмических событий случайным образом перетасовывалась в результате чего, было сгенерировано 10 модельных рядов сейсмической активности (Ks mod).



**Рис. 7.** Графики кросскорреляционных функций и их доверительных интервалов рассчитанных для характеристики: **a** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{HCO}_3$  ион, **b** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Cl}$  ион, **c** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Na}$  ион.

**Fig. 7.** Diagrams of cross-correlation function and their confidence intervals: **a** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{HCO}_3$ , **b** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Cl}$ , **c** –  $\text{Es}_{\text{ar}}-\text{Na}$ .

2. Для каждого из полученных модельных рядов рассчитывалась его авторегрессионная характеристика  $\text{Es}_{\text{ar mod}}$ . Так как данные каталога не изменялись, то автокорреляционная структура модельных рядов будет практически такой же, как и у фактической характеристики  $\text{Es}_{\text{ar}}$ . Имеется в виду, что времена корреляции (сумма по модулю всех значений автокорреляционной функции) для модельных и фактического ряда будут отличаться незначительно.

3. Модельные ряды ( $\text{Es}_{\text{ar mod}}$ ) пропускались через тот же фильтр, с теми же значениями угловых частот, что и фактические ряды.

4. Для каждой гидрохимической характеристики рассчитывались модельные ККФ последовательно с каждым из полученных модельных рядов  $\text{Es}_{\text{ar mod}}$  (например: Cl-ион с  $\text{Es}_{\text{ar mod}1}$ , Cl –  $\text{Es}_{\text{ar mod}2}$ , Cl –  $\text{Es}_{\text{ar mod}3}$ , и т.д.). Всего получалось по 10 модельных ККФ для каждого иона.

5. Для каждого набора из 10 модельных ККФ рассчитывалась их средняя дисперсия и доверительный интервал равный  $\pm 3\sigma$  ( $\sigma$  – среднеквадратическое отклонение).

6. Полученные доверительные интервалы накладывались на графики ККФ фактических данных. Экстремум кросскорреляционной функции считался значимым, если его значения выходили за пределы доверительного интервала.

Как можно видеть из рисунка 7, иллюстрирующего результаты оценки, экстремумы всех кросскорреляционных функций выходят за пределы доверительных интервалов и, следовательно, их значения действительно характеризуют тесноту линейной

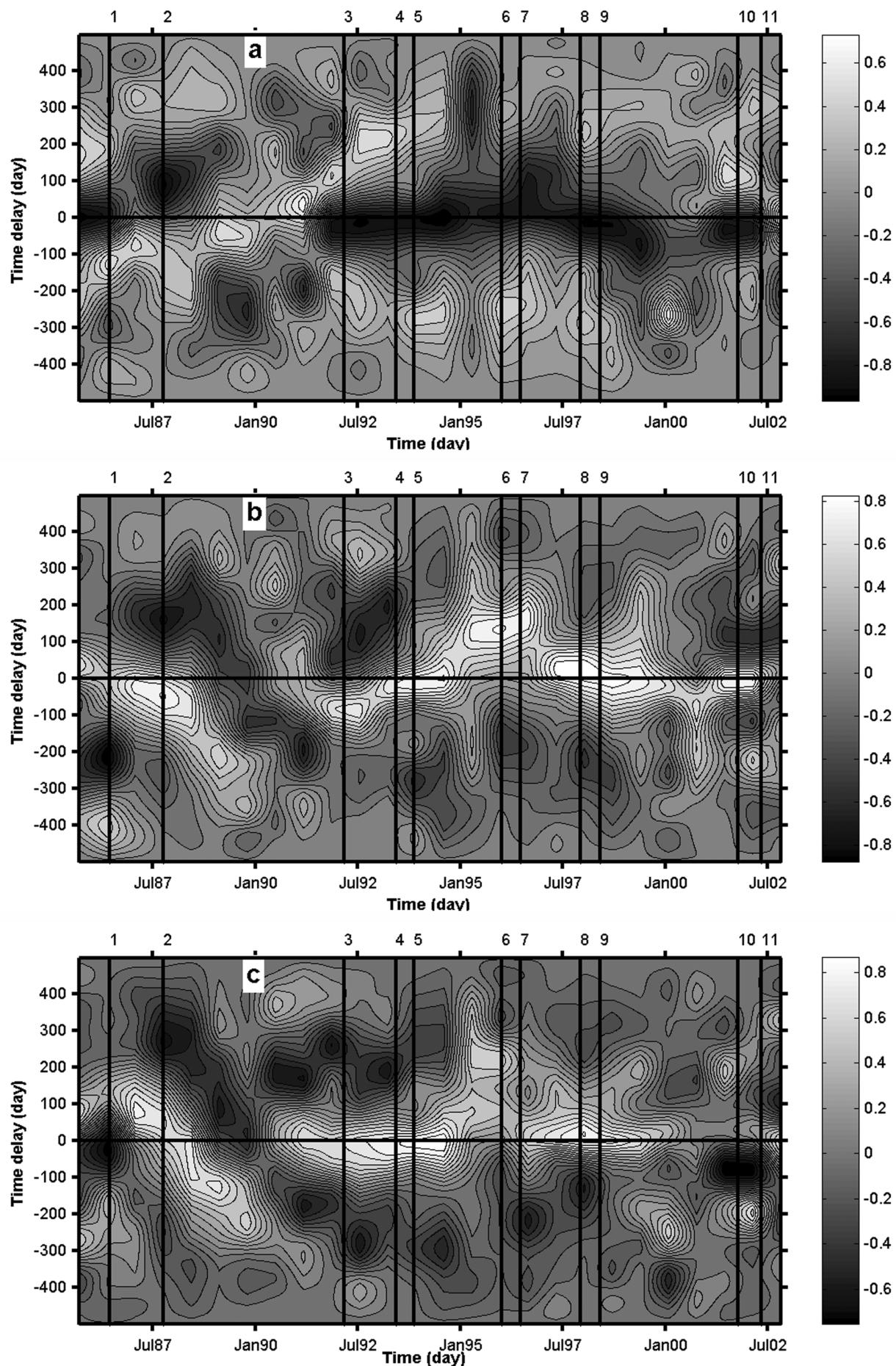


Таблица 1. Краткая характеристика наиболее сильных сейсмических событий, произошедших за период гидросейсмологических наблюдений (1977 – 2002 гг.)

№	Дата	Широта	Долгота	Глубина, км	Ks	Расстояние, км
1	17.06.1986	53.78	160.66	40	13.1	153
2	06.10.1987	52.86	160.23	33	14.1	109
3	02.03.1992	52.76	160.2	20	14.6	111
4	08.06.1993	51.2	157.8	40	15.0	219
5	13.11.1993	51.79	158.83	40	14.6	146
6	01.01.1996	53.88	159.44	0	14.3	101
7	21.06.1996	51.27	159.63	2	13.9	214
8	05.12.1997	54.64	162.55	10	15.5	307
9	01.06.1998	52.81	160.37	31	13.8	119
10	08.10.2001	52.65	160.53	22	14.1	136
11	08.05.2002	53.73	160.93	35	13.5	166

связи между вариациями макрокомпонентного состава воды скважины ГК-1 и авторегрессионной характеристикой  $E_{S_{ar}}$ . Кроме того, оказалось, что кросскорреляционная функция ( $Cl$  ион –  $E_{S_{ar}}$ ) содержит ещё один значимый экстремум, расположенный слева от нуля и имеющий временной сдвиг –300 суток. Появление этого экстремума связано с наличием корреляции между минимальными значениями характеристики  $E_{S_{ar}}$  и максимумами кривой изменения концентрации хлора, что указывает на присутствие устойчивой послесейсмической стадии в вариациях данного иона.

Как известно для нестационарных процессов, а рассматриваемые здесь ряды относятся именно к таковым, значения моментов и смешанных моментов (ковариационных функций) не обладают свойством инвариантности во времени [3]. Иными словами, значения и форма кросскорреляционных функций будут зависеть не только от временного сдвига, но и от начального момента времени. В связи с этим логично предположить, что величина корреляции между изменениями макрокомпонентного состава воды и характеристикой  $E_{S_{ar}}$  может увеличиваться перед или после сильных сейсмических событий и наоборот иметь низкие значения в периоды слабой сейсмической активности. Для проверки этого предположения нами была осуществлена оценка ККФ в скользящем временном окне. Размер окна равнялся 500 значениям, перекрытие интервалов равнялось 50%. Результаты оценки представлялись в виде диаграмм “линий уровня” в координатах: X – время, Y – временной сдвиг, Z – значения ККФ (рис. 8). Диапазон изменения значений ККФ на рисунке представлен гаммой оттенков серого цвета, где светлые участки соответствуют положительной корреляции, а тёмные – отрицательной. Жирными вертикальными линиями на диаграммах обозначены моменты наиболее сильных сейсмических событий, а номер над линией соответствует номеру землетрясения в таблице 1.

Из рисунка можно заметить следующие особенности. Экстремальные значения кросскорреляционных функций рассчитанных в скользящем временном окне приурочены к моментам наиболее сильных землетрясений произошедших в период с

**Рис. 8.** Диаграммы линий уровня построенные для оценок кросскорреляционных функций в скользящем временном окне: **a** –  $E_{S_{ar}}\text{-HCO}_3$  ион, **b** –  $E_{S_{ar}}\text{-Cl}$  ион, **c** –  $E_{S_{ar}}\text{-Na}$  ион. Вертикальными линиями на диаграммах обозначены моменты наиболее сильных землетрясений землетрясений произошедших в период с 1985 по 2004 гг. Номера над жирными линиями соответствуют номерам землетрясений в таблице 1.

**Fig. 8.** Diagrams of level lines modeled for cross-correlation values in the running window: **a** –  $E_{S_{ar}}\text{-HCO}_3$  ion, **b** –  $E_{S_{ar}}\text{-Cl}$  ion, **c** –  $E_{S_{ar}}\text{-Na}$  ion. Vertical lines show peaks of the largest earthquakes occurred in 1985 – 2004. A digit above the bold line corresponds to the No. of the earthquake in Table 1.

1985 по 2004 и, как правило, их предваряют. В каждом, конкретном случае положение экстремумов ККФ относительно нулевой линии сдвигов оказывается различным. Оценка ККФ в скользящем временном окне рассчитанная для ионов хлора и натрия показывает наличие положительной корреляции, значения которой достигают 0.8 и более, что существенно превосходит величину максимумов ККФ, рассчитанных по всей длине реализаций (рис. 7 б,с). Для гидрокарбонат – иона напротив, наблюдается обратная корреляция, значения которой вблизи моментов сильных землетрясений так же превосходят величину ККФ ( $\text{HCO}_3^- - \text{Es}_{\text{ar}}$ ) (рис. 7 а).

### Обсуждение результатов

Результаты анализа воздействия сейсмического режима на вариации макрокомпонентного состава подземных вод дренируемых скважиной ГК-1 показывают, что между анализируемыми параметрами существует статистически значимая корреляционная связь. Она выражается в изменении концентрации анионно-катионного состава воды скважины в периоды подготовки и реализации землетрясений. Характер связи для разных показателей макрокомпонентного состава оказывается различным. Так, изменение концентрации хлор-натриевой составляющей прямо пропорционально изменению авторегрессионной характеристики  $\text{Es}_{\text{ar}}$ , а изменение концентрации гидрокарбонат-иона – обратно пропорционально. Если перейти от анализа экстремумов ККФ к вариациям самих временных рядов, то можно сказать, что стадиям накопления условных деформаций соответствует снижение концентраций ионов хлора и натрия и увеличение концентрации гидрокарбонат-иона (рис. 6). Это свидетельствует о различных механизмах массопереноса этих ионов в системе пласт – скважина, а точнее в зону влияния скважины, при изменении напряжённо-деформированного состояния пород в период подготовки землетрясений. Механизмы контролирующие массоперенос вещества в подземной гидросфере при изменении напряжённо-деформированного состояния, для различных ионов могут оказаться различными. К примеру, в соответствии с часто используемой в геофильтрационной схематизации моделью гетерогенной среды с двойной пористостью, увеличение эффективного напряжения в минеральном скелете породы должно приводить к увеличению концентрации растворённых в воде веществ. Это происходит за счёт притока более концентрированных вод из слабопроницаемых и застойных зон массива (пористых блоков) в трещинное пространство [9]. На основе такой модели можно объяснить изменение концентрации гидрокарбонат-иона, которая на стадии накопления условных деформаций увеличивается. Вариации глубинной, хлор-натриевой составляющей, очевидно, не укладываются в рамки вышеописанной модели и предполагают иной механизм массопереноса. Одним из возможных вариантов такого механизма может являться ухудшение проницаемости трещинного пространства, по которому происходит восходящая фильтрация глубинных, более минерализованных вод в зону влияния скважины в результате роста эффективных напряжений. Такая гидро-геохимическая модель может быть характерна для вод трещинно-жильной циркуляции и вод зон глубинных разломов. Как уже отмечалось выше, скважина ГК-1 заложена в зоне глубинного Петропавловского разлома поэтому, на качественном уровне, такая модель изменения хлор-натриевой составляющей для этой скважины вполне применима. В реальных условиях, по всей видимости, имеют место обе эти модели. Первая из них основывается, в большей степени, на ёмкостных свойствах пород и характерна для верхних частей разреза, где геостатическое давление относительно невелико и допускает существование проницаемых пор и пластовой трещиноватости. Во второй модели преобладающими являются фильтрационные свойства пород, где основными путями водообмена служат вертикальные или субвертикальные трещины зон тектонических нарушений.

## Выводы

1. В интервале 1985 – 2004 гг., средствами кросскорреляционного анализа установлено существование статистически значимой связи между вариациями макрокомпонентного состава воды скважины ГК-1 и сейсмическим режимом полуострова Камчатка, причём характер связи, для разных показателей химического состава оказывается различным.

2. Показано, что теснота корреляционной связи не постоянна во времени и может увеличиваться в периоды подготовки и реализации сильных землетрясений.

3. На качественном уровне рассмотрены вероятные модели изменения концентраций растворённых в воде веществ при изменении напряжённо-деформационного состояния среды в периоды подготовки землетрясений.

## Список литературы

1. Барсуков В. Л., Беляев А. А., Бакалдин Ю. А., Игумнов В. А., Ибрагимова Т. Л., Серебренников В. С., Султанходжаев А. Н. Геохимические методы прогноза землетрясений М.: Наука, 1992, 213 с.
2. Барсуков В. Л., Серебренников В. С., Варшал Г. М., Гаранин А. В. Геохимические методы прогноза землетрясений // Геохимия. 1979. №3, с. 323 – 338.
3. Бендат Дж., Пирсол А. Прикладной анализ случайных данных М.: Мир, 1989, с. 540.
4. Варшал Г. М., Замокина Н. С., Тимакова Е. П., Бакалдина Н. А., Джеглова Н. Л., Зингер Е. Е. Галогенид- и сульфид-ионы как предвестники землетрясений и их определение с помощью ионно-селективных электродов // Гидрогеохим. предвестники землетрясений М.: Наука. 1985, с. 197 – 210.
5. Джекинс Г., Ваттс Д. Спектральный анализ и его приложения М.: Мир, 1972, выпуск 2, с. 287.
6. Игумнов В. А., Халатян Э. С. Геохимические исследования с целью прогноза землетрясений на территории Армянской ССР // Геохимия. 1979. №3, с. 365 - 371.
7. Итоги науки и техники. Серия Физика Земли. 1980. Т6, С. 182
8. Калмурзаев К. Е., Абдуллаев А. У., Касымова Ц. М. О гидрогеохимических эффектах в термальных водах Киргизии в периоды проявлений сейсмической активности // Гидрогеохимические предвестники землетрясений. М.: Наука. 1985, с. 228-237.
9. Киссин И. Г., Стклянин Ю. И. О формировании гидрогеохимических предвестников землетрясений // Гидрогеохимические предвестники землетрясений М.: Наука, 1985, с. 23-30.
10. Копылова Г. Н. Анализ влияния сейсмичности на режим Пиначевских термопроявлений на Камчатке (по результатам наблюдений 1979 – 1988 гг.) // Вулканология и сейсмология. 1992. №2, с. 3 – 19.
11. Копылова Г. Н., Сугробов В. М., Хаткевич Ю. М. Особенности изменения режима источников и гидрогеологических скважин Петропавловского полигона (Камчатка) под влиянием землетрясений // Вулканология и сейсмология. 1994. №2, с. 53 – 70.
12. Лущик А. В., Швырко Н. И., Можжерина А. В., Петренко С. Л., Бесфамильная Т. В., Рыбина Л. В., Бурак В. М., Родкин В. И. О выделении отдельных периодов вариаций гидрогеологических параметров как предвестников активизации сейсмичности на основании анализа их в период, предшествующий июльскому землетрясению 1984 г. в Крыму // Сейсмопрогностические исследования территории УССР. Киев. Наукова думка. 1988. с. 42-50.
13. Любушин А. А. (мл.). Многомерный анализ временных рядов систем геофизического мониторинга // Физика Земли. 1993. №3, с. 103 – 108.

14. Мархинин Е. К. Зависимость химического состава термальных вод от сейсмической активности // Бюллетень вулканологических станций. 1976. № 52, С. 34-41.
15. Михайлова В. Н., Оспанов А. Б., Сергеев О. В. Сейсмические и гидрогоеохимические предвестники землетрясения 31 декабря 1982 года на Северном Тянь-Шане // Землетрясения Средней Азии и Казахстана 1982. Душанбе. 1984. с. 173-184.
16. Осица Д. Г., Мегаев А. Б., и др. Гидрогоеохимические аномалии предшествующие тектоническим землетрясениям, - отражение условий формирования их очаговых зон // ДАН. 1977. Т 233, №1, С. 74-78.
17. Хаткевич Ю. М. О возможности среднесрочного прогноза землетрясений интенсивностью свыше пяти баллов, проявляющихся в г. Петропавловске – Камчатском // Вулканология и сейсмология. 1994. №1, с. 63 – 67.
18. Хаткевич Ю. М., Гриц Г. Н., Васькин В. С. Гидрогоеохимические вариации в режиме термальных источников и скважин Камчатского геодинамического полигона в связи с землетрясением 6 октября 1987 года // Развитие сейсмологических исследований в Сибири и на Дальнем Востоке: Тез. докл. Иркутск. 1988. с. 72 – 73.
19. Хаткевич Ю. М., Рябинин Г. В., Гидродинамические и гидрогазохимические вариации параметров режима подземных вод в периоды подготовки и реализации Кроноцкого землетрясения 05.12.97 г // Кроноцкое землетрясение на Камчатке 5 декабря 1997 г. Предвестники, особенности, последствия: Тез. докл. Петропавловск – Камчатский. 1998. С. 134 – 147.