

УДК 556.33:550.348

АЛГОРИТМ И ТЕХНОЛОГИИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ “GEOCHEMISTRY”
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИХ ЭФФЕКТОВ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ

С.А. Имашев, Дж.Ж. Кендирбаева, Л.Г. Свердлик

Предложены алгоритм и технологии совместной обработки геохимических и динамических параметров проб воды в скважинах и сейсмических данных. Результаты анализа экспериментальных данных в период с января 2015 по май 2017 г. позволили выявить аномалии в высокочастотных вариациях параметров, которые могут служить индикатором подготовки землетрясений энергетического класса $K \geq 10$.

Ключевые слова: алгоритм; программное обеспечение; геохимические и динамические параметры проб воды; землетрясения; аномалии.

ALGORITHM AND TECHNOLOGIES OF “GEOCHEMISTRY” SOFTWARE
FOR DETECTION OF HYDROGEOCHEMICAL EFFECTS OF EARTHQUAKES

S.A. Imashev, J.J. Kendirbaeva, L.G. Sverdlik

The paper proposes an algorithm and technologies for joint processing seismic data and geochemical and dynamic parameters of groundwater samples in wells. Results of analysis using experimental data during the period from January 2015 to May 2017 showed possibility to detect anomalies in high-frequency variations of parameters that can serve as an indicator of preparation of earthquakes with energy class of $K \geq 10$.

Keywords: algorithm; software; geochemical and dynamic parameters of water samples; earthquakes, anomalies.

Введение. Известно, что в основе прогнозных оценок сейсмической опасности лежит представление о динамическом режиме конкретного участка земной коры. И в этом плане широко востребованы результаты исследований параметров подземных вод, поведение которых позволяет улавливать аномалии гидродинамических процессов, приводящих к нарушению равновесия самой среды [1]. Под сейсмогидрогеологическим мониторингом понимают наблюдения за режимом физико-химических показателей подземных вод, которые, находясь в неустойчивом равновесии с геолого-тектоническими условиями, обладают в пространственно-временном выражении как и сейсмические волны определенной совокупностью концентрационных значений для фиксации в режиме реального времени. Например, изучая аномальные появления гидроаномалий в зависимости от накопления напряжения в земной коре, на примерах сейсмоактивных территорий России была доказана не только сходимость между режимом подземных вод и проявлениями сейсмичности с $M \geq 6$, но и реальность прогноза сильных землетрясений. Сведения о гидрогеологических параметрах в ре-

шении задач прогноза землетрясений приводятся во многих работах, в которых выявлены функциональные связи, доступные не только визуальному определению, но и скрытые закономерности, осложненные другими факторами [1–3]. При этом, несмотря на то, что часто максимальные амплитуды эффектов совпадают с периодами активизации сейсмичности, однозначные связи с эпицентральным расстоянием не выявлены, даже когда эпицентры расположены в районах действующих пунктов мониторинга. Вследствие этого появляется острая необходимость совершенствования методики обработки и интерпретации временных рядов гидрогеологических параметров.

Исходные данные и методика исследований. К настоящему времени в Кыргызстане накоплено достаточное количество данных химических и динамических наблюдений в подземных водах, длительность временных рядов которых составляет более 40 лет, охватывая около 10 сильных землетрясений [4]. Мониторинговые наблюдения проводятся на восьми участках, из которых “Джеты-Огуз”, “Сопу-Курган” и “Аламедин” расположены в горных массивах, а “Кара-Ой” и “Каракол”,

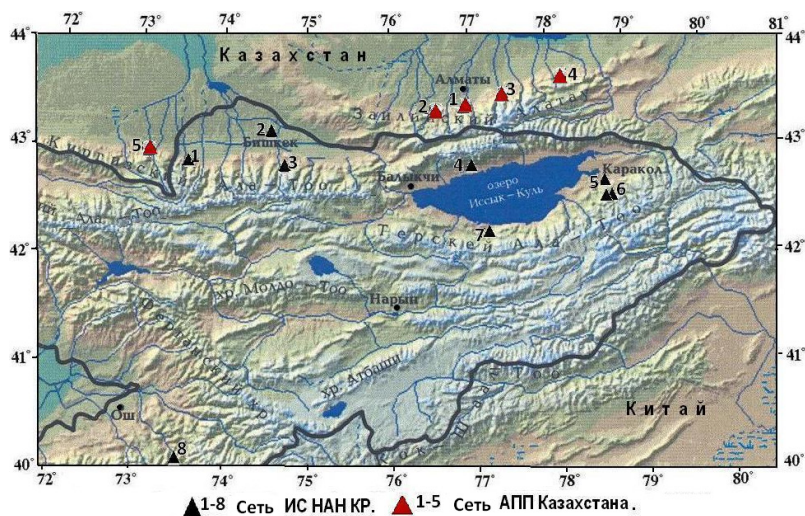


Рисунок 1 – Сейсмогидрогеологический мониторинг Кыргызстана и Казахстана.
 Сеть ИС НАН КР: 1 – Эркин-Сай; 2 – Бишкек; 3 – Аламедин-Иссык-Ата; 4 – Кара-Ой; 5 – Каракол;
 6 – Джети-Огуз; 7 – Каджи-Сай; 8 – Сопу-Коргон.
 Сеть Казахстана: 1 – Алма-Арасан; 2 – Нижняя-Каменка; 3 – Тау-Тургень; 4 – Курам; 5 – Мерке

“Эркин-Сай”, “Бишкек” и “Каджи-Сай” – в равнинной части (рисунок 1, таблица 1). Каждый пункт выбран с учетом особенностей морфотектоники структур.

Измерения проводятся дискретно один раз в сутки, а их реакции на процессы подготовки и реализации землетрясений установлены по многочисленным вариационным кривым, где аномалии, образующиеся за счет смешения вод различных горизонтов и внедрения мантийных флюидов [1], различаются по формам, контрастности и длительности [4]. На основе первичной информации, поступающей от пунктов наблюдений, создаются временные ряды, которые после занесения в банк данных оперативно преобразуются во временные графики, по динамике которых проводится предварительное сопоставление с развитием сейсмической обстановки.

Дальнейшее обсуждение алгоритма обработки и анализа временных рядов параметров подземных вод Кыргызстана, нацеленного на прогноз землетрясений энергетического класса $K \geq 10$, проведены на примере данных пункта мониторинга Джети-Огуз, характеристики и измеряемые параметры которого приведены в таблице 1.

Вследствие нестационарной и нелинейной природы факторов, влияющих на изменение уровня содержания измеряемых геохимических параметров, классические методики, основанные на анализе стационарных неоднородностей (Фурье-анализ), а также линейных корреляций не могут

Таблица 1 – Характеристики и измеряемые параметры на пункте сейсмогидрогеологического мониторинга Джети-Огуз

Номер скважины (глубина, м)	Геохимические параметры	Динамические параметры
Скв. 6-к (163)	$T^{\circ}C$, pH, CO_2 , HCO_3^- , Cl ⁻ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	$T^{\circ}C$, дебит
Скв. 20 (520)	$T^{\circ}C$, pH, CO_2 , HCO_3^- , Cl ⁻ , Ca^{2+} , Mg^{2+}	$T^{\circ}C$, дебит

дать полной информации об аномальных вариациях, имеющих связь с процессами подготовки землетрясений.

Поэтому в настоящей работе приводится алгоритм и технологии программного обеспечения “GeoChemistry”, позволяющие исключить нестационарные крупномасштабные (низкочастотные) компоненты временных рядов геохимических и динамических параметров, связанные с сезонностью и синоптическими процессами, и проанализировать высокочастотные аномалии, обусловленные процессами подготовки землетрясений. После удаления низкочастотного тренда остается высокочастотная составляющая, обычно имеющая вид шума. Этот шумоподобный сигнал характеризуется, как правило, малой амплитудой и состоит из двух главных составляющих: первая – случайные флуктуации, вторая – всплески

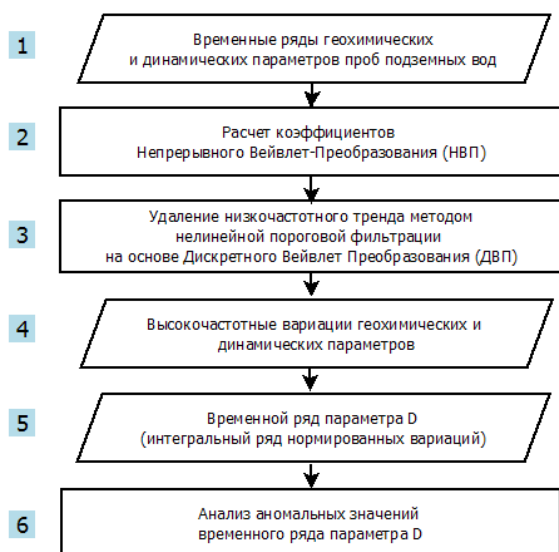


Рисунок 2 – Блок-схема алгоритма выявления аномалий в вариациях временных рядов параметров подземных вод (слева – номера этапов)

(аномалии), связанные с процессами подготовки землетрясений. Так как аномалии должны отчетливо выделяться во временных рядах различных геохимических параметров и коррелировать между собой при подготовке землетрясений энергетического класса $K \geq 10$, было решено объединить

их с помощью синтетического параметра D , который учитывает суммарный эффект этих аномалий. С использованием пороговой фильтрации во временном ряду параметра D выделялись только уровни в пределах доверительного коридора двойного среднеквадратичного отклонения ($\pm 2\delta$), которые отражают связь геохимических и динамических параметров термоминеральных вод (ТМВ) в скважинах с процессами подготовки землетрясений. Все этапы алгоритма выявления аномалий в вариациях геохимических и динамических параметров приведены в виде блок-схемы на рисунке 2.

При реализации указанного алгоритма использовались различные технологии: подготовка и предварительная обработка временных рядов (этап 1), а расчет коэффициентов непрерывного вейвлет-преобразования (НПВ) производили в вычислительной среде *Matlab* с использованием пакета *Wavelet Toolbox*. Следующие далее этапы выполнялись с помощью компьютерных программ, написанных на языке *Python*. В частности, удаление низкочастотного тренда методом нелинейной пороговой фильтрации на основе дискретного вейвлет-преобразования с использованием модуля *PyWavelets*, построение временных рядов высокочастотных вариаций геохимических и динамических параметров и расчет аномальных значений интегрального параметра D на основе модулей *matplotlib*, *numpy* в интерактивной среде *IPython (Jupyter Notebook)*.

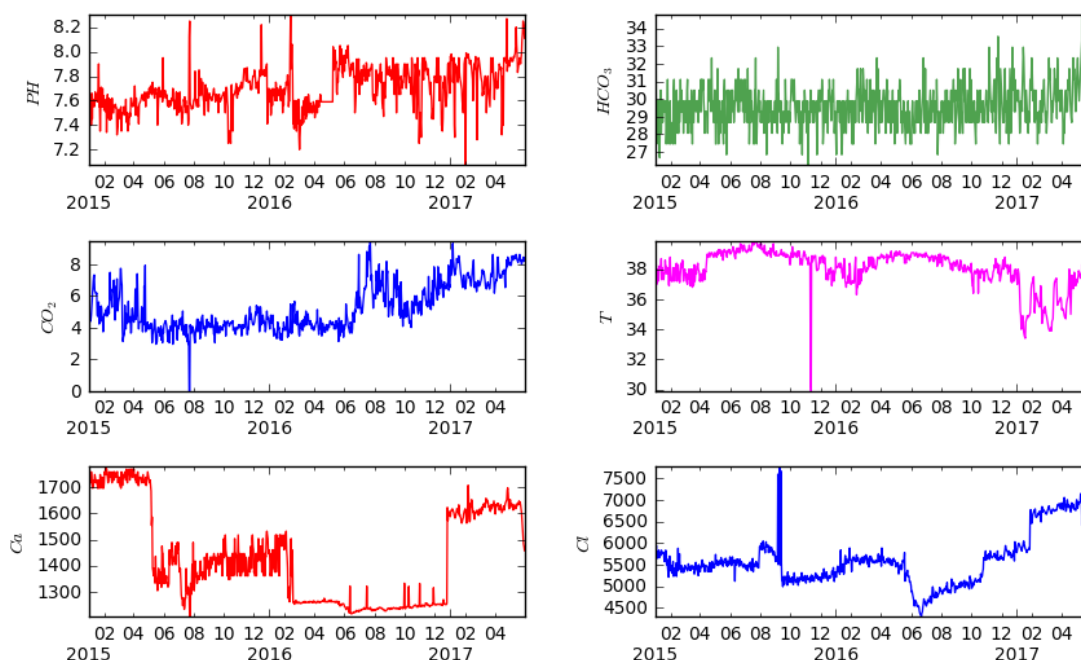


Рисунок 3 – Вариации временных рядов показателей ТМВ скв. 6 Джети-Огуз

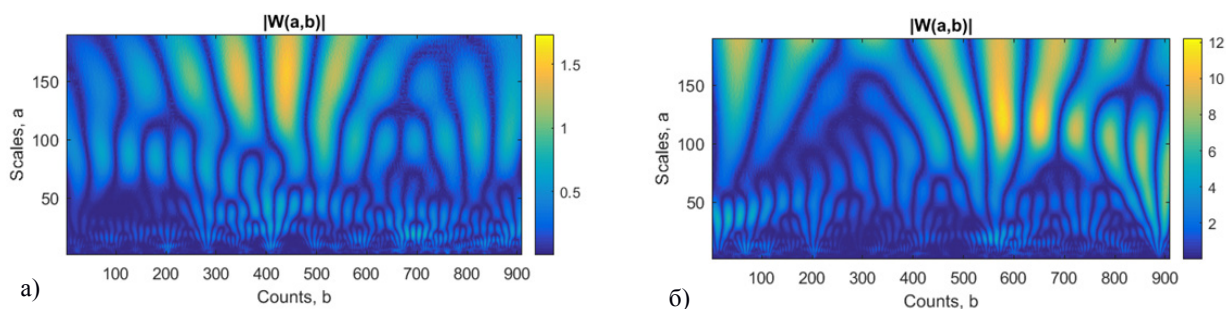


Рисунок 4 – Коэффициенты НПВ (вейвлет Морле) параметров ТМВ “Джеты-Огуз”:
 а) PH, б) CO₂. По оси абсцисс отложен сдвиг по времени
 (номер дня для 01-01-2015 по 31-05-2017), по оси ординат – масштабный коэффициент

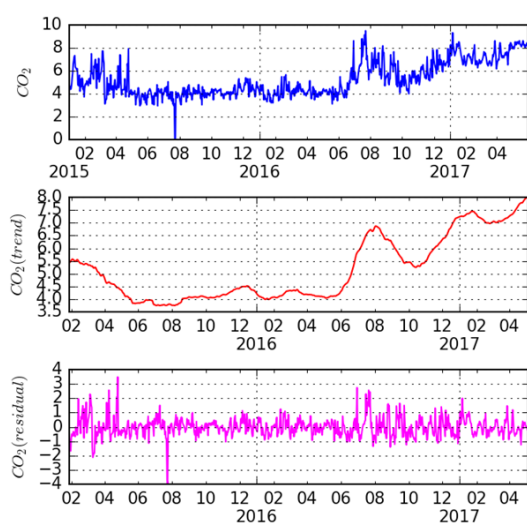


Рисунок 5 – Исходный временной ряд содержания CO₂ в пробах воды, низкочастотный тренд и вариации после устранения тренда и периодических (сезонных) составляющих

Результаты применения методики к временным рядам геохимических и геодинамических параметров подземных вод. На рисунке 3 приведены временные ряды показателей ТМВ (PH, T и содержания CO₂, HCO₃, Ca, Cl, Mg), полученные в скважине № 6 Джеты-Огуз. Для корректной оценки вклада стационарных и нестационарных составляющих временных рядов геохимических и динамических параметров использовали современные методы спектрального анализа на основе аппарата непрерывного вейвлет-преобразования (этап 2). Этот метод хорошо зарекомендовал себя при исследовании геофизических временных рядов в части выявления скрытых периодичностей, оценке фрактальных свойств [5] и анализа частотных составляющих. Поскольку частотные компоненты

реальных физических величин имеют зачастую нестационарную природу и классическими методами спектрального анализа, например, Фурье-преобразованием выявлять и анализировать их в полной мере невозможно, анализ временных изменений амплитудно-частотных характеристик сигнала с помощью вейвлетов существенно повышает результативность [6, 7].

На рисунке 4 представлены абсолютные значения коэффициентов НПВ временных рядов геохимических и динамических параметров ТМВ “Джеты-Огуз”. В качестве анализирующего вейвлета выбран вейвлет Морле, который оптимально подходит для выявления как низкочастотных, так и высокочастотных компонент сигнала, а также вносит минимальный краевой эффект [6, 7]. Данные вейвлетограммы позволяют выделить скрытые периодичности, в частности проявляются квазистационарные компоненты с периодами в 180–200, 120–150 и 70–80 дней, которые необходимо устранить наряду с низкочастотным трендом. Для этого был применен метод нелинейной пороговой фильтрации на основе дискретного вейвлет преобразования (ДВП) с вейвлетом Добеши 6-го порядка [6] и универсальным порогом Донохо–Джонстона [8, 9] с “мягким” вычитанием значения порога (*soft thresholding*) (этап 3).

Такого рода методика устранения тренда и сезонной составляющей успешно применяется для анализа различных временных рядов геофизической природы [10, 11]. Для примера на рисунке 5 представлены выделенные компоненты временного ряда содержания CO₂ в пробах воды.

На рисунке 6 представлены вариации физико-химических характеристик после удаления тренда и стационарной периодической составляющей (этап 4).

Горизонтальными уровнями отмечено среднее значение (равное 0), среднеквадратичное

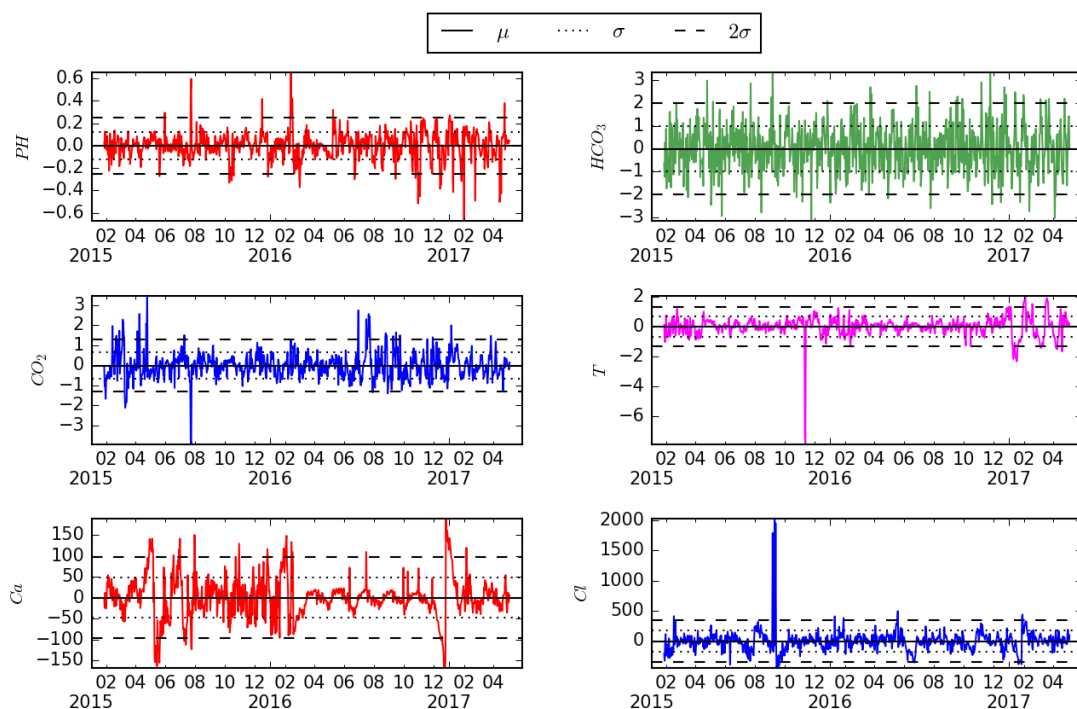


Рисунок 6 – Вариации физико-химических параметров проб воды после устранения тренда и периодических составляющих (сплошная линия – среднее значение, пунктирная – СКО и штриховая – 2σ)

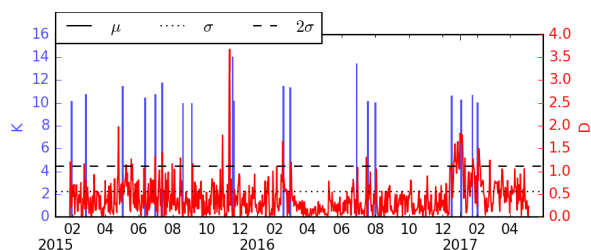


Рисунок 7 – Интегральный временной ряд вариаций физико-химических параметров проб воды после устранения тренда и периодических составляющих (сплошная линия – среднее значение μ , пунктирная – σ (СКО) и штриховая – 2σ) и энергетический класс К ближайших (по времени) землетрясений по каталогу ИС НАН КР

отклонение (СКО) и уровень 2σ . Вариации параметров, превышающие 2σ , можно считать аномальными и анализировать на предмет связи с сейсмической активностью. Подобный подход использован при анализе временной динамики аномалий температуры атмосферы над эпицентрами землетрясений [11–13].

Принимая во внимание аномальное отклонение от средних значений для всех параметров (PH,

T и содержания CO_2 , HCO_3 , Ca, Cl, Mg), произведено объединение их в общий временной ряд (D) (этап 5), который рассчитывается как сумма отдельных временных рядов нормированных на свои максимальные значения (рисунок 7). На рисунке также приведена последовательность энергетических классов землетрясений К, ближайших по времени к моменту появления гидрогеохимических аномалий.

Сопоставление пространственного распределения эпицентров всех сейсмических событий, произошедших за рассматриваемый период (рисунок 8, а), с землетрясениями, выделенными на основе использования интегрированного эффекта аномалий физико-химических параметров ТМВ “Джетгы-Огуз” (рисунок 8, б), можно предположить, что имеет место влияние не только локальных, но и региональных событий.

При этом очевидна корреляция аномалий геохимических данных с сейсмическими событиями, эпицентры которых сгруппированы вдоль южной границы Кыргызстана, где простирается Гиссаро-Кокшаальская активная зона повышенных деформаций, западная часть которой (Дарваз-Каракульская) протянулась вдоль границы сочленения Памира с Тянь-Шанем [14]. Таким образом, динамика

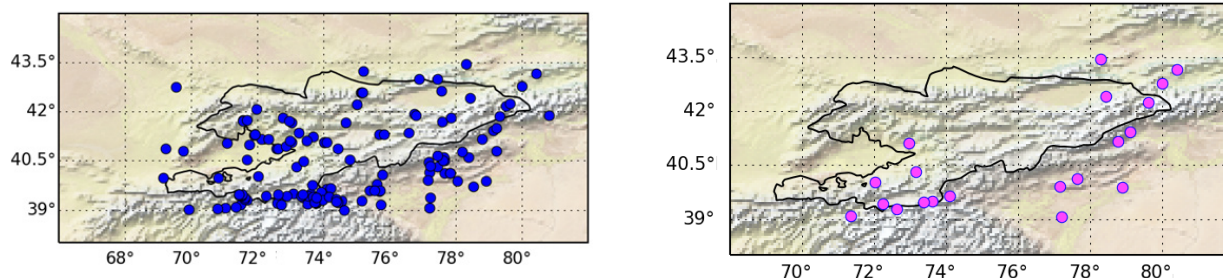


Рисунок 8 – Сейсмическая активность в период с 01-01-2015 по 31-05-2017 по данным каталога ИС НАН КР.

Распределение эпицентров: а – всех землетрясений за рассматриваемый период; б – землетрясений, ближайших по времени после момента появления аномалий физико-химических параметров проб воды (D)

изменчивости физико-химических параметров ТМВ находится, вероятно, в сильной зависимости от особенностей сложного геологического и деформационного полей в регионе.

Заключение. Приведенные результаты анализа геохимических и динамических параметров проб воды в скважинах и сейсмических данных в период с января 2015 по май 2017 г. показали, что использование предложенного алгоритма и технологий обработки позволяют выявить аномалии в высокочастотных вариациях, которые могут служить индикатором подготовки землетрясений энергетического класса $K \geq 10$.

Литература

1. Кендирбаева Д.Ж. Об основных процессах к интерпретации гидрогеохимических изменений в целях прогноза землетрясений: анализ и синтез практики и знаний / Д.Ж. Кендирбаева // Вестник Института сейсмологии НАН КР. 2014. № 2 (4). С. 51–60.
2. Рябинин Г.В. Гидрогеохимические эффекты, предшествующие сильным землетрясениям Камчатки. Алгоритм идентификации и морфологический анализ / Г.В. Рябинин, Ю.М. Хаткевич // Вестник Краунц. Науки о земле. 2009. № 13. С. 107–122.
3. Семенов Р.М. Сильное землетрясение на Байкале 27 августа 2008 г. и его предвестники / Р.М. Семенов, О.П. Смекалин // Геология и геофизика. 2011. Т. 52. № 4. С. 521–528.
4. Кендирбаева Д.Ж. Основные показатели сейсмогидрогеологического мониторинга в северном Тянь-Шане: задачи и проблемы / Д.Ж. Кендирбаева, В.В. Гребенникова // Вестник Ин-та сейсмологии НАН КР. 2014. № 1(3). С. 57–69.
5. Любушин А.А. Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 227 с.
6. Mallat S.G. A wavelet tour of signal processing: The sparse way. 3rd ed. Amsterdam, Boston: Elsevier // Academic Press. 2009. 805 p.
7. Gadre V.M. Wavelets and fractals in earth system sciences / V.M. Gadre, V.M. Dimri, E. Chandrasekhar // Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 2014. 286 p.
8. Donoho D.L. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage / D.L. Donoho, J.M. Johnstone // Biometrika. 1994. Vol. 81. N3. P. 425–455.
9. Donoho D.L. De-noising by soft-thresholding / D.L. Donoho // IEEE Trans. Inform. Theory. 1995. Vol. 41. № 3. P. 613–627.
10. Сычев В.Н. Оценка параметра Херста сейсмического сигнала / В.Н. Сычев, С.А. Имашев // Гео-системы переходных зон. 2017. № 2. С. 50–61.
11. Свердлик Л.Г. Методика диагностирования аномалий температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Вестник КРСУ. 2016. Т. 16. № 5. С. 170–174.
12. Свердлик Л.Г. Аномалии температуры атмосферы в периоды сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Журнал Сибирского федер. ун-та. Серия: Техника и технологии. 2017. Т. 10. № 6. С. 783–793.
13. Свердлик Л.Г. Изменение температурного режима атмосферы под влиянием сейсмической активности / Л.Г. Свердлик, С.А. Имашев // Наука, новые технологии и инновации. 2015. № 4. С. 9–14.
14. Кальметьева З.А. Атлас землетрясений Кыргызстана / З.А. Кальметьева А.В. Миколайчук, Б.Д. Молдобеков, А.В. Мелешко, М.М. Жантаев, А.В. Зубович // Бишкек. ЦАИИЗ. 2009. 73 с.