

УДК 550.343; 550.344.37; 550.8.05

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ
ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫМ ГЕОФИЗИЧЕСКИМ КОМПЛЕКСОМ
УКРАИНСКОЙ АНТАРКТИЧЕСКОЙ СТАНЦИИ АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ**

Лящук А.И.¹, Павлович В.Н.²

¹ *Главный центр специального контроля НКАУ, Макаров-1 alex@gcsc.gov.ua*

² *Институт ядерных исследований НАНУ, Киев*

Реферат. В статье представлены результаты проводимых работ по комплексной обработке геофизической информации с целью мониторинга опасных геофизических явлений в регионе УАС Академик Вернадский. Предложены методы анализа, комплексное применение которых позволяет выделять аномальные сигналы. Проведен анализ возможного механизма формирования выявленных предвестников землетрясений. Возможно, что они отражают реакцию измеряемых параметров на прохождение тектонических волн, возникающих при подготовке сильных землетрясений, удаленных от регистрирующих приборов на большие расстояния.

Ключевые слова: землетрясения, предвестники, геофизические поля, комплексная обработка, тектонические волны.

Реферат. У статті представлено результати робіт з комплексної обробки геофізичної інформації з метою моніторингу небезпечних геофізичних явищ у регіоні УАС Академік Вернадський. Запропоновано методи аналізу, комплексне застосування яких дозволяє виділяти аномальні сигнали перед сильними землетрусами. Проведено аналіз можливого механізму формування виявлених провісників землетрусів. Можливо, що вони відображають реакцію вимірюваних параметрів на проходження тектонічних хвиль, які виникають під час підготовки сильних землетрусів, віддалених на великі відстані від реєструючих приладів.

Ключові слова: землетруси, провісники, геофізичні поля, комплексна обробка, тектонічні хвилі.

Abstract. The results of the conducted works on complex processing of geophysical information are presented in the article. A purpose of processing is revealing of the dangerous geophysical phenomena in the Antarctic peninsula region. The analysis of possible mechanism of forming of earthquake precursors is performed. It is possible that the cause of anomalous signals is a tectonic waves appearing due to preparation of strong earthquakes at the distant centers.

Key words: processing, earthquake, precursors, geophysical field, tectonic waves.

Введение

Согласно Государственной программе исследований в Антарктике на 2000–2010 гг., ГЦСК совместно с НАНЦ проводятся работы по комплексному исследованию геофизических полей касательно возможности мониторинга опасных геофизических явлений в регионе Антарктического полуострова [1–3]. Особое внимание отводится проблеме землетрясений как наиболее разрушительных и высокоэнергетичных явлений.

Основной регион исследований – сейсмически опасная зона Южно-Антийской дуги, опоясывающая море Скоша и пролив Дрейка. Включает в себя острова Южная Георгия и Южные Сандвичевы, Южные Шетландские, Южные Оркнейские острова. Средняя удаленность происходящих землетрясений от станции составляет 1500–2000 км. Самое сильное землетрясение 2003 года ($M = 7,3$) вызвало волну цунами, которая благодаря наличию ледового покрова в регионе не превысила амплитуды 30 см. Волны от цунами наблюдались и от других сильных землетрясений в мире (Суматра, 2004 и Чили, 2010), а также от менее мощных землетрясений Сандвичевых островов. Наиболее близкие от станции землетрясения за время инструментальных наблюдений зарегистрированы на удалении 200 км ($M = 5,4$, что соответствует интенсивности 3-4 балла по шкале MSK).

Для изучения сейсмичности региона и исследования возможности регистрации потенциальных предвестников землетрясений на станции в дополнение к имеющемуся сейсмическому комплексу установлен радиометр радона РРА-03М, измеряющий концентрацию радона в приповерхностном слое грунта. Использовались также геомагнитные, инфразвуковые, метеорологические данные, полученные на станции. Параллельные синхронные измерения проводились в Украине, мониторинг велся за наиболее опасным для Украины регионом Вранча. [4]. Мы, анализируя поступающие с пунктов наблюдения данные и опираясь на проводимые в мире работы [5, 6], предложили качественную модель возникновения и развития предвестников в процессе подготовки землетрясения [7, 8]. Согласно модели, мониторинг необходимо проводить во всех геосферах, для чего как нельзя лучше подходит станция Академик Вернадский с имеющимся на ней аппаратным геофизическим комплексом. Вместе с тем наличие аппаратных средств есть только одним из условий успешного проведения мониторинга. Не менее важной является и алгоритмическая часть, которая должна связать поступающие данные воедино. Наличие нескольких методов анализа геофизической информации должно увеличить надежность выделения предполагаемых предвестниковых сигналов поступающих данных.

Мониторинг и обработка регистрируемых данных

Для аппаратного геофизического комплекса станции обработка и анализ данных имеют ряд особенностей, связанных с входными данными. Это отличие в физическом смысле наблюдаемых параметров, в их масштабах и единицах измерений, отличие в дискретности измерений, наличие в измерениях трендов и периодичностей, наличие препятствий и аппаратных сбоев в измерениях, частичные пропуски в данных.

Первоочередная задача проводимой обработки заключается в выявлении полезных (аномальных) сигналов, что значительно усложнено наличием шумов, на фоне которых осуществляется их распознавание. Поэтому проблема увеличения отношения сигнал/шум для наблюдений – одна из основных при выявлении предвестниковых эффектов.

Нами для проведения обработки выбраны несколько методов, призванных выделить потенциальный сигнал из шума либо преобразовать входную последовательность к такому виду, когда возможно выделение аномалий.

Для оценки спектра мощности данных использована параметрическая авторегрессионная оценка [9], рекомендованная Любушиным [10] как более стойкая, с отсутствующими циклическими эффектами, свойственными традиционным Фурье-преобразованиями. Моделью авторегрессии порядка $p \geq 0$ ($AR(p)$ -модель) для временного ряда $x(t)$ есть уравнение:

$$x(t) = \sum_{k=1}^p a_k x(t-k) = \varepsilon(t) + d \quad (1)$$

А.И. Лящук. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ МОНИТОРИНГА ОПАСНЫХ ГЕОФИЗИЧЕСКИХ ЯВЛЕНИЙ ПРОГРАММНО...

где a_k – коэффициенты авторегрессии (параметры модели), d – параметр статичного сдвига, $\varepsilon(t)$ – белый шум с нулевым средним и дисперсией σ^2 .

После определения значений параметров модели (2) они могут быть использованы для построения параметрической оценки спектра мощности временного ряда:

$$S_{xx}(\omega) = \frac{\sigma^2}{2\pi \left| 1 + \sum_{k=1}^p a_k e^{-i\omega k} \right|^2} \quad (2)$$

где ω – частота ($0 < \omega < \pi$).

Если число отсчетов N временного ряда достаточно большое и его спектральные свойства медленно меняются со временем, то можно рассмотреть задание оценки эволюции спектра мощности в скользящем временном окне некоторой длины $L < N$ с взаимным смещением ΔL значений. Тогда (3) запишется в виде, который подчеркивает зависимость от положения и длины окна: $S_{xx} = S_{xx}(\omega, \tau|L)$, где τ – временная координата правого конца текущего окна.

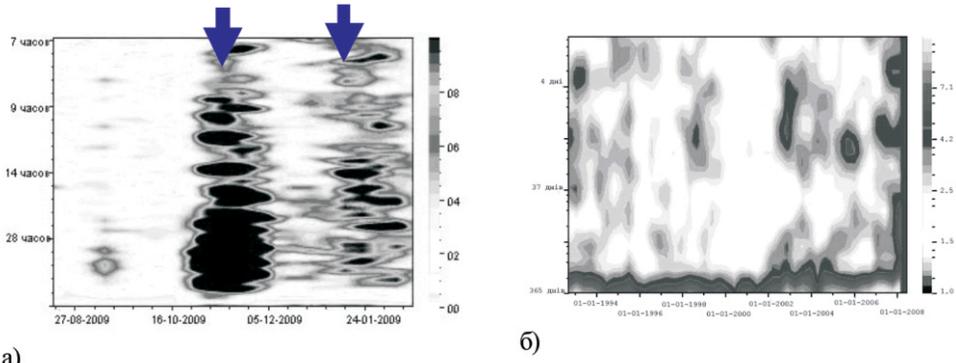


Рисунок 1. Эволюция спектра мощности в скользящем временном окне: а) концентрации радона (стрелками отмечены землетрясения с $M \geq 6$ в радиусе 800 км от станции, темным цветом выделены моменты превышения концентрации радона во время землетрясения); б) распределение числа землетрясений с $M \geq 6$ в регионе моря Скоша за период 1992–2008 гг. (белым выделена зона сейсмического затишья).

На рисунке 1 представлены примеры применения метода для анализируемых данных. Пики либо провалы удается хорошо выделить для временных рядов с большими перепадами амплитуд и частот, а также для рядов с большой длительностью полезного сигнала. Из рис. 1а непонятно, действительно ли началось повышение концентрации радона до землетрясения или это проблемы разрешающей способности метода на низких частотах. Неоднозначная картина будет наблюдаться и для меньших перепадов и коротких сигналов.

С целью выделения короткоживущих гармонических всплесков, которые часто плохо различимы в спектральном анализе, нами использованы вейвлет-диаграммы [11].

Если $\psi(t)$ – некоторая функция, которая быстро убывает и удовлетворяет условию допустимости: $\int_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) dt = 0$ и условию нормирования: $\int_{-\infty}^{+\infty} |\psi(t)|^2 dt = 1$, то непрерывным вейвлет-преобразованием сигнала $x(S)$ есть величина $W_x(t, a)$, зависящая от двух параметров (t, a) , $a > 0$:

$$W_x(t, a) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} x(S) \psi\left(\frac{S-t}{a}\right) ds = \sqrt{a} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t + av) \psi(v) dv \quad (3)$$

Здесь t – момент времени, $a > 0$ – параметры масштаба, часто называемые более привычным термином "период". Величина (3) отображает поведение исследуемого сигнала в области точки t с характерным масштабом вариаций a . Для сигнала с дискретным временем вычисления величин (3) может быть эффективно реализовано с помощью быстрого преобразования Фурье. Нашей непосредственной целью является построение 2-мерной и 3-мерной карты значений модуля величины (3): $|W_x(t, a)|$, которая дает наглядное представление о динамике возникновения, эволюции и исчезновения "характерных периодов" короткоживущих всплесков исследуемого сигнала. Естественно, что величина (3) сильно зависит от выбора функции $\psi(t)$. Выбор той или другой функции $\psi(t)$ определяется тем, какого вида короткоживущие сигналы мы хотим изучать.

Одной из наиболее популярных функций есть т.н. вейвлет Морле:

$$\psi(t) = \frac{1}{\pi^{1/4}} \exp\left(-\frac{t^2}{2} - it\right) \quad (4)$$

Этот вейвлет наилучшим образом приспособлен для выделения короткоживущих гармоничных всплесков (цугов) и владеет определенными свойствами оптимальности в поиске компромисса между частотным и временным разрешением.

Базисные функции оконного преобразования Фурье имеют одно и то же разрешение по времени и частоте для всех точек плоскости преобразования, в то время как базисные функции вейвлет-преобразования имеют уменьшающееся с масштабом разрешение по времени и увеличивающееся с масштабом разрешение по частоте. Это свойство дает преимущество, так как быстрые вариации сигналов хорошо локализованы, а для выявления медленно меняющихся характеристик достаточно хорошего низкочастотного разрешения. Вейвлет-преобразование, обладающее подвижным частотно-временным окном, одинаково хорошо влияет и на низкочастотные, и на высокочастотные характеристики сигналов.

Рис. 2 демонстрирует поведение диаграмм во времени при изменении действующих сил на горную породу в месте расположения датчиков. В [12] отмечается, что перед землетрясением в результате повышения напряженно-деформированного состояния породы в очаге резко увеличивается выход радона. В то же время трудно представить, что такое состояние может распространиться на тысячи километров от очага. Потому необходимо предположить наличие других факторов, влияющих на такое поведение радоновых эманацій, о которых будет сказано ниже. В отличие от землетрясений Вранча, показанных на рис. 2а, где источник не меняет расстояние до пункта наблюдения при практически одинаковых значениях магнитуды (и соответственно соизмеримых амплитудах видимых пиков), в регионе антарктической станции сильные землетрясения $M \geq 6$ произошли на расстояниях в 500 и 800 км, что повлияло на амплитуду пиков.

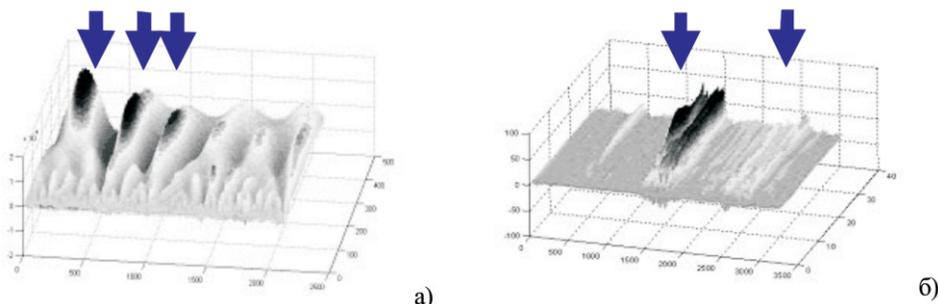


Рисунок 2. Карты значений модуля $|W_x(t, a)|$, для радоновых данных а) 2005 год – регион Вранча, наблюдаются пики перед каждым из землетрясений $M \geq 4$ (отмечены стрелками), б) 2010 год – данные концентрации радона на УАС Академик Вернадский (стрелками отмечены сильные землетрясения в регионе ($M \geq 6$) на расстоянии 550 км (левая стрелка) и 830 км).

При сравнении рис. 1а и 2б видно, что во втором случае гораздо точнее возможно определить время начала увеличения концентрации радона, определить, что процесс увеличения начался до, а не после землетрясения.

В качестве еще одного метода анализа применим фрактальный как один из перспективных по причине его способности исследовать сигналы, которые с точки зрения спектральной теории являются не более чем белым шумом [13]. Одним из преимуществ метода является также малая чувствительность к длине ряда, что позволяет применять его даже для коротких рядов.

Предполагается, что временной ряд на некоем интервале масштабов самоподобен и что, как следствие, процессы, идущие в настоящий момент, определялись предыдущими состояниями.

Используем способ, базирующийся на исследованиях Хёрста. В его основе лежит анализ размаха параметра (наибольшего и наименьшего значения на изучаемом отрезке) и среднеквадратичного отклонения.

Ряд $x(t)$ разделяется на набор неперекрывающихся отрезков длиной n . Для каждого разбиения считается функция $X(t, n)$:

$$X(t, n) = \sum_{k=1}^n [x(k) - \bar{x}] \quad (5)$$

где \bar{x} — среднее значение для каждого интервала. Далее рассчитывается размах R как разница между максимальным и минимальным значениями $X(t, n)$ для каждого разбиения:

$$R = \max_{1 \leq t \leq n} X(t, n) - \min_{1 \leq t \leq n} X(t, n) \quad (6)$$

Далее, полученный размах R делится на стандартное отклонение S для каждого разбиения, и полученный набор величин усредняется для всех разбиений. Получаем функцию R/S . Хёрст экспериментально показал, что для фрактальных рядов:

$$\frac{R}{S} = \left(\frac{\tau}{2} \right)^H \quad (7)$$

где H — показатель Хёрста.

Показатель Хёрста может быть преобразован во фрактальную размерность D с помощью следующей формулы:

$$D = 2 - H \quad (8)$$

Известно [13], что топологическая размерность кривой линии равна 1, а гладкой поверхности — 2. Таким образом, фрактальная размерность временного ряда, представляющего кривую, лежит между линией и плоскостью. Если $H=0.5$, то $D=1.5$, то обе величины характеризуют независимую случайную систему (случайные блуждания). Величина $0.5 < H \leq 1$ будет соответствовать фрактальной размерности, более близкой к линии, такой ряд дает более гладкую (персистентную, или трендоустойчивую) кривую. Соответственно $0 < H \leq 0.5$ дает более высокую фрактальную размерность и более прерывистую линию, чем случайное блуждание, и, следовательно, должно характеризовать систему, более подверженную переменам. Т.е. в зависимости от величины показателя H (следовательно, и фрактальной размерности D) систему можно представить как стабильную либо хаотическую.

В [14] указывается, что величина фрактальной размерности может служить индикатором количества факторов, влияющих на систему. Так, при размерности менее 1.4 можно говорить о

наличии нескольких сил,двигающих систему в одном направлении, если более 1.6, то фрактальная система становится неустойчивой и готова к переходу в новое состояние. По мере роста фрактальной размерности от 1 до 2 происходит изменение распределения сил, влияющих на полученные данные, – от однонаправленного действия до компенсирующего разнонаправленного и далее до неустойчивого, когда система готова перейти в новое состояние.

Стоит заметить, что речь идет о сложной системе. В нашем случае система есть очаг будущего землетрясения и не допускает непосредственного исследования своей структуры, которая достаточно сложна. Тем не менее для анализа доступны производимые системой сигналы, некоторые из которых мы рассмотрим далее.

Рассмотрим график изменения концентрации радона и соответствующее ему изменение показателя Хёрста. На рис. 3 представлены запись концентрации радона в период зимовки 2009-2010 гг. (интервал измерений 120 мин.) и график изменения показателя Хёрста, рассчитанный в скользящем временном окне длительностью 40 отсчетов (3 суток).

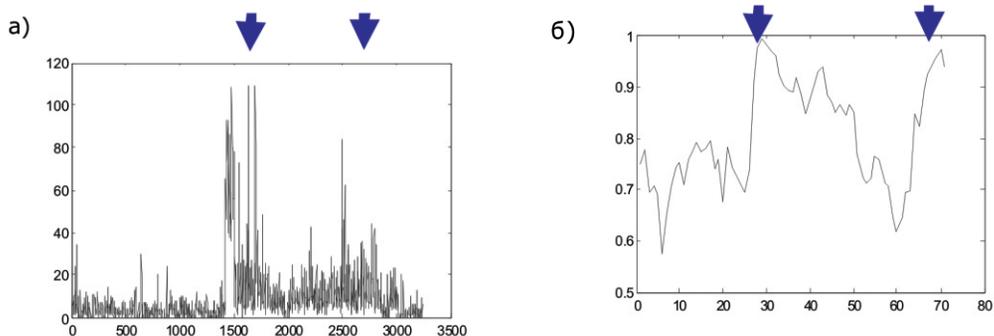


Рисунок 3. Изменение концентрации радона на УАС Академик Вернадский в течение 2009-2010 гг., интервал измерений 120 минут, а). Значение показателя Хёрста для радонового временного ряда, измеренного во временном окне 40 отсчетов (3 суток), б). Стрелками отмечены землетрясения в регионе с ($M \geq 6$).

Начальное среднее значение показателя Хёрста в левой части графика находится на уровне 0.72, что соответствует расчетным значениям самого Хёрста для большей части природных процессов, и может характеризовать систему как «невозбужденную». Т.е. система пребывает в стабильном состоянии, влияющие внешние факторы равносильны. Вторая часть графика характеризуется резкими увеличениями показателя Хёрста, что может быть связано с нарушением устоявшейся системы в связи с более выраженным и активным действием одной из сил (либо новой силой). В свете последних публикаций [15, 16] можно предположить влияние тектонической волны, генерируемой в очаге в результате роста напряженно-деформированного состояния породы, которое предвещает землетрясение, и следующие позже сейсмические волны самого землетрясения.

Рассмотрим другой случай – сейсмограмму с сейсмическим сигналом от мощного землетрясения в Чили (рис. 4). На рисунке показаны сейсмограмма (z-компонента) за 27.02.2010 с сигналом от землетрясения в Чили ($M=8.8$, $t_m = 06:34:17$ UTC) и графики изменения показателя Хёрста, рассчитанного в скользящем временном окне длительностью 400 отсчетов (10 секунд). Изменение показателя Хёрста происходит в более узком интервале, не превышающем значения 0,1. Картина схожа с предыдущей – наблюдается повышение показателя Хёрста в момент вступления сигнала (что, кстати, может быть использовано для автоматического обнаружения сигнала). Выделяется другая особенность: в момент наличия

одного только микросейсмического шума флюктуации показателя достаточно большие как по амплитуде, так и по частоте (что демонстрирует спектрограмма рис. 4г), и резко уменьшаются на время сейсмического сигнала (размерность «успокаивается», частота локализуется). На суточном графике видны еще несколько повышений показателя Хёрста, соответствующих сейсмическим сигналам. Как прежде, на это время амплитуда флюктуаций уменьшается. Соотношение сигнал/шум достигает 10 и более. Такое поведение может быть связано с разными источниками, участвующими в формировании итогового шума, влияющего на сейсмический датчик. В случае одного сильного источника сигнала естественно, что его влияние преобладает над шумом. Изменение фрактальной размерности может быть объяснено наличием шума во всей частотной области, что проявляется в более изрезанном сигнале. Сигнал же более гладок за счет больших амплитуд и меньшего количества частот.

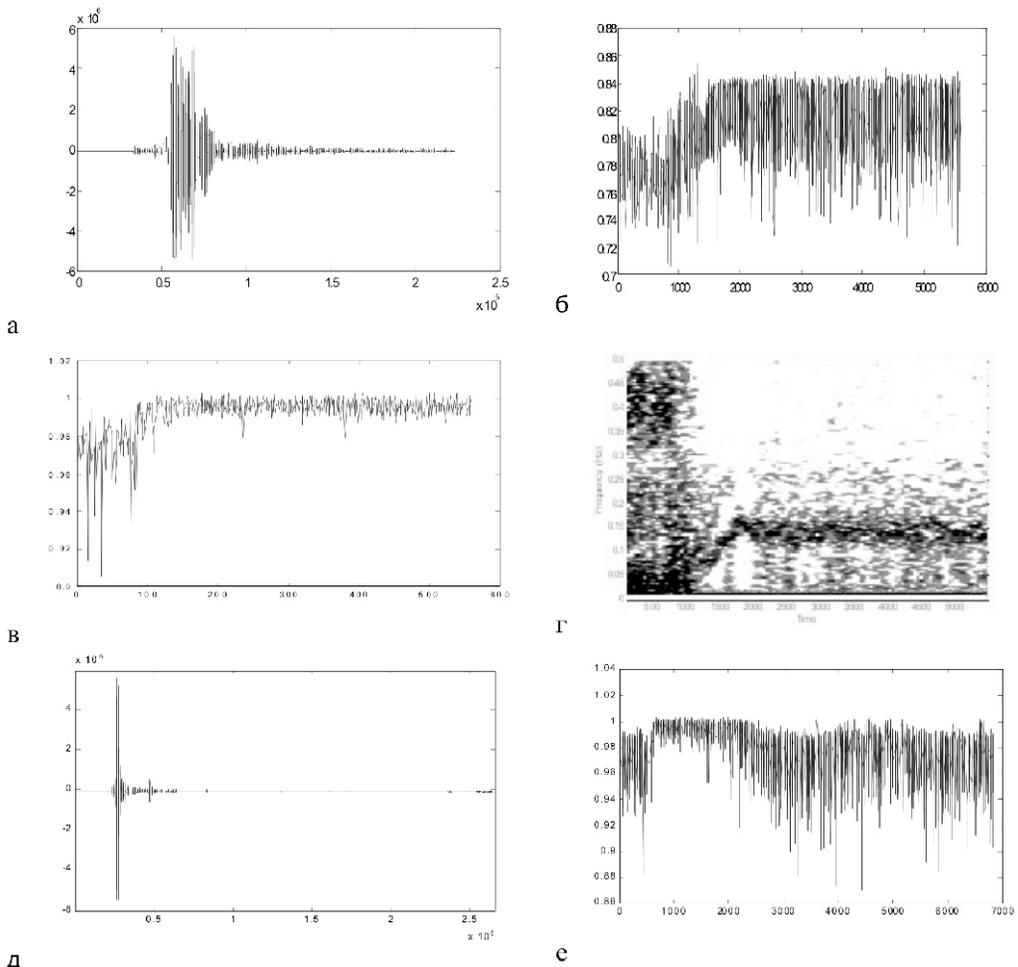


Рисунок 4. (а) Сейсмическая запись z-компоненты с сигналом от сильного землетрясения в Чили. (б) Значение показателя Хёрста для микросейсмического шума и сейсмического сигнала от сильного землетрясения в Чили, скользящее окно шириной 10 секунд. (в) Скользящее окно шириной 1 минута. (г) Спектр значений показателя Хёрста. (д) Сейсмическая запись в течение суток 27.02.2010 и (е) соответствующие ей показатели Хёрста, рассчитанные в скользящем окне шириной 1 минута.

Интересен момент начала записи – есть ли переходной момент, который можно было бы использовать как предвестник. Такого не обнаружено. Возможно предположить, что временной интервал, который взят для анализа (одни сутки), не соответствует периодам предполагаемых тектонических волн (часы-сутки). Для того чтобы удостовериться в своем суждении, необходимо в дальнейшем провести анализ больших объемов информации, включающих гораздо большие временные оконные интервалы для вычисления фрактальной размерности.

В нашей работе проводился анализ отдельных временных рядов, а не всей системы в целом, что обусловило другой результат, нежели в [14].

Выводы

Таким образом, применение нескольких взаимодополняющих методов анализа к данным каждого конкретного геофизического метода позволяет увеличить шанс обнаружения предвестникового эффекта в случае его наличия, помогает правильно выбрать прогностический критерий. Выбрав критерии и оценив их вероятностные характеристики, целесообразно в дальнейшем обработку информации проводить сразу по всем методам параллельно, организовав ветвление и обнаружение сигналов по мажоритарному признаку. Складывая рассчитанные вероятности тех методов, где обнаружен прогностический критерий, в течение выбранного интервала времени возможно определять общий уровень текущей тревоги.

Такой подход позволяет автоматизировать процесс определения текущей безопасности и прост в программной реализации. Комплекс должен быть открыт для обогащения анализа новыми методами по мере их испытания и подключения.

Наличие самого по себе аппаратного комплекса не является основанием успешного выполнения задачи выделения предвестниковых эффектов в геосферах. Чаще невозможно выделить визуально, по результатам анализа данных, наличие сигналов-предвестников. Поэтому как минимум аппаратный комплекс должен быть дополнен алгоритмической частью, основывающейся на теории и здравом смысле.

Проведенные исследования показали, что предложенные методы в ряде случаев выделяют аномалии в геофизических полях, которые могут быть предвестниками сильных землетрясений.

Вместе с тем важен физический смысл происходящего, который бы позволил объяснить причины (механизмы) проявления аномалий на больших расстояниях от источников землетрясений, следовательно, позволил бы выделить их. В рамках данной работы предполагается реакция измеряемых параметров на прохождение тектонических волн от удаленных очагов сильных землетрясений.

Литература

1. **Лящук О.І., Ващенко В.М., Павлович В.М.** Синхронні комплексні дослідження за геодинамічними процесами в сейсмонебезпечних регіонах Вранча та морі Скоша. // Київ, Матеріали VIII Міжнародної наукової конференції «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища» 2007, с. 103-104.
2. **Лящук О.І., Русов В.Д., Ващенко В.М., Шапка В.М., Павлович В.Н.** Моніторинг концентрації радону для прогнозу землетрусів у регіоні Антарктичного півострова // Київ, 2006 р. Матеріали III Міжнародної наукової конференції „Наукові дослідження в Антарктиці”, ст.48.
3. **Лящук А.И., Ващенко В.Н., Гуков В.М., Качалин И.Г.** Сейсмические наблюдения в регионе Аргентинских островов. // Київ, 2006 р. Матеріали Всеукраїнської наукової конференції «Моніторинг небезпечних геологічних процесів та екологічного стану середовища». Ст.90.
4. **А.И. Лящук, В.Н. Павлович, В.Д. Русов.** Мониторинг концентрации радона как предвестник землетрясений в районе гор Вранча // Геофизический журнал №2, Т. 30, 2008, с. 63–74.
5. **Соболев Г.А., Пономарев А.В.** Физика землетрясений и предвестники. М.: Наука. 2003. 270 с.
6. **В.А. Липеровский.** Физические модели связи в системе литосфера–атмосфера–ионосфера. Лекции БШФФ-2006. С. 58–65.
7. **Лящук О.І., Савельєв В.Ю., Павлович В.М.** Комплексні підходи до ймовірнісних провісників землетрусів у районі Вранча // Геодинаміка 1(6)/2007, с. 55–59.
8. **О. Liashchuk.** Technical and algorithmic complex of monitoring of the dangerous geodynamics phenomena // Геофизический журнал №4, Т. 32, 2010, с. 87-88.
9. **Марпл С.Л.** Цифровой спектральный анализ и его приложения. Пер. с англ. М.: Мир. 1990, 584 с.
10. **Любушин А.А.** Анализ данных систем геофизического и экологического мониторинга. М.: Наука, 2007. 228 с.
11. **Чуи Ч.** Введение в вейвлеты. Пер. с англ. М.: Мир, 2001, 412 с.
12. **В.И. Уткин, А.К. Юрков.** Радон – надежный индикатор геодинамических процессов // Вестник КРАУНЦ, Науки о Земле. 2009, № 1. Выпуск № 1, с. 165-169.
13. **Федер Е.** Фракталы. Пер. с англ. М.: Мир, 1991, 254 с.
14. **А.Б. Завгородний.** Современные методы исследования структурно-информационных свойств естественных систем // Электроника и связь. №1, 2010, с. 60–65.
15. **Э.Н. Халилов.** Прогноз землетрясений: причины неудач и новая философия. // SCIENCE WITHOUT BORDERS. Transactions of the International Academy of Science H & E. Vol.3. 2007/2008, SWB, Innsbruck, 2008, p.300-315.
16. **Yu. Bogdanov, A. Kvasnuk, V. Kobolev, N. Loyko, O. Rusakov, V. Pavlovich, V. Shuman.** First recognition of the earth eigenmodes in radio frequency electromagnetic radiation // Геофизический журнал №4, Т. 32, 2010, с. 19-20.