

*На правах рукописи*

Яковлев Павел Викторович

Анализ пространственно-временных особенностей временных рядов GPS для выделения областей интенсивных движений земной коры

Специальность: 25.00.10 – Геофизика,  
геофизические методы поисков полезных ископаемых

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2016

Работа выполнена на кафедре математики Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ)

Научный руководитель: Доктор физико-математических наук,  
Заведующий лабораторией физики колебаний  
пробных масс ФГБУН ИФЗ РАН  
Любушин Алексей Александрович

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ФГБУН ИТПЗ РАН  
Родкин Михаил Владимирович

Доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник ФГБУН ИПНГ РАН  
Чеботарева Ирина Яковлевна

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Геофизический центр  
Российской академии наук

Защита диссертации состоится «21» сентября 2016 года в 15:00 на заседании диссертационного совета Д 212.121.07 в Российском государственном геологоразведочном университете имени Серго Орджоникидзе по адресу: 117997, Москва, ул. Миклухо-Маклая, д. 23, в аудитории 4-73.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Российского государственного геологоразведочного университета имени Серго Орджоникидзе (МГРИ-РГГРУ).

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2016 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
к.т.н., доцент



Романов Виктор Валерьевич

**Актуальность темы диссертации** определяется современным процессом резкого увеличения объема геофизических данных, свободно доступных для исследования. Эта тенденция особенно сильно проявляет себя для данных спутниковой геодезии. В частности, в настоящее время доступны ежесуточные трехкомпонентные временные ряды GPS от почти 11 тысяч пунктов наблюдения, расположенных по всему миру, причем с середины 2013 года они доступны также с шагом по времени 5 минут. Этот объем данных дает геофизике новые возможности для исследования тонкой структуры движений земной коры и, в частности, таких скрытых процессов как «тихие землетрясения».

В данной диссертации основное внимание уделяется анализу нерегулярной составляющей временных рядов, которая при традиционном анализе называется «шумом» и обычно подавляется с помощью операций сглаживания. Хаотический характер изучаемой составляющей сигналов определяет набор статистических инструментов, разработанных и примененных для ее изучения – это исследование выбросов и скачков, а также фрактальных и мультифрактальных характеристик.

**Цели и задачи диссертации.** Целью данной диссертационной работы является разработка методов и алгоритмов для анализа нерегулярной (шумовой) составляющей временных рядов спутниковой геодезии для выделения на поверхности Земли регионов, характеризующихся повышенной интенсивностью движений малых блоков земной коры. Для достижения этой цели были решены следующие задачи:

1. Разработан энтропийный метод анализа скачкообразной составляющей временных рядов, основанный на использовании введенного автором понятия псевдо-производной.
2. Разработан метод выделения аномальных регионов, основанный на использовании меры интенсивности выбросов во временных рядах.

3. Разработаны методы построения карт распределения по пространству мультифрактальных параметров временных рядов GPS на основе анализа данных, содержащих пропуски регистрации.
4. Разработаны методы построения карт распределения максимального собственного числа корреляционной матрицы и спектральной экспоненты шума от заданного числа ближайших станций.

**Научная новизна.** В настоящей работе вводится такое понятие как псевдо-производная, имеющее определенный ряд свойств, сходных с классическим определением производной. Предлагается конкурентно-способный метод построения ступенчатой аппроксимации временных рядов с использованием псевдо-производной. Преимуществом данного метода является предельная простота реализации, из которой следует высокая скорость вычислений для случая обработки большого числа временных рядов. Рассматриваются также различные модификации метода.

Предлагается метод оценки скачкообразности сигналов, основанный на использовании их кусочно-ступенчатой аппроксимации. Под скачкообразностью здесь подразумевается резкое изменение среднего значения. Помимо скачков, в работе приведено выделение таких особенностей как выбросы с помощью метода взвешенной суммы приращений стандартных отклонений. И скачки, и выбросы не рассматриваются в работе, как случайные неинформативные события, а наоборот, предполагается, что они являются одними из важнейших составляющих сигнала, которые могут нести в себе важную информацию.

Предлагается новый метод выделения регионов земной коры, характеризующихся повышенной интенсивностью медленных движений, основанный на построении карт статистических свойств случайных флуктуаций временных рядов GPS. Предлагаемый метод использует оценки свойств шума в скользящих временных окнах в виде последовательности карт их значений с

последующим усреднением карт, принадлежащих заданному интервалу дат. Главной идеей этого подхода является предположение, что регионы интенсивных движений должны выделяться одновременно как области с повышенной дисперсией шума, пониженной энтропией скачкообразной компоненты, повышенными значениями ширины носителя мультифрактального спектра сингулярности (меры разнообразия поведения шума) и пониженными значениями максимального собственного числа корреляционной матрицы шума от заданного числа ближайших станций. Одновременный учет этих различных характеристик шумовой компоненты временных рядов GPS достигается путем применения метода главных компонент к анализу шумов временных рядов, регистрируемых синхронно на большом числе GPS станций, покрывающих значительную область поверхности Земли.

**Методы исследования.** В диссертации использовались методы статистического анализа, метод главных компонент, метод псевдопроизводных и взвешенной суммы приращений стандартных отклонений, мультифрактальный анализ.

**Публикации.** Материалы диссертации были опубликованы в восьми печатных изданиях, четыре из которых являются тезисами докладов на конференциях, а остальные четыре в журналах, включенных ВАК РФ в перечень ведущих рецензируемых изданий.

**Апробация работы.** Основные промежуточные результаты исследований, приведенные в диссертации, докладывались на следующих конференциях:

- XI Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле», Москва 2013
- VII Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле», Москва, 2014

- Проблемный Совет «Сейсмичность Земли, природные и природно-техногенные катастрофы», Москва, 2014
- XII Международная научно-практическая конференция «Новые идеи в науках о Земле», Москва, 2015
- IUGG 2015 General Assembly, Prague, 2015

**Личный вклад автора.** Автором выполнены и написаны все расчеты и программы. Он ввел понятие псевдо-производной и предложил основную идею построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов. Метод взвешенной суммы приращений стандартных отклонений для выделения выбросов в сигналах также разработан автором.

**Практическая значимость.** В диссертации созданы алгоритмы анализа большого числа (нескольких тысяч) временных рядов систем космической геодезии, включающие в себя автоматический контроль качества данных и учет пропусков регистрации, позволяющие визуализировать пространственно-временную картину эволюции ряда информативных свойств поля смещений земной поверхности в виде последовательности карт, оцениваемых в скользящих временных окнах. Эта последовательность карт может быть использована в задачах оценки текущей сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

- Метод построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов, основанный на определении псевдо-производной и ее свойствах
- Метод взвешенной суммы приращений стандартных отклонений для выделения выбросов во временных рядах
- Методы выделения аномальных и сейсмически опасных регионов, а также зон интенсивных медленных движений земной коры, основанные на оценке мультифрактальных и статистических параметров временных рядов GPS, выбросов и скачкообразной компоненты

**Достоверность и обоснованность полученных научных результатов** гарантируется строгостью используемого математического аппарата и подтверждается сопоставлением результатов анализа временных рядов с сейсмическим режимом и особенностями геологического строения исследуемых регионов.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы из 95 источников. Работа изложена на 115 страницах машинописного текста, включает в себя 37 рисунков и 3 таблицы.

### **Содержание работы**

Во **введении** диссертационной работы обосновывается интерес выбора темы, ее актуальность, сформулированы поставленные перед диссертантом цели, задачи и используемые методы для их решения. Описана научная новизна предлагаемых методов, а также практическая значимость и основные полученные научные результаты, выносимые на защиту.

В **первой главе**, называемой «Некоторые методы анализа и статистики временных рядов», представлены наиболее популярные существующие направления для изучения временных рядов различной природы, такие как:

1. Спектральный анализ.
2. Корреляционно-регрессионный анализ.
3. Спектрально-сингулярный анализ.
4. Авторегрессионные модели, модели скользящего среднего.
5. Мультифрактальный анализ.
6. Анализ с точки зрения динамических систем.

Кратко изложены идеи и цели применения каждого из выше упомянутых методов, более подробно рассмотрен мультифрактальный анализ, так как в

работе в дальнейшем будут использоваться различные мультифрактальные характеристики временных рядов.

Обоснована применимость мультифрактального подхода при изучении многих временных рядов. На классическом примере мультипликативного биномиального процесса показано, что именно анализ мультифрактальных параметров позволяет более детально изучить структуру временных рядов, в то время как остальные методы являются малоэффективными для этих целей. Приведены такие понятия как мультифрактальный спектр сингулярности и обобщенный показатель Херста, отражающие наиболее важные характеристики сигнала: сложность структуры, коррелированность временных рядов (при изучении их в совокупности), персистентность сигналов и т.д. Рассмотрены два широко используемых метода для оценки данных характеристик, основанные на непрерывном вейвлет-преобразовании (WTMM – wavelet transform maxima modulus) и оценки флуктуаций шумовой компоненты исследуемых сигналов после удаления трендов (MFDFA – multifractal detrended fluctuation analysis), а также приведены слабые и сильные стороны каждого из них.

Представлена упрощенная модель землетрясения, объясняющая явление резких смещений земной поверхности, а также появления на графиках временных рядов GPS таких событий как скачков и выбросов.

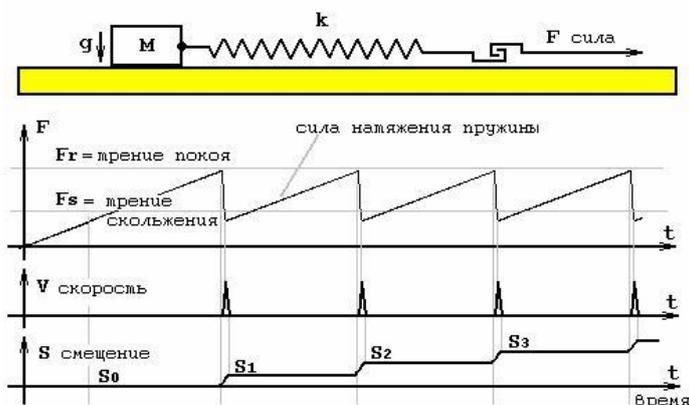


Рисунок 1. Упрощенная модель землетрясения

Описана статистическая значимость выбросов во временных рядах разной природы, в следствие чего предложено выделять выбросы не для их устранения (как это принято, например, при традиционном анализе временных рядов GPS, где основной целью является определение трендовой составляющей для изучения ее свойств), а для их дальнейшего углубленного их изучения. В дополнение к изучению выбросов появляется задача выделения скачков среднего уровня, которые, согласно идеализированной модели землетрясения, соответствуют моментам резких изменений скорости смещений. Таким образом, скачки среднего уровня во временных рядах GPS являются статистически значимыми событиями. Для их выделения существует ряд различных алгоритмов, один из которых (STARS) в качестве обзорного материала также изложен в первой главе диссертационной работы. Данный алгоритм успешно был применен в работах Родионова С. по анализу климатических данных, однако из-за того, что временные ряды GPS являются более сложными по структуре сигналами, в работе S. Bruni и др. его использование не показало удовлетворительных результатов.

Приведены основные источники GPS данных с различными шагами дискретизации, зарегистрированных с почти 11 тысяч стационарных станций, расположенных по всему миру. Наиболее густой сетью покрытия обладают несколько регионов: США, Европа, Япония, Западная Австралия и Новая Зеландия, а в силу того факта, что большая часть землетрясений приходится на границы литосферных блоков, повышенный интерес из названных выше регионов вызывают США, Япония и Новая Зеландия.

В работе производится анализ 30-минутных трехкомпонентных временных рядов GPS в период до и после мега-землетрясения в Японии 11 марта 2011 года (землетрясения Тохоку), полученных с Японских островов, являющимися более пригодными для задач прогноза, нежели обычные ежесуточные данные. Были подвергнуты анализу временные ряды GPS с шагом

дискретизации 1 сутки на Западе США, на территории которой расположена одна из крупнейших систем активных разломов.

Общая тенденция роста числа сильных толчков указывает на повышение сейсмической активности по всему миру. Статистика таких толчков за последние несколько десятков лет (магнитудой более 8) приведена в таблице 1 ниже:

Таблица 1. Статистика землетрясений магнитудой более 8 за последние 40 лет

Период	Количество землетрясений
1974.01.01 – 1984.01.01	1
1984.01.01 – 1994.01.01	4
1994.01.01 – 2004.01.01	10
2004.01.01 – 2014.01.01	17

В начале **второй** главы приводится алгоритм вычисления спектральной экспоненты вейвлет-преобразования. Оптимальный вейвлет-базис выбирался из условия минимума энтропии распределения квадрата значений вейвлет-коэффициентов.

В силу свойства энтропии, максимум информации будет сконцентрирован в минимальном количестве вейвлет-коэффициентов, то есть подобранный базис для временного ряда  $X(t)$  будет таким, что распределение вейвлет-коэффициентов максимально отличается от равномерного распределения.

Введены два новых математических инструмента для определения меры выбросов и скачков во временных рядах. Для выделения скачкообразной компоненты временных рядов определено понятие псевдо-производной, схожей по некоторым свойствам с классическим определением производной. По сути данный инструмент служит для вычисления приращений временных

рядов на различных масштабах. Для этого при анализе сигнала  $X(t)$  используется скользящее окно длиной  $M$  отсчетов, разделенное в свою очередь на два подокна  $L$  и  $R$  длиной  $\left[\frac{M}{2}\right]$  и  $\left[M - \frac{M}{2}\right]$  отсчетов соответственно. Псевдо-производной на базе  $M$  назовем величину, определяемую по формуле

$$D = \frac{\Delta ED + \Delta ID}{2} \quad (1)$$

где  $\Delta ED = R_{max} - L_{min}$ ,  $\Delta ID = R_{min} - L_{max}$  – явное и скрытое приращения, а  $L_{max}, L_{min}, R_{max}, R_{min}$  – максимальные и минимальные значения для левого и правого окон соответственно. Таким образом, величина  $D$  обладает следующими свойствами:

1.  $D > 0 \Rightarrow \frac{R_{max} - L_{min}}{2} > \frac{L_{max} - R_{min}}{2} \Rightarrow \frac{R_{max} + R_{min}}{2} > \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \Rightarrow$  середина окна  $R$  расположена выше середины окна  $L$ , что указывает на рост значений сигнала.
2.  $D < 0 \Rightarrow \frac{R_{max} - L_{min}}{2} < \frac{L_{max} - R_{min}}{2} \Rightarrow \frac{R_{max} + R_{min}}{2} < \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \Rightarrow$  середина окна  $L$  расположена выше середины окна  $R$ , что указывает на спад значений сигнала. Этот случай полностью зеркален предыдущему, за счет того, что скрытое и явное приращения меняются местами.
3.  $D = 0 \Rightarrow \frac{R_{max} - L_{min}}{2} = \frac{L_{max} - R_{min}}{2} \Rightarrow \frac{R_{max} + R_{min}}{2} = \frac{L_{max} + L_{min}}{2} \Rightarrow$  середины окон  $L$  и  $R$  совпадают.

Данные свойства позволяют находить точки экстремума и перегиба исследуемых сигналов на различных масштабах. В случае, когда база  $M$  псевдо-производной равна 2, то вычисление псевдо-производной эквивалентно переходу к приращениям. Другими свойствами, схожими со свойствами классической производной, являются:

1. Псевдо-производная от сигнала-константы равна 0.
2. Среднее значение псевдо-производной прямо пропорционально углу наклона (в случае, если сигнал является прямой).

3. Псевдо-производная скачка похожа по виду на  $\delta$ -функцию, и в точке разрыва ее отклонение от среднего значения соответствует величине этого скачка.

С использованием указанных выше свойств псевдо-производной в диссертации предлагается алгоритм построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов. Он основан на неявном устранении линии тенденции из сигнала путем вычитания из псевдо-производной скользящего среднего в окне радиуса, равного базе псевдо-производной. Затем необходимо найти нули получившегося временного ряда для определения экстремальных точек сигнала, а промежутки возрастания и убывания аппроксимировать средним или медианным значениями. Альтернативным способом является усреднение по интервалам, расположенным между точками перегиба, а не точками экстремума. В результате получается следующая кусочно-ступенчатая аппроксимация временного ряда.

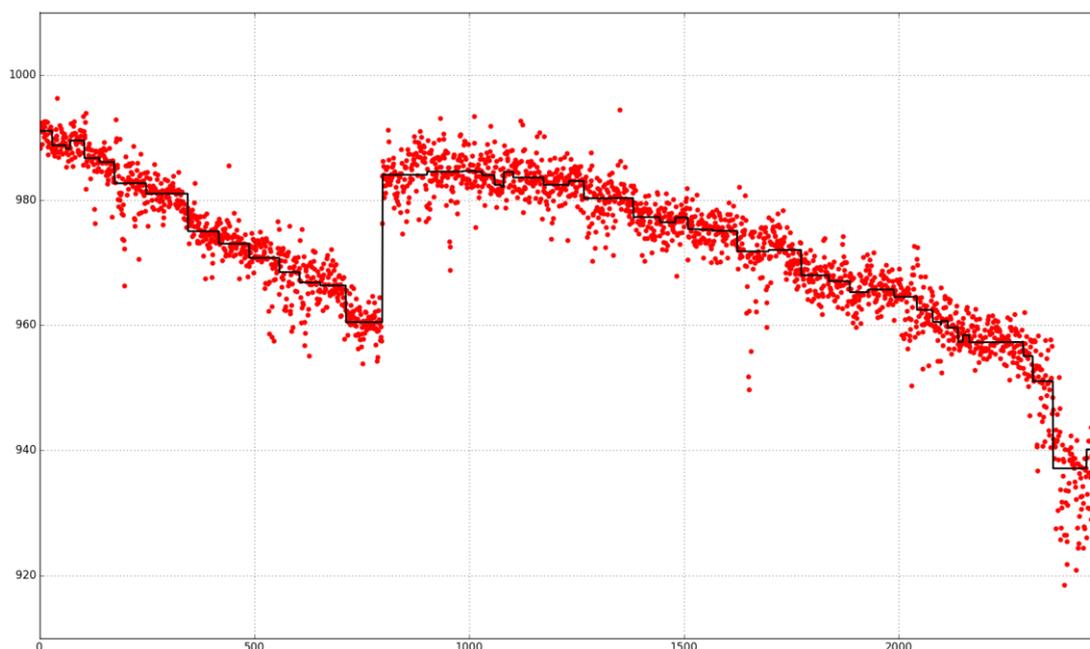


Рисунок 2. Кусочно-ступенчатая аппроксимация GPS сигнала методом псевдо-производных

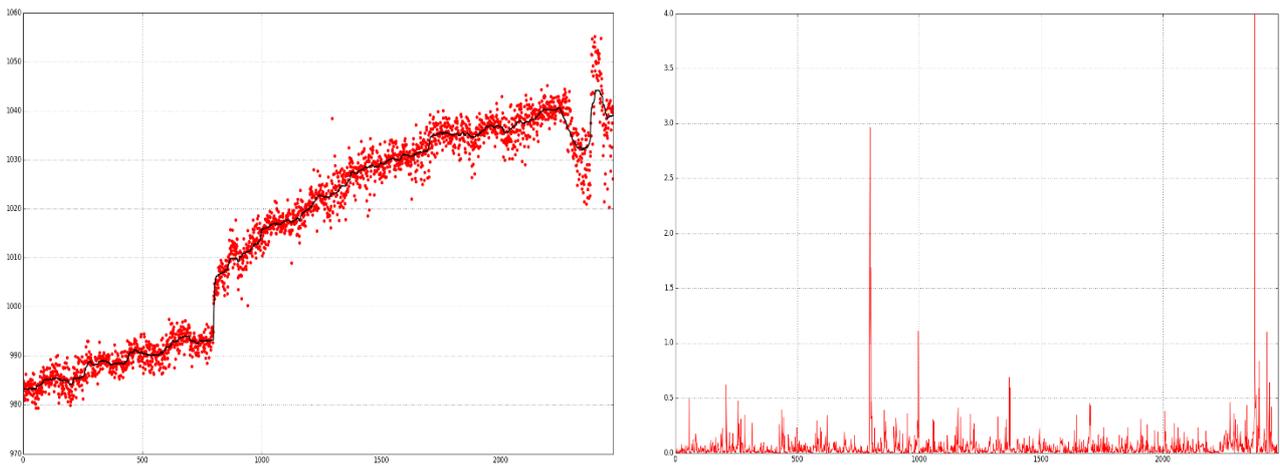
Следующим этапом является сравнение вновь предложенного алгоритма построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов с уже существующими: дискретным вейвлет-преобразованием Хаара и методом

ММВП (он же WTMM) – методом максимума непрерывного вейвлет-преобразования. Усредненные показатели тестирования для одного и того же сигнала GPS приведены в таблице ниже:

Таблица 2. Сравнение алгоритмов построения кусочно-ступенчатой аппроксимации

<b>Метод</b>	<b>Время выполнения</b>	<b>Среднеквадратическая ошибка</b>
ДВП Хаара	1.6651	3.101
ММВП	3.0021	5.5045
Псевдо-производная	1.4861	3.6221

Несмотря на то, что метод построения кусочно-ступенчатой аппроксимации с использованием псевдо-производной по времени выполнения сопоставим с дискретным преобразованием Хаара, он качественно является лучшим, так как в отличие от Хаара, получившаяся в результате обратного дискретного вейвлет-преобразования кусочно-ступенчатая аппроксимация сигнала зачастую содержит выбросы. Таким образом, она не является пригодной для выделения интервалов со значимым скачком среднего уровня. Мера скачкообразности сигнала определяется как нормализованная энтропия модуля приращений усредненной кусочно-ступенчатой аппроксимации, полученной для определенного диапазона баз псевдо-производной. В качестве меры скачкообразности сигнала выбрана энтропия в силу основного ее свойства: чем ее значение меньше, тем менее система хаотична, то есть обнаруженные скачки не являются случайными. Пример усредненной кусочно-ступенчатой аппроксимации и ее модуля приращений изображены на рисунке ниже:



а)

б)

Рисунок 3. а) усредненная кусочно-ступенчатая аппроксимация GPS сигнала для баз псевдо-производных в диапазоне от 10 до 200 отсчетов, б) модуль приращений усредненной кусочно-ступенчатой аппроксимации, энтропия равна 0.8809

Подход с использованием двойного окна позволил предложить метод для определения меры выбросов во временных рядах. Основной задачей предлагаемого метода не является определение моментов времени, в которые во временном ряду появился выброс, но определить, насколько то или иное значение временного ряда влияет на стандартное отклонение сигнала. Стандартное отклонение в качестве статистической характеристики выбрано как величина, достаточно чувствительно реагирующая на возникновение выброса.

Как уже говорилось выше, алгоритм определения меры выбросов использует два окна:  $L$  и  $R$ . Введем следующие разности:

$$\begin{aligned} L_i &= |\sigma_L^i - \sigma_L^{i-1}| \\ R_i &= |\sigma_R^i - \sigma_R^{i+1}|, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $\sigma_L^i, \sigma_R^i$  – стандартные отклонения, рассчитанные для значений  $t \in [0, i]$  и  $t \in [i, N - 1]$  соответственно. Величины  $\sigma_L^{-1}$  и  $\sigma_R^N$ , выходящие за границы возможных значений  $t$ , положим равными нулю. Пояснение этого условия будет изложено позже. Таким образом, в каждый момент времени мы имеем абсолютные значения разностей стандартных отклонений, которые являются более показательными в отличие от обычной разности, так как

стандартное отклонение само по себе чувствительно к малым отклонениям. Величины (2) показывают, сильно ли отклоняется текущее значение временного ряда относительно левой и правой частей сигнала в отдельности. Чтобы определить меру отклонения относительно всего сигнала в совокупности, рассмотрим взвешенную сумму приращений стандартных отклонений:

$$W_t = \frac{t}{N} L_t + \frac{N-1-t}{N} R_t \quad (3)$$

В момент времени  $t = 0$ , когда возможно сравнение текущего значения только со значениями справа, мы видим, что первое слагаемое суммы (3) обращается в ноль, поэтому значение величины  $\sigma_L^{-1}$  может быть любым, например, 0. В другом крайнем случае при  $t = N - 1$ , аналогично, второе слагаемое суммы (3) равно нулю, поэтому  $\sigma_R^N$  также можно положить равным 0.

Моменты скачков на графике смещений совпадают с выбросами на графике скорости, таким образом, при расчете величины  $W_t$  предварительно необходимо перейти к приращениям. Данный вспомогательный временной ряд выглядит следующим образом:

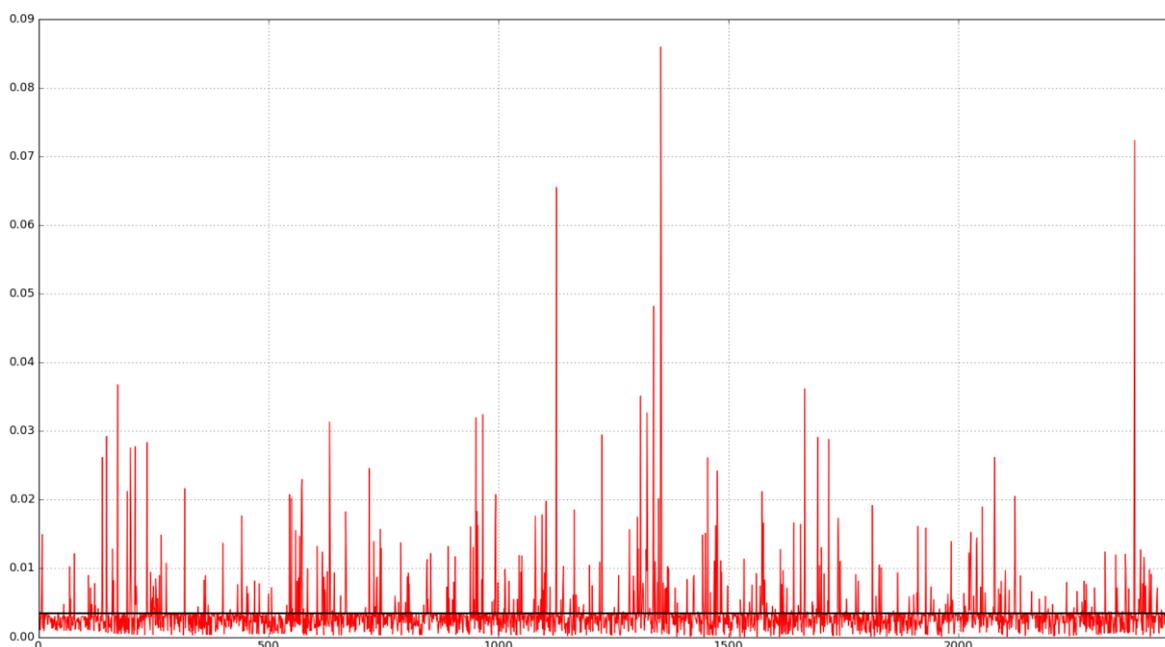


Рисунок 4. Пример ряда  $W_t$

Черной линией на графике отделены те приращения временного ряда, которые наиболее сильно влияют на стандартное отклонение сигнала. Эта граница вычисляется на основе предположения, что естественные колебания системы должны преобладать над случайными выбросами, таким образом, построив гистограмму, возможно отделить их друг от друга, взяв в качестве порога правую границу интервала, в котором гистограмма распределения выбросов принимает максимальное значение. Параметром здесь является число бинов гистограммы, влияющим на ее детализацию. Данное отделение выбросов от естественных колебаний на приращениях исходного временного ряда изображено ниже.

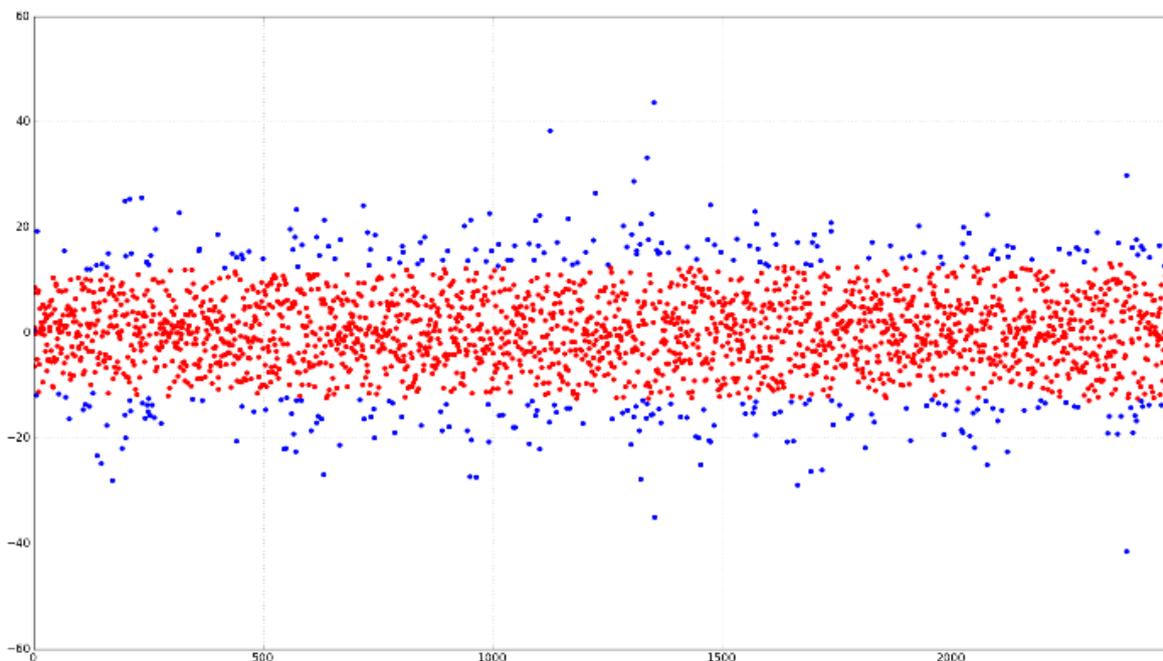


Рисунок 5. Пример определения выбросов с помощью взвешенной суммы приращений стандартных отклонений

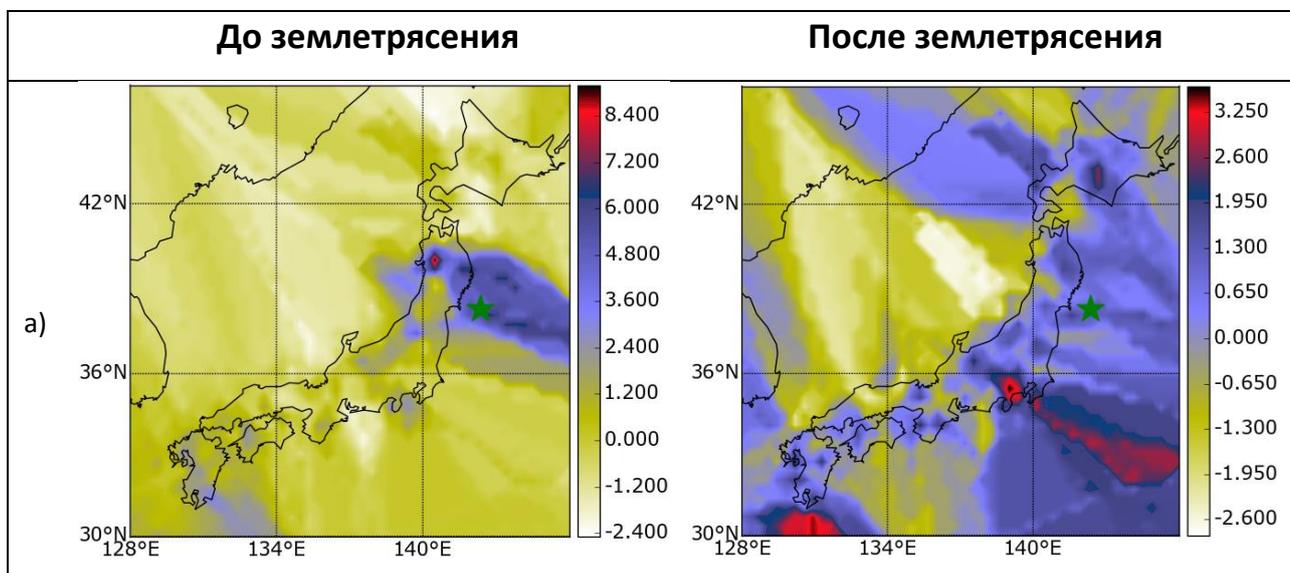
Вновь воспользовавшись понятием нормализованной энтропии, можно дать количественную оценку меры выбросов:

$$En = -\frac{1}{\ln(N-1)} \sum_t p(t) \cdot \ln(p(t)), \quad p(t) = \frac{W_t}{\sum_k W_k} \quad (4)$$

Для увеличения скорости счета меры выбросов во второй главе диссертации также выведены рекуррентные формулы стандартных отклонений для правого или левого окон.

В **третьей главе** предложен метод построения карт распределения статистических величин. Покроем выбранный регион регулярной сетью  $N \times N$  клеток. Рассчитаем ту или иную статистическую характеристику для каждой GPS станции, а затем для каждого узла сети найдем  $n$  ближайших станций-соседей и присвоим ему усредненное значение этих статистик.

С использованием данного алгоритма построения карт в третьей главе приведены карты распределения некоторых мультифрактальных характеристик, определенных во второй главе мер выбросов и скачкообразности сигналов, спектральной экспоненты, позволяющей определить рост низкочастотных колебаний, и некоторых других. На примере Японии построены карты до и после землетрясения в Тохоку 11 марта 2011 года, на которых продемонстрировано, что по данным GPS с использованием предлагаемых методов было бы возможно дать прогноз о месте подготовки надвигающейся катастрофы.



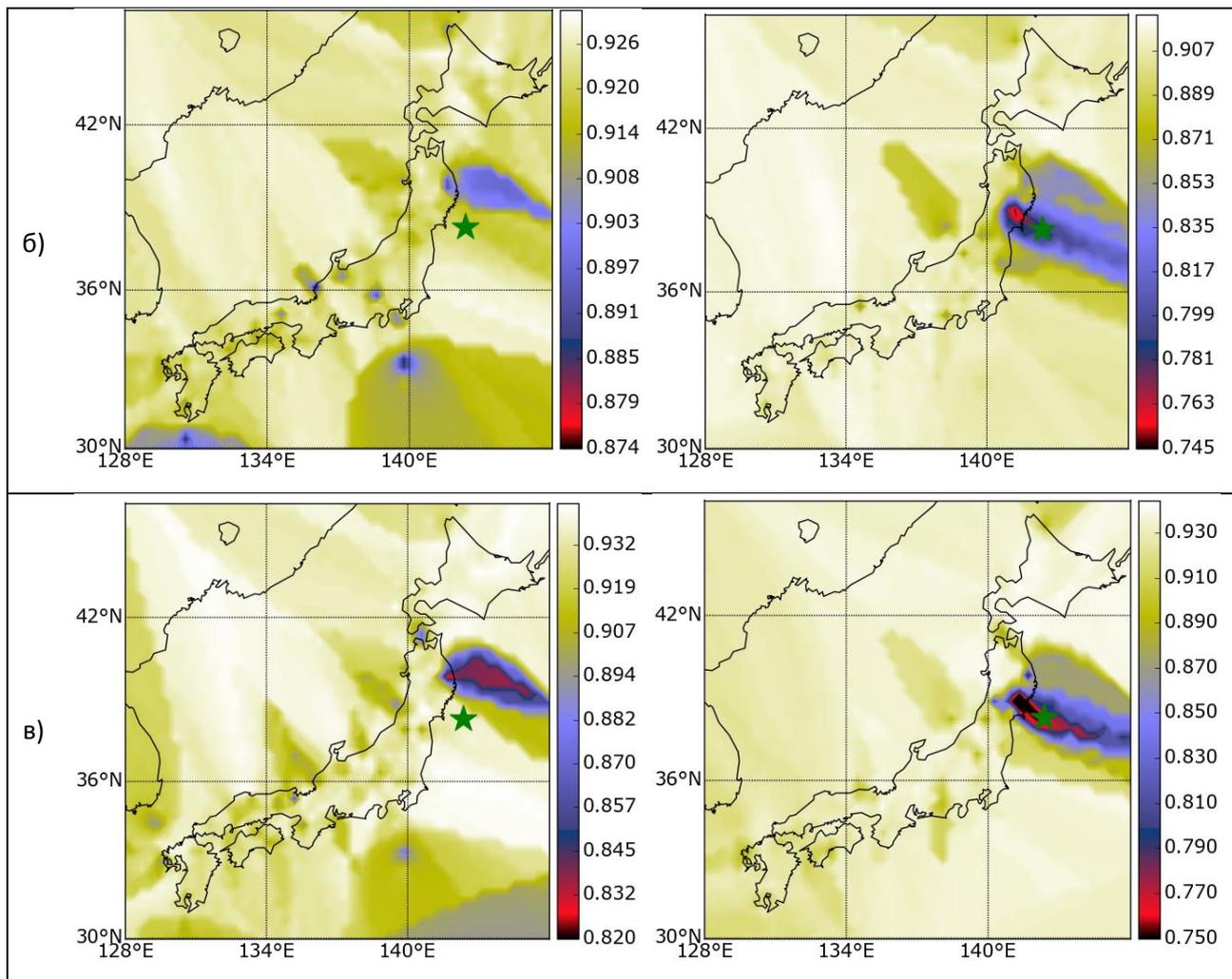


Рисунок 6. а) карты спектральной экспоненты восточных координат, б) карты нормализованной энтропии скачков северных координат, в) карты нормализованной энтропии меры выбросов вертикальных координат

Так как подобные сильные землетрясения случаются довольно редко в местах, доступных для анализа, те же алгоритмы были применены к исследованию движений земной поверхности западной территории США. В результате получилась картина, показывающая, что совершенно различными подходами удалось выделить одну и ту же сейсмически активную зону, для которой характерно множество слабых и так называемых «тихих» землетрясений. Данная территория расположена вдоль тихоокеанского побережья и захватывает одну из крупнейших систем разломов, в который также входит и знаменитый разлом Сан-Андреас. Некоторые получившиеся результаты приведены ниже:

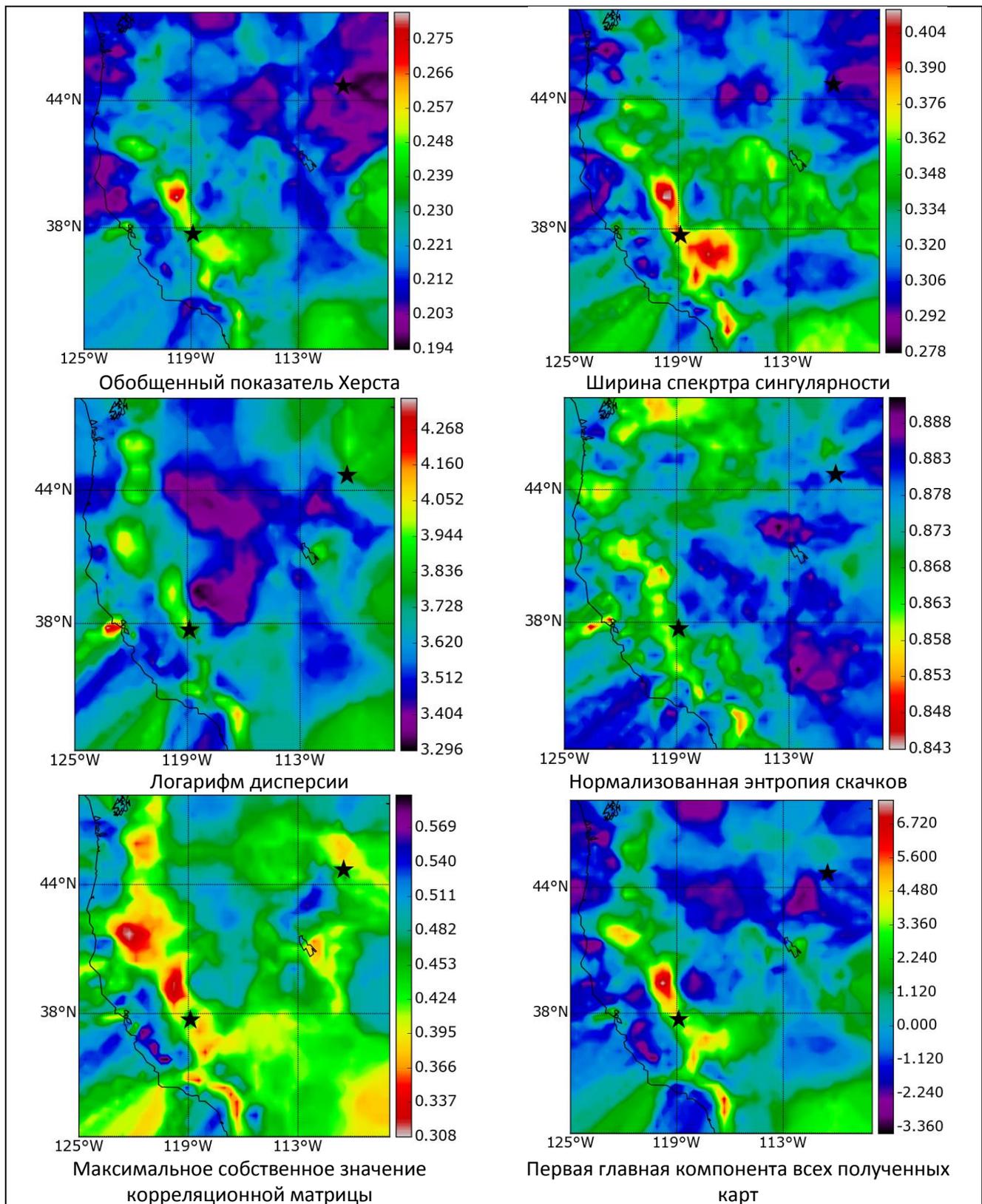


Рисунок 7. Карты распределения некоторых статистик временных рядов GPS для западной территории США

Таким образом, в диссертационной работе предложены методы для выделения зон активных движений земной коры с помощью использования

системы спутниковой навигации, способной регистрировать мельчайшие колебания земной поверхности, иногда называемые «дрожью Земли». Полученные в работе результаты открывают множество направлений для продолжения исследований в области анализа случайной составляющей временных рядов.

### **Заключение**

Предложенное понятие псевдо-производной является новым и, как следствие, может иметь дополнительные, еще неизученные, полезные свойства и применения помимо быстрого построения кусочно-ступенчатой аппроксимации. Возникает вопрос, существует ли возможность полного или частичного восстановления исходного временного ряда по его псевдо-производной с точностью до константы? Если так, то необходимо ввести понятие псевдо-первообразной. Данный факт может быть полезен, например, в следующем. Напомним, что одним из свойств псевдо-производной является то, что ее среднее значение соответствует коэффициенту углу наклона линейной тенденции на заданном интервале. Для построения кусочно-ступенчатой аппроксимации использовалось так называемое неявное удаление этих тенденций путем вычитания из нее скользящего среднего, таким образом, временной ряд, восстановленный после такого неявного удаления тренда может выступить в качестве оценки остаточного сигнала и должен быть сравнен с другими методами удаления тренда, причем необязательно линейного.

Взвешенная сумма стандартных отклонений также представляется интерес с точки зрения определения выбросов для исходного временного ряда, то есть без перехода к приращениям. Это позволит выделять не только резкие смещения (выбросы), но и более постепенные, которые зарегистрированы в течение некоторого числа последовательных дискретных моментов времени. Это является актуальным вопросом, так как на примере

временных рядов GPS с шагом дискретизации 5 минут число таких плавных скачков велико. То же самое можно сказать и про финансовые временные ряды, где значение на одном временном масштабе является изолированным выбросом, а на другом – серией однонаправленных выбросов.

В мульти-фрактальном анализе временных рядов интерес представляет несимметричный анализ спектра сингулярности применительно к временным рядам GPS, то есть оцененный по скорости изменения модулей вейвлет-коэффициентов вдоль длинных цепей максимумов и минимумов непрерывного вейвлет-преобразования в отдельности. Данный подход позволяет работать с удвоенным числом мультифрактальных параметров: обобщенного показателя Херста и шириной носителя спектра сингулярности. Установление связи между ними и картирование пространственного распределения полученных характеристик может помочь изучить тонкую структуру шума сигналов GPS еще более детально.

Физический смысл формы графика спектра сингулярности также остается недостаточно изученным. В частности, смещение «колокола» графика мультифрактального спектра сингулярности в ту или иную сторону имеет прозрачную математическую интерпретацию с точки зрения неравномерного распределения значений показателя Гельдера-Липшица, однако вопрос физической интерпретации этого факта применительно к временным рядам GPS пока что остается открытым.

#### **Список опубликованных работ по теме диссертации в изданиях из списка ВАК**

1. Любушин А.А., Яковлев П.В., Родионов Е.А. Многомерный анализ параметров флуктуаций GPS сигналов до и после мегаземлетрясения 11

- марта 2011 г. в Японии // Геофизические исследования, Т. 16, № 1, 2015. С. 14-23.
2. Любушин А.А., Яковлев П.В. Энтропийная мера скачкообразной составляющей временных рядов GPS // Физика Земли, Т. 52, № 1, 2016. С. 98-107.
  3. Яковлев П.В. Энтропийная мера выбросов во временных рядах GPS // Геофизические исследования, Т. 17, № 1, 2016. С. 37-45.
  4. Lyubushin A., Yakovlev P. Properties of GPS noise at Japan islands before and after Tohoku mega-earthquake // SpringerPlus, Vol. 3, July 2014. pp. 364-370.

#### **Список тезисов выступлений на конференциях**

1. Яковлев П.В. Анализ многомерных временных рядов финансового мониторинга // XI Международная конференция «Новые идеи в науках о Земле». М.: МГРИ-РГГРУ. 9-12 апреля 2013. Т. 3. С. 268.
2. Яковлев П.В. Анализ шумовой составляющей сигналов GPS // VII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Молодые – наукам о Земле». М.: МГРИ-РГГРУ, 15-17 апреля, 2014. Т.2. С. 208
3. Яковлев П.В., Любушин А.А. Выделение скачкообразной составляющей сигналов GPS путем построения кусочно-ступенчатых аппроксимаций методом псевдо-производных // XII Международная научно-практическая конференция "Новые идеи в науках о Земле". М.: МГРИ-РГГРУ, 8-10 апреля 2015. Т.2. С. 445-446.
4. Lyubushin A., Yakovlev P. Thin structure of GPS time series noise // 26th General Assembly of International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG), June 22 - July 02, 2015, Prague, Czech Republic. Symposium - S01f Seismological Observation and Interpretation: Seismic Time Series Analysis.