

«УТВЕРЖДАЮ»

И.о. Директора ФГБУН ГЦ РАН,
доктор физ.-мат. наук, профессор РАН,

Соловьев А.А.

« 05 » сентября 2016 г.

М.П.

ОТЗЫВ

ведущей организации - Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения науки Геофизический центр Российской академии наук в диссертационный совет Д 212.121.07 на диссертационную работу Яковлева Павла Викторовича на тему «Анализ пространственно-временных особенностей временных рядов GPS для выделения областей интенсивных движений земной коры», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Диссертационная работа Яковлева П.В. выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе МГРИ-РГГРУ.

Полный объем диссертации Яковлева П.В. составляет 115 страниц машинописного текста и включает в себя 37 рисунков, 3 таблицы и список литературы из 95 наименований.

С целью выявления сейсмоопасных регионов автор диссертации изучает поведение шумовых компонент изменений координат пунктов GPS. Эта тематика имеет непосредственное отношение к деятельности Лаборатории геодинамики Геофизического центра РАН. Силами лаборатории в течение многих исследуются деформации земной поверхности в районе проектирования захоронения радиоактивных отходов. На основе анализа GPS наблюдений исследуются деформационные предвестники сильных землетрясений. Это свидетельствует о степени компетентности и соответствия научной деятельности ведущей организации.

АКТУАЛЬНОСТЬ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Диссертационная работа Яковлева П.В. посвящена анализу временных рядов GPS, регистрируемых с помощью стационарных GPS станций, расположенных по всему миру. Наиболее густые сети расположены в Соединенных Штатах Америки, Японии и Европе. Число таких станций с каждым увеличивается, и на сегодняшний день в свободном доступе находятся данные с более чем 11000 пунктов наблюдения. В связи с этим актуальной технологической проблемой является быстрая обработка имеющегося объема данных, которая позволит оперативно оценивать и исследовать поведение земной поверхности. Оценка выделения сейсмической энергии Земли сегодня также является актуальной научной задачей.

Таким образом, автор диссертации поставил перед собой задачу разработки новых алгоритмов анализа нерегулярной (шумовой) компоненты временных рядов координат постоянно действующих пунктов спутниковой геодезии и, собственно, анализа этих рядов, полученных для сейсмоактивных территорий.

НАУЧНАЯ НОВИЗНА

Наиболее важным, на наш взгляд, новым научным аспектом темы диссертации является привлечение внимания к неисследованному ранее классу движений земной поверхности – их короткопериодическим флуктуациям. Эти явления на сегодняшний день только начинают изучаться. Для этой цели Яковлев П.В. разработал новые методы выявления скачков и выбросов во временных рядах. Им предложено новое понятие – псевдопроизводная, обобщающее классическую производную на сложные и недифференцируемые функции, представленные временными рядами шумовых и нерегулярных компонент физических процессов.

Выделенные скачки и выбросы во временных рядах GPS в диссертационной работе используются для выделения участков земной поверхности, характеризующихся повышенной сейсмической активностью.

Оригинальный метод выделения выбросов основан на средневзвешенной оценке изменения стандартного отклонения. С использованием псевдопроизводной автором предложен новый метод построения ступенчатой аппроксимации.

На основе проведенного исследования с помощью предложенных Яковлевым П.В. методов удалось изучить распределение высокочастотных

флуктуаций движений земной поверхности в сейсмически активном регионе западного побережья Соединенных Штатов Америки, а также выделить место подготовки мегаземлетрясения в Тохоку, произошедшего 11 марта 2011 года.

Полученные результаты сравнены с другими методами анализа шумовой составляющей временных рядов GPS. Сходство выделенных областей подтверждает факт того, что данные регионы отличаются повышенной сейсмичностью.

ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ

Значимость результатов научно-исследовательской работы Яковлева П.В. заключается в разработке алгоритмов и программного комплекса методов для выделения областей с повышенной интенсивностью движений блоков земной коры. Предложенные в диссертации методы дополняют уже существующие алгоритмы. Методы обеспечивают их более высокоскоростную реализацию на современных компьютерных средствах. Получаемая последовательность карт пространственного распределения вычисленных статистик может быть использована в задачах оценки сейсмической опасности и прогноза землетрясений.

Полученные результаты доказывают важность исследования шумовой компоненты временных рядов, которая при традиционных методах анализа с помощью различных методов фильтрации, как правило, исключается, в то время как изменения в сложной мультифрактальной структуре шума позволяют выявить аномальное поведение земной поверхности.

С появлением более густых сетей GPS станций по всей земной поверхности предлагаемые подходы позволят построить глобальные карты пространственного распределения высокочастотной компоненты геодинамической активности.

Проведенная Яковлевым П.В. исследовательская работа открывает перспективы в области анализа шумовой составляющей временных рядов. Предложенные перспективные направления и идеи действительно требуют дальнейшего развития и более глубокого изучения.

СТРУКТУРА И СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационная работа Яковлева П.В. состоит из введения, трех глав, заключения и списка литературы.

Во *введении* описаны предпосылки выбора темы диссертации и обоснована цель анализа. Сформулированы поставленные перед диссертантом задачи, описана научная новизна исследования и актуальность выбранной темы, а также практическая значимость полученных результатов.

Первая глава представляет собой обзорную часть диссертации, в которой приведены наиболее часто используемые на практике методы анализа временных рядов, а также более подробно рассмотрен метод мультифрактального анализа. Описаны алгоритмы (WTMM и MFDFA) вычисления мультифрактального спектра сингулярности, на основе которого производится оценка хаотичности наблюдаемой системы, а также сильные и слабые стороны каждого из них. Определенное внимание посвящено выбросам и скачкам во временных рядах. Обоснована статистическая значимость выявляемых аномалий и необходимость их выделения для дальнейшего изучения, а не устранения, как это принято делать до настоящего времени. При этом также рассмотрен известный метод выделения скачков среднего уровня.

В завершение первой главы приведены основные источники GPS данных, используемых в диссертационной работе, а также приведена динамика изменения числа сильных землетрясений магнитудой больше 8 за последние сорок лет.

Вторая глава представляет собой основную теоретическую часть диссертационной работы Яковлева П.В. В ней рассмотрены новые методы для выделения таких особенностей временных рядов как выбросы и скачки среднего уровня. Значительный интерес представляет введенное диссертантом понятие псевдо-производной, которое является некоторым обобщением классической производной и имеет ряд сходств с ней, что упрощает процесс анализа и интерпретации полученных результатов. На основе введенного понятия псевдо-производной разработан метод построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов, что является основой для определения скачков среднего уровня. Основным преимуществом предложенного метода псевдо-производных является предельная простота реализации и высокая скорость вычислений, превышающая скорость существующих методов, что дает возможность использовать его для обработки большого объема данных.

В завершение второй главы предложен алгоритм определения меры выбросов временных рядов, основанный на изучении динамики изменения стандартного отклонения. Данный метод является непараметрическим, и получающийся на выходе вспомогательный временной ряд оказывается удобным для вычисления нормализованной энтропии. Нормализованная энтропия используется как в методе оценки скачкообразности сигналов, так и в оценке меры выбросов в качестве меры хаотичности изучаемого временного ряда. Низкое значение нормализованной энтропии свидетельствует о наличии в сигнале аномальной величины скачка или выброса. В заключении второй главы выведены рекуррентные формулы, что значительно увеличивает скорость вычислений в условиях больших объемов данных.

В третьей главе приведены результаты натурного исследования, которые сравнены с результатами, получаемыми с помощью уже существующих методов, использующих мультифрактальный формализм. Построены карты пространственного распределения вычисленных статистик. Данные карты строятся путем разбиения участка земной поверхности на равномерные ячейки и дальнейшего усреднения для каждого узла сети вычисленных статистических характеристик, полученных для заданного пользователем числа действующих станций GPS.

Важным результатом проведенных исследований является определение области подготовки мегаземлетрясения Тохоку 11 марта 2011 года на основе 30-минутных временных рядов GPS, а также выделение на основе суточных временных рядов GPS зоны повышенной геодинамической активности на территории Калифорнии, где расположена наиболее крупная в мире система разломов, в которой ежегодно накапливающая сейсмическая энергия находит выход в виде тысяч слабых землетрясений.

В заключении диссертации Яковлев П.В. резюмирует результаты проделанной работы и освещает область возможных дальнейших исследований.

По содержанию диссертационной работы имеются следующие замечания:

- 1) Автор работы предполагает, что им исследуются высокочастотные флуктуации смещений земной поверхности. Очень жаль, что он нигде не

- указывает амплитуды этих смещений. Очевидно, что это миллиметры или первые сантиметры. В этой ситуации нерешенной остается проблема «отделения» ошибок наблюдений от собственно смещений. С высокой вероятностью исследуемые характеристики могут быть отягощены, например, влияниями ионосферы, тропосферы, вариаций временных задержек в измерительной аппаратуре. На уровне миллиметров эти факторы пока что не учитываются и отягощают результаты наблюдений.
- 2) На стр.12 понятие сигнала отождествляется с временным рядом, что представляется некорректным.
 - 3) На стр. 17 утверждение «временные ряды GPS являются мультифракталами» также не представляется корректным.
 - 4) На стр. 22 очевидное, например, для геодезистов мнение о том, что так называемая «шумовая» компонента временных рядов GPS не должна быть исключена из анализа движений земной поверхности, почему-то приписывается современному автору. Тогда как уже из классической теории ошибок известно, что негауссов шум всегда несет полезную информацию как о наблюдаемом процессе, так и об ошибках наблюдений.
 - 5) На стр. 23 дается справка об ионосферных GPS предвестниках землетрясений. Заметим, что эти предположения пока еще не набрали убедительной статистики.
 - 6) На стр. 27, и в целом в тексте, когда речь идет о выбросах, непонятно, как отличить выброс, вызванный деформацией земной поверхности от грубой ошибки наблюдений.
 - 7) На стр.28 осуществлено цитирование некоего веб-документа, а не рецензируемого научного журнала, что на наш взгляд не является убедительным.
 - 8) К сожалению в диссертации не приведена дискретность регистрации радиосигнала GPS. Это осложняет оценку достоверности выводов.
 - 9) На стр. 39 после фразы: «Рассмотрим как коррелировали друг с другом 30-минутные сигналы GPS...» собственно этого рассмотрения не следует, по крайней мере в ближайших разделах текста.
 - 10) На некоторых страницах рукописи встречаются опечатки.

- 11) На стр. 58 идет речь о «средней квадратической ошибке». Интересно и важно, что под этим понимается?
- 12) Хотелось бы автор раскрыл физический смысл «главной компоненты».
- 13) К сожалению, на картах с исследуемыми характеристиками не указаны собственно пункты GPS. Это представляется важным, так как неоднородная плотность распределения этих пунктов может существенно отразиться на результатах анализа. Это особенно важно на территориях, занятых водной поверхностью, как в случае Японского архипелага, где не менее 60% исследуемой площади залито водой. Как неохваченные пунктами наблюдений области могут связываться с положением подводного сейсмического очага.
- 14) На рис. 3.1.2 и других цветовые шкалы подрисунков неодинаковые, что мешает визуальному сопоставлению полученных картин.
- 15) На стр. 95 сделан вывод о том, что распределения исследуемых характеристик не связаны с высокой сейсмической активностью за 2009-2015 гг. В то же время, например, минимальное значение главной компоненты точно совпадает с эпицентром землетрясения с $M=7.2$, произошедшего 4 апреля 2010 г. вблизи граница США и Мексики.
- 16) Так как «уменьшение хаоса» перед моментом сильного землетрясения согласуется с рядом сейсмических гипотез, то хотелось бы пожелать автору сопоставить его оценки с аналогичным анализом сейсмического процесса в исследуемом регионе.
- 17) В тексте было бы желательно увидеть в каких системах координат представлены анализируемые временные ряды. У разных авторов они могут быть получены в разных системах координат, что может отягощать результаты анализа, который предполагает наличие единой общей для всех рядов системы

Высказанные замечания не снижают высокой и заслуженной оценки работы диссертанта, а, в первую очередь, указывают ему направление дальнейшего совершенствования оригинальных методов и их реализации на материалах натурных наблюдений.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация Яковлева П.В. «Анализ пространственно-временных особенностей временных рядов GPS для выделения областей интенсивных движений земной коры» представляет собой завершённую научно-исследовательскую работу.

Полученные Яковлевым П.В. научные результаты имеют высокую значимость для оценки естественной сейсмичности регионов земной поверхности и для анализа любых других временных рядов в целом.

Диссертационная работа Яковлева П.В. хорошо оформлена и изложена строгим научным языком. Текст автореферата полностью отражает текст диссертационной работы.

Работа отвечает требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор Яковлев П.В. заслуживает присуждения искомой ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

«Я, Кафтан Владимир Иванович, даю свое согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку»

Главный научный сотрудник
лаборатории геодинамики
Федерального государственного бюджетного
учреждения науки Геофизического центра
Российской академии наук (ГЦ РАН)
ул. Молодежная, д. 3, г. Москва, 119296
тел. (495) 930-55-09

доктор технических наук  Владимир Иванович Кафтан

Отзыв рассмотрен и обсужден на заседании лаборатории геодинамики ГЦ РАН, одно из основных направлений научно-исследовательской деятельности которой – мониторинг движений и деформаций земной поверхности в районах ответственных объектов и сейсмической активности, 25 августа 2016, протокол № 4, и одобрен в качестве официального отзыва ведущей организации.

Подпись сотрудника В.И. Кафтана заверяю,
Зав. отдела кадров ФГБУН ГЦ РАН

 Вера Петровна Дасаева