

**ОТЗЫВ  
ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

**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»**

г. Москва

23 августа 2016 г.

Рассматриваемая диссертационная работа посвящена развитию новых подходов к обработке временных рядов GPS для анализа пространственно-временных особенностей их тонкой структуры и опробованию этих подходов на большом массиве экспериментальных данных.

Целью диссертационной работы Яковлева П.В. является разработка методов и алгоритмов для анализа нерегулярной (шумовой) составляющей временных рядов GPS для выделения на поверхности Земли регионов, характеризующихся повышенной интенсивностью движений малых блоков земной коры.

**Актуальность** диссертационной работы не вызывает сомнения. Последние десятилетия прослеживается явная тенденция к увеличению сейсмической активности Земли. При этом наблюдается как увеличение количества сильных землетрясений, так и появление ощутимых сейсмических толчков в ранее асейсмичных густонаселенных районах. Для изучения эффекта активизации сейсмичности, разработки моделей различных сейсмических проявлений в литосфере Земли и их связи на разных уровнях энергетических масштабов и в разном частотном диапазоне, прежде всего, необходим непрерывный мониторинг деформационных

процессов в широком диапазоне частот. В частности, в малоизученном сверхдлиннопериодном диапазоне, который изучается в данной работе.

Разработка методов контроля деформационных процессов и прогноза возможных катастроф чрезвычайно важны также для обеспечения безопасности строительства и эксплуатации подземных сооружений, таких как метро, тоннели, подземные выработки. На разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых, особенно при наличии сильных проседаний земной поверхности.

В связи с этим, наряду с сейсмическими станциями все большую популярность завоевывают стационарные станции GPS, регистрирующие трехкомпонентные смещения земной поверхности. Отрядным фактом для исследователей является то, что данные более одиннадцати тысяч станций GPS, расположенных по всему миру, находятся в открытом доступе. Наиболее густые сети станций расположены в Соединенных Штатах Америки, Японии и Европе.

Диссертант умело использовал информационные возможности. В его работе приведены результаты анализа 30-минутных временных рядов GPS для островов Японии за период, включающий в себя сильнейшее землетрясение в Тохоку магнитудой 9, произошедшее 11.03.2011. Также представлены результаты анализа дневных сигналов GPS для тихоокеанского побережья Соединенных Штатов Америки в период с 01.01.2009 по 01.12.2015. Оба района исследований характеризуются высокой сейсмической и вулканической активностью и являются интересными для поиска индикаторов подготовки природных катастроф по сейсмическим наблюдениям.

## Содержание диссертационной работы

Диссертационная работа Яковлева Павла Викторовича состоит из 115 страниц машинописного текста и содержит 37 рисунков и 3 таблицы. Список использованной литературы состоит из 95 наименований.

Основной идеей диссертационного исследования является изучения шумовой компоненты временных рядов GPS. В первой главе диссертации Яковлевым П.В. рассмотрены основы мультифрактального анализа сигналов, зарекомендовавшего в настоящее время себя для поиска скрытых структур в изучаемых объектах, которые зачастую невозможно наблюдать напрямую, но которые, в свою очередь, оказывают существенное влияние на характеристики объекта. Примерами событий во временных рядах, сильно влияющих на различные свойства сигналов, являются выбросы и скачки среднего уровня, которые, как правило, перед анализом устраняются, так как предполагается, что никакой информации они в себе не несут. В первой главе диссертации автор объясняет статистическую значимость данных событий и предлагает искать их для последующего изучения.

Вторая глава посвящена разработке новых методов для выделения упомянутых выше событий. Для выделения скачков среднего уровня Яковлев П.В. предложил понятие псевдо-производной, которая является мерой изменчивости временного ряда. Подобно классической производной, с помощью псевдо-производной возможно осуществлять поиск экстремальных значений временного ряда, точек его перегиба, оценивать тенденции изменения значений сигнала и т.д. Преимуществом псевдо-производной является ее масштабная зависимость, поэтому данный анализ можно проводить при различных масштабах. На основе введенного понятия псевдо-производной Яковлев П.В. предложил метод построения кусочно-ступенчатой аппроксимации временных рядов для дальнейшей оценки



скачков среднего уровня. Производительность предложенного метода значительно выше производительности существующих методов, основанных на дискретном и непрерывном вейвлет-преобразованиях, что делает его пригодным для анализа большого объема данных, в частности данных GPS. В конечном итоге автор диссертации предлагает метод построения вспомогательного временного ряда, нормализованная энтропия которого отражает наличие значимых скачков в исследуемом сигнале.

Меру выбросов также определяет значение нормализованной энтропии, однако уже для другого вспомогательного временного ряда, построенного на основе оценки изменчивости среднеквадратического отклонения относительно значений слева и справа. Предложенная автором формула позволяет построить такой вспомогательный временной ряд, в котором выбросы легко отделимы от остального шума, а с помощью выведенных рекуррентных соотношений это также, как и в случае со скачками, возможно осуществить для большого объема данных.

В третьей главе построены карты пространственного распределения нормализованной энтропии выбросов и скачков и сравнены с картами распределения других статистических параметров, в том числе и мультифрактальных. В результате исследования было выявлено, что областям, в которых значение нормализованной энтропии скачков мало, соответствуют области с пониженной корреляцией шума. Это связано с наличием в этих регионах интенсивных движений, вызывающих разнообразный шум, в следствие чего число скачков там увеличивается, а значение корреляции падает. В подтверждение этой гипотезы автором построены карты спектральной экспоненты, мультифрактальных параметров и логарифма дисперсии, также указывающие на наличие разнообразия шумовой составляющей.

В заключении представлены основные результаты работы и перспективы дальнейших исследований.

### **Научная новизна и практическая значимость диссертационной работы**

В результате диссертационного исследования Яковлев Павел Викторович разработал новый математический инструмент для выделения таких особенностей временных рядов, как скачки и выбросы. Наиболее интересным результатом является метод построения карт пространственного распределения вычисленных статистических характеристик, последовательность которых может быть использована для выделения областей интенсивных движений земной коры, оценки сейсмической активности того или иного региона Земли и прогноза сильных землетрясений.

### **Обоснованность и достоверность полученных результатов**

Строгость используемого математического аппарата обеспечивает достоверность полученных научных результатов, которые соответствуют особенностям геологического строения исследуемых регионов.

### **Замечания и рекомендации**

По диссертационной работе Яковлева П.В. можно сделать некоторые замечания и высказать следующие рекомендации:

1. В тексте диссертации упомянуты временные ряды с шагом дискретизации 5 минут с почти 9 тысяч GPS станций, которые, как можно

полагать, не менее информативны, чем суточные и 30-минутные сигналы, однако их результаты их анализа в работе отсутствуют.

2. Безусловно интересно было бы взглянуть на результат предложенного анализа не только для Японии и США, чья сейсмическая активность не вызывает ни у кого сомнения, но и для других территорий. Неоспоримый интерес вызывает и глобальная карта сейсмичности.

3. Карты нормализованной энтропии выбросов, показавшие на примере Великого японского землетрясения качественно хороший результат, не приведены для территории США.

4. Интересно было бы увидеть сравнение карт **экстремумов трендов смещений** и карт аномалий по **флуктуациям смещений**.

Известно, например, что поверхность почвы на территории крупных городов при отборе грунтовых вод начинает быстро проседать - современный Пекин по этой причине опускается на 11 см в год. Аналогичные явления происходят на разрабатываемых месторождениях полезных ископаемых. Оседания и горизонтальные смещения происходят неравномерно, наблюдаются выделенные локальные зоны, где они максимальны и могут существенно превышать средние значения. Для данных спутниковой геодезии характерные линейные размеры локальных зон, конечно, больше, чем в вышеупомянутых случаях, но аналогия механизмов может наблюдаться.

Для построения геофизических моделей интересен вопрос: совпадают ли аномалии по флуктуациям, рассматриваемые как признак локализации наибольшей подвижности блоков, с центрами зон наибольшего проседания и горизонтальных смещений? или с границами этих зон? или совпадения отсутствуют?

5. Для построения геофизических моделей также интересно сравнение карт **экстремумов трендов смещений** и карт аномалий по **флуктуациям**



**смещений** при существенно различных временных масштабах, в частности, при дискретизации 5 мин, 30 -60 мин, сутки.

6. По данным Великого Японского землетрясения для карт нормализованной энтропии скачков и выбросов аномально низкие значения до землетрясения существенно смещены к северу от эпицентра, а после землетрясения аномалия проходит прямо через эпицентр. Положение аномалии после землетрясения в работе объяснено наличием авершоков, однако не обсуждается с чем может быть связано смещение аномалии значений карт относительно эпицентра до землетрясения. Подобное смещение наблюдается и для приведенных в работе карт других геофизических индикаторов для этих же сейсмических данных. Может ли этот эффект быть связан с особенностями алгоритма обработки или можно сделать вывод, что сейсмическая опасность связана не с центром аномалии, а лежит на ее периферии? Интересно, наблюдается ли подобная закономерность для других землетрясений?

В целом высказанные замечания имеют рекомендательный характер и ни в коем случае не снижают научную и практическую значимость результатов диссертационной работы.

### **Заключение**

Диссертация Яковлева Павла Викторовича является законченной научно-квалификационной работой и соответствует требованиям, предъявляемых ВАК к кандидатским диссертациям. Основные результаты диссертационного исследования полностью отражены в публикациях в научных изданиях, 4 из которых входят в список рекомендованных ВАК (1 работа на иностранном языке).

Текст автореферата соответствует тексту диссертационной работы.

Диссертация Яковлева П.В. выполнена на высоком научном уровне, написана хорошим литературным языком, все положения изложены четко и ясно, прекрасно иллюстрированы.

На основании вышеизложенного можно сделать вывод, диссертация Яковлева П.В. соответствует требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.10 – «Геофизика, геофизические методы поисков полезных ископаемых».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук,  
главный научный сотрудник

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института проблем нефти и газа Российской академии наук (ИПНГ РАН),

Адрес: 119333, Москва, Губкина ул., д. 3, ИПНГ РАН,

<http://www.ipng.ru>

Тел:+7(917)5858113, e-mail: [irinache@inbox.ru](mailto:irinache@inbox.ru)

Чеботарева Ирина Яковлевна.

«Я, Чеботарева Ирина Яковлевна, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку»

Подпись Чеботаревой Ирины Яковлевны удостоверяю.  
Старший инспектор по кадрам ИПНГ РАН



Невешкина Св. М.