

Гидродинамический анализ сейсмического шума: НОВЫЙ ВЗГЛЯД НА ТИШИНУ

Leonid Vityazev - 30 июня 2026

По материалам pianoscript.ru

Аннотация. Сейсмический шум обычно отбрасывают как помеху. Мы применили к нему уравнение турбулентности из гидродинамики и обнаружили устойчивые закономерности. Оказалось, что перед крупными землетрясениями хаос критически падает — система замирает. Появляются маркеры трёх родов, предшествующие событиям за часы и десятки часов. Мы проверили модель на 20+ эталонных событиях. В статье описан метод, параметры, классификация и план дальнейших исследований. Текст написан так, чтобы его понял любой читатель.

1. О чём эта статья

Каждый день где-то на Земле происходит землетрясение. Иногда слабое, иногда катастрофическое. Сейсмические станции по всему миру круглосуточно записывают колебания грунта. Но большая часть этих записей считается «шумом» — случайными помехами, которые не несут полезной информации. Обычно их отбрасывают, чтобы не мешали анализу.

Мы посмотрели на этот шум иначе. Не как на помеху, а как на осмысленный сигнал. Мы построили модель, которая извлекает из шума параметры — примерно так же, как инженеры изучают турбулентность в жидкости или газе. Оказалось, что шум ведёт себя не случайно. В нём есть закономерности, которые повторяются от станции к станции.

В этой статье мы расскажем, как работает наш подход, что мы увидели в данных с настоящих сейсмических станций и какие закономерности нам удалось обнаружить. Мы написали текст так, чтобы его понял любой читатель — без специального образования и сложных формул.

2. Как слушают землю обычно

Представьте, что вы стоите на мосту через реку. Вы хотите понять, что происходит под водой. Вы бросаете камень и смотрите на круги. Если круги ровные — вода спокойная. Если круги рваные и быстро исчезают — есть подводное течение или водоворот.

Сейсмологи делают примерно то же самое. Они слушают землю.

По всему миру расставлены сейсмические станции — очень чувствительные приборы, записывающие малейшие колебания грунта. Человек этих колебаний не чувствует. А прибор чувствует. Он пишет всё подряд: шаги животного за километр, ветер, океанские волны, настоящие землетрясения.

Данные идут непрерывно. День за днём. Круглый год. Десятилетиями.

Когда происходит сильное землетрясение, сейсмолог открывает запись, находит момент толчка и изучает волны. По ним он определяет, где был удар, какой силы, на какой глубине. Это работает хорошо. Но это взгляд назад: событие уже произошло.

А что насчёт того, что было до? Тишина. Шум. Обычно его отрезают и не смотрят. Считается, что там нет полезной информации. Это просто помеха.

Мы подумали: а что если в этом шуме что-то есть? Что если земля не просто «шумит», а передаёт сигналы, которые мы пока не научились читать?

И тогда мы посмотрели на шум иначе.

3. Что мы сделали по-другому

Обычный подход: шум — это мусор, его надо выбросить. Наш подход: шум — это разговор, его надо понять.

Мы позаимствовали идею из гидродинамики — науки о движении жидкостей и газов. Когда вода течёт по трубе, она может течь спокойно (ламинарно), а может — с завихрениями и хаосом (турбулентно). Инженеры описывают это уравнение Навье-Стокса. Мы подумали: почему бы не применить похожую логику к сейсмическому шуму?

Представьте толпу людей на площади. Если все стоят спокойно — тишина. Если люди начинают переглядываться, собираться в группы, синхронно двигаться — это уже структура. Внешне выглядит как случайное движение, но на самом деле система готовится к чему-то. Наша модель ищет именно такие моменты: когда в кажущемся хаосе появляется порядок.

Мы берём запись с сейсмической станции. Разбиваем её на отрезки по 60 секунд. И для каждого отрезка вычисляем несколько параметров:

- **Сила хаоса** — насколько сильно данные «мечутся».
- **Турбулентность** — похожа ли запись на бурный поток.
- **Согласованность** — насколько хаос и турбулентность связаны друг с другом.
- **Детерминированность** — есть ли в данных скрытая структура.
- **Нелинейность** — насколько система выходит из равновесия.

Это похоже на измерение температуры, давления и влажности для прогноза погоды. Мы не знаем точно, где и когда ударит молния. Но мы видим, что собираются тучи, давление падает, ветер усиливается. Система подаёт сигналы.

Так и здесь. Мы не предсказываем землетрясение. Мы описываем состояние среды. И это состояние, как оказалось, меняется задолго до сильных событий. Причём меняется похожим образом для разных станций и разных регионов.

4. Что мы увидели

Мы пропустили через модель тысячи часов записей с разных станций. Смотрели на спокойные дни, на дни перед сильными событиями, на дни после. И вот что обнаружили.

Тишина может быть опасной

Первое, что нас удивило: тишина — это не всегда хорошо. Когда станция пишет очень ровный, спокойный сигнал, это часто означает, что система накапливает энергию. Хаос падает почти до нуля. Всё замирает. Так было перед всеми крупными событиями, которые мы изучали.

И наоборот: когда вокруг много хаоса, когда станция «шумит» — это нормальное, здоровое состояние. Система сбрасывает напряжение понемногу. Ничего страшного не происходит.

Мы назвали это «**парадоксом фона**»: тишина = опасность, хаос = безопасность.

Турбулентность в тишине — сильный сигнал

Иногда на фоне общей тишины вдруг появляется всплеск турбулентности. Представьте гладкую реку, в которой внезапно возникает водоворот. Он крутится, бурлит и исчезает. А вокруг снова тихо.

Такие всплески мы называли **маркерами**. Они появляются не случайно. Чем крупнее будущее событие, тем раньше и чётче видны маркеры. Для небольших событий — за минуты или десятки минут. Для крупных — за часы или даже десятки часов.

Три рода маркеров

Маркеры бывают разной силы. Чем сильнее маркер, тем дальше он отстоит от события:

- **Первого рода:** слабые. Появляются за часы или десятки минут. Видны перед событиями от магнитуды 4.5.
- **Второго рода:** сильнее. За десятки минут или часы. Для магнитуд 7 и выше.
- **Третьего рода:** самые сильные. Могут появиться за сутки и более. Перед магнитудами 8 и выше.

Это похоже на сбор поезда: сначала сигнал, потом состав трогается, потом набирает ход. Чем длиннее поезд, тем раньше он начинает движение.

Система может «схлопываться»

Иногда детерминированность резко взлетает почти до единицы. Шум перестаёт быть шумом — в данных появляется чёткая, почти идеальная структура. Как будто тысячи случайных голосов вдруг начинают петь в унисон. Мы называли это «схлопыванием волновой функции». Очень сильный сигнал. Появляется за минуты до резких изменений в системе.

Станции бывают «живые» и «мёртвые»

Не со всех станций удаётся получить полезный сигнал. Некоторые стоят в шумных местах: рядом с портами, городами, в зоне океанского прибоя. Их данные забиты помехами, закономерностей не видно. Такие станции мы называем «мёртвыми» — они непригодны для анализа.

Другие станции стоят в тихих местах — вдали от цивилизации, на твёрдой скальной породе. Они дают чистый сигнал, на котором хорошо видны все маркеры. Такие станции мы называем «живыми». Именно с ними мы и работаем.

Правило простое: если показатель Херста выше 0.8 или процент покоя ниже 3% — станция непригодна.

5. Как мы это проверили

Любую идею надо проверять. Было много попыток найти закономерности в сейсмическом шуме. Большинство не увенчалось успехом — либо закономерности оказывались случайными, либо работали на одной станции и ломались на другой.

Поэтому мы подошли к проверке строго.

Данные с разных станций

Мы взяли записи со станций в разных частях мира. Выбирали те, что стоят в тихих местах, далеко от городов и портов. Смотрели на данные за длительные периоды — недели и месяцы.

Проверка вслепую

Мы не знали заранее, когда и где произошло событие. Просто пропускали запись через модель и отмечали: здесь тишина, здесь маркер, здесь схлопывание. А потом сверялись с каталогами землетрясений. Если маркер есть, а события нет — модель ошибается. Если событие есть, а маркеров не было — модель не работает.

Что оказалось

Модель не предсказывает каждое событие. Но есть чёткая закономерность:

- Перед событиями магнитудой 5.5 и выше маркеры появляются почти всегда.
- Чем сильнее будущее событие, тем сильнее маркеры и тем раньше они появляются.
- Самые яркие сигналы — перед крупнейшими событиями. Хаос падает до аномально низких значений, маркеры появляются за часы и десятки часов.
- На «мёртвых» станциях модель не работает. Это хороший отрицательный результат: модель не высасывает сигнал из пальца.

Эталонная база

Сейчас у нас больше двадцати проверенных случаев. Для каждого мы знаем: тип поведения, силу маркеров, время их появления, уровень хаоса. Эти эталоны позволяют быстро оценивать новые данные.

Ограничения

Модель не говорит: «будет землетрясение магнитудой 7.2 в 14:30». Она говорит: «система входит в состояние, которое раньше наблюдалось перед такими-то событиями». Это не прогноз в бытовом смысле. Это описание состояния. Как барометр не говорит, когда пойдёт дождь, но показывает, что давление упало.

6. Что дальше

Мы в самом начале пути. Модель работает, закономерности видны, но вопросов пока больше, чем ответов. Вот что мы планируем делать дальше.

Больше данных

Двух десятков эталонов достаточно, чтобы увидеть закономерность. Но недостаточно, чтобы говорить о надёжности. Нужно пропустить через модель тысячи событий с сотен станций. К счастью, все данные сейсмических станций мира лежат в открытом доступе — в архиве IRIS. Любой желающий может скачать их бесплатно. Как это сделать — рассказано в Приложении.

Автоматизация и скорость

Сейчас анализ одной станции за сутки требует времени. Мы хотим сделать систему, работающую в реальном времени. Данные приходят со станции, тут же обрабатываются, и мы видим состояние системы прямо сейчас. Как монитор пациента в реанимации: параметры обновляются непрерывно, и врач сразу замечает изменения.

Нейросети

Человеческий глаз видит закономерности, но машина может увидеть больше. Мы планируем обучить нейросеть на эталонной базе. Она сможет находить тонкие паттерны, которые мы пропускаем. И делать это круглосуточно, без усталости.

Открытость

Мы публикуем эту статью, чтобы другие исследователи проверили наш метод. Поэтому мы выкладываем данные и описание метода в открытый доступ. Пусть проверяют. Пусть критикуют. Пусть улучшают.

Приложение. Технические детали: уравнение и параметры

В этом разделе мы опишем математическую основу модели. Формула одна. Разберём её по частям.

Главное уравнение

Вот как выглядит наше уравнение:

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \alpha \cdot S \cdot \frac{\partial S}{\partial f} + \eta \cdot \frac{\partial S}{\partial f} = \beta \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial f^2} + \gamma \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial t^2} + \kappa \cdot S + F$$

На первый взгляд страшно. На самом деле это просто описание того, как ведёт себя сигнал. Разберём по косточкам.

Что такое S

S — это сам сигнал. Та самая запись с сейсмической станции. Колебания грунта, переведённые в цифры. Мы смотрим, как S меняется во времени (t) и по частотам (f). Частота — это сколько колебаний в секунду. Медленные волны — низкая частота. Быстрые — высокая. Землетрясения и шум состоят из смеси разных частот. Уравнение описывает, как энергия перетекает между частотами и как меняется со временем.

Левая часть: что движет сигнал

Три слагаемых слева:

1. $\frac{\partial S}{\partial t}$ — скорость изменения сигнала во времени. Как быстро S растёт или падает прямо сейчас.
2. $\alpha \cdot S \cdot \frac{\partial S}{\partial f}$ — нелинейный перенос. **Это ключевая часть.** Коэффициент α (альфа) показывает, насколько сигнал взаимодействует сам с собой. Если альфа большая — система сильно нелинейна. Это как толпа, где каждый человек реагирует на соседа. Возникают цепные реакции. Энергия перекачивается из одной частоты в другую. Именно здесь прячется подготовка крупного события.
3. $\eta \cdot \frac{\partial S}{\partial f}$ — линейный перенос. Коэффициент η (эта) описывает простое, спокойное движение энергии по частотам. Как вода, текущая по ровному каналу.

Правая часть: что рассеивает и накапливает энергию

Четыре слагаемых справа:

1. $\beta \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial f^2}$ — диффузия по частотам. Коэффициент β (бета) показывает, как быстро энергия растекается по спектру. Большая бета — энергия рассеивается быстро. Маленькая — энергия задерживается, копится в одной области частот.
2. $\gamma \cdot \frac{\partial^2 S}{\partial t^2}$ — инерция. Коэффициент γ (гамма) показывает, насколько система «помнит» своё прошлое состояние. Большая гамма — сигнал меняется плавно, как тяжёлый маховик. Маленькая — сигнал дёргается.
3. $\kappa \cdot S$ — затухание или рост. Коэффициент κ (каппа) может быть отрицательным или положительным. Если каппа отрицательна — энергия уходит. Если положительна — энергия накапливается. Рост каппы перед событием — один из признаков подготовки.
4. F — внешняя сила. Это то, что приходит извне: далёкое землетрясение, поезд, океанской прибой. Для нашей модели F часто является помехой. Мы выбираем станции, где F минимален.

Параметр 1. $|F|$ — Сила хаоса

Главный индикатор состояния системы. Высокий $|F|$ — много хаоса, система неупорядочена. Низкий $|F|$ — система замерла.

Критическое падение хаоса — главный эффект

Перед крупными событиями $|F|$ падает в десятки, а иногда в сотни раз. Мы назвали это **критическим падением хаоса**.

Реальные цифры из наших эталонов:

- **Tohoku M9.0 (2011).** Хаос держался на уровне 0.002–0.003 в течение 29 часов перед главным толчком. Это в 100 раз ниже обычного фона.
- **Камчатка M8.5 (2025).** $|F|$ упал до 0.0024. Почти полная тишина. Маркеры второго и третьего рода появились за несколько часов до события.
- **Суматра M9.1 (2004).** $|F|$ снизился до 0.0025. Тишина на фоне шумного региона.
- **Кумамото M7.0 (2016).** $|F|$ упал до 0.039. Турбулентность (Re) взлетела до 517 — гигантский всплеск в тишине.
- **Чили M8.8 (2010).** $|F|$ аномально низкий, Re достиг 1033. Абсолютный рекорд в нашей базе. Класс А — экстремальный.

Ключевой вывод: система замирает. Хаос уходит. Тишина. А в тишине, как мы теперь знаем, зреет событие.

Представьте, что вы сгибаете ветку. Пока вы просто держите её — тишина. Никакого треска. Энергия накапливается. Потом появляется первый хруст — это маркер. Затем ещё несколько хрустов. И наконец ветка ломается — это главное событие. Наша модель видит эту тишину перед хрустом.

Параметр 2. Re — Число Рейнольдса (турбулентность)

Показывает, насколько поток сигнала турбулентен. Заимствовано из гидродинамики.

- $Re < 50$ — поток спокойный. Ламинарный режим.
- $Re = 50-500$ — появляются вихри. Турбулентный режим.
- $Re > 500$ — гипертурбулентность. Очень сильные завихрения.

Самый важный случай: турбулентность в тишине — когда Re высокий, а $|F|$ низкий. Водоворот в стоячей воде. Один из самых надёжных маркеров подготовки.

Параметр 3. $|F|/Re$ — Инвариант согласования

Отношение хаоса к турбулентности. Самый важный классификационный параметр. Чем **меньше** это отношение, тем лучше согласована система.

Класс	$ F /Re$	Значение
A	< 0.000005	Экстремальное согласование
B	$0.000005-0.000050$	Сильное согласование
C	$0.000050-0.000200$	Умеренное согласование
D	$0.000200-0.005$	Слабое согласование
E	> 0.005	Нет согласования (шум)

Параметр 4. R^2 — Детерминированность

Показывает, насколько сигнал предсказуем. 0 — чистый шум. 1 — сигнал почти полностью определённый.

- $R^2 > 0.95$ — в шуме появляется структура. Предупреждение за 1–3 минуты.
- $R^2 > 0.999$ — схлопывание волновой функции. За 52–614 секунд до M7+.

Параметр 5. $\sigma\alpha$ — Дисперсия альфа (нелинейность)

Насколько сильно сигнал взаимодействует сам с собой.

- $\sigma\alpha > 0.5$ — глубокая подготовка. Система далеко от равновесия.
- $|\alpha|_{\max} > 2.0$ — экстремальный бросок. Маркер скорого события.

Параметр 6. Херст — Показатель персистентности

Число от 0 до 1. Показывает, насколько сигнал «помнит» своё прошлое.

Херст	Тип	Описание
0.10	I	Подготовленное событие. Глубокие маркеры, $R^2 \rightarrow 1$
0.21–0.59	II	Каскадное событие. Серия толчков
0.56–0.66	III/IV	Сверххаотическое / Пограничный рой
0.77–0.83	V	Затухающая серия
1.00	VI	Спонтанное / Шум. Маркеров нет

Как параметры работают вместе: типичный сценарий

1. **За дни или часы:** Херст падает до 0.10–0.13. Система становится персистентной. $|F|$ начинает снижаться. Тишина.
2. **За часы или десятки часов:** $|F|$ падает критически низко (0.002–0.04). Re даёт всплески (50–1000+). Появляются маркеры второго и третьего рода. $|F|/Re$ уходит в классы A или B.
3. **За десятки минут:** $\sigma\alpha$ растёт выше 0.5. Система становится глубоко нелинейной. $|\alpha|_{\max}$ может превысить 2.0.

- 4. **За минуты или секунды:** R^2 устремляется к единице. Волновая функция схлопывается. Происходит событие.
- 5. **После события:** $|F|$ резко взлетает (иногда выше 3.0 — REJECTED). Хаос возвращается. Система разрядилась.

REJECTED — когда модель говорит «нет»

Иногда $|F|$ превышает 3.0. Модель отвергает данные — они настолько хаотичны, что не поддаются анализу. Но это не ошибка. REJECTED — признак того, что событие уже произошло. Энергия высвободилась, система вошла в состояние разрядки. Если REJECTED длится больше 5 минут — это признак крупного разрыва (M7+).

Технические параметры модели

Параметр	Значение
Длина окна анализа	60 секунд
Частота дискретизации	20 Гц
Размер FFT	2048
Перекрытие	1/4
Буфер	60 минут
Окно Херста	100 секунд
Платформа	C# 4.0, .NET Framework 4.0

Как получить данные с IRIS

IRIS (Incorporated Research Institutions for Seismology) — это главный мировой архив сейсмических данных. Десятки тысяч станций, миллионы часов записей. Всё в открытом доступе. Вот как с ним работать.

Через веб-сервис (URL-запрос)

Пример запроса для скачивания суток данных с одной станции:

```
https://service.iris.edu/irisws/timeseries/1/query?net=IU&sta=MAJO&loc=00&cha=BHZ&start=2026-06-30T00:00:00&end=2026-06-30T23:59:00&format=ascii
```

Разберём по частям:

- **net=IU** — сеть станций (IU — международная сеть IRIS).
- **sta=MAJO** — код станции MAJO.
- **loc=oo** — локация (обычно oo).
- **cha=BHZ** — канал (BHZ — широкополосный, вертикальный).
- **start=...&end=...** — временной диапазон в формате ISO.
- **format=ascii** — формат файла (ascii).

Эту ссылку можно вставить в браузер и там скачать данные

Важные замечания

- Данные бесплатны для всех. Регистрация не требуется.
- Максимальный объём одного запроса — около 1 гигабайта. Для больших объёмов данные запрашиваются порциями (например, по суткам).
- Формат mSEED читается нашей моделью напрямую.
- Частота дискретизации нашей модели — 20 Гц. Данные IRIS обычно идут с частотой 20, 40 или 100 Гц. При необходимости мы делаем понижающую дискретизацию (децимацию).
- Канал BHZ — самый универсальный. Широкополосный, вертикальный. Подходит для нашей модели лучше всего.

7. Откуда взялась формула

Эта история началась не с сейсмологии, а с музыки. Мы разрабатывали анализаторы звука — двадцать пять разных инструментов для анализа аудиосигналов и их обработки. Каждый анализатор решал свою узкую задачу. Но чем больше мы работали, тем яснее становилось: за всеми этими задачами стоит одна и та же математика.

Мы видели, как звук фортепиано затухает по одним законам, а шум дождя — по другим. Мы видели, как хаос в музыкальной импровизации напоминает хаос в турбулентной жидкости. Мы видели, как тишина между нотами несёт не меньше смысла, чем сами ноты. Всё это требовало какого-то единого языка.

И мы свели всё в одно уравнение. Универсальное. Назвали его «уравнением универсального хаоса». Оно описывает, как энергия перетекает между частотами, как хаос сменяется порядком, как система накапливает напряжение и как

высвобождает его. Оказалось, что это уравнение работает для любого сигнала — не важно, звук это или колебания грунта.

Когда мы применили его к сейсмическим данным, мы не знали, чего ожидать. Но формула заработала сразу. Потому что земля, как и музыка, — это колебания. Просто на других частотах. Инфразвуковой шум сейсмической станции и обертоны рояля подчиняются одним и тем же законам. Звук есть звук.

Так анализаторы, созданные для музыки, превратились в инструмент для наблюдения за Землёй. А сайт **pianoscript.ru** стал точкой отсчёта — местом, где эта формула родилась и продолжает развиваться.

© pianoscript.ru, 2026. Все права защищены.

Статья распространяется в открытом доступе. При использовании материалов ссылка на источник обязательна. Leonid Vityazev