



О фрактальной структуре высотных грозовых разрядов в ионосфере: эльфы, джеты и спрайты

А.А. Потапов

Д.ф.-м.н, профессор, главный научный сотрудник,

Главный редактор журнала «НЕЛИНЕЙНЫЙ МИР»,

Институт Радиотехники и Электроники им. В.А. Котельникова РАН

<http://www.potapov-fractal.com>; potapov@cplire.ru

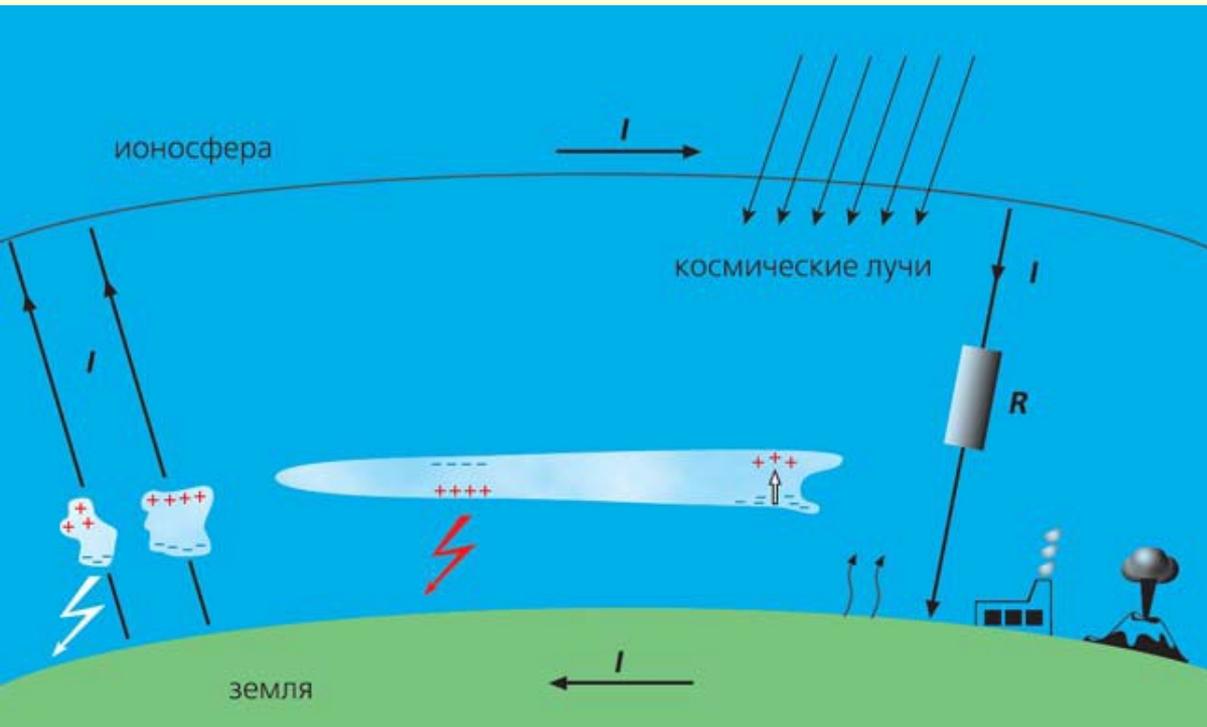
Начиная с середины 90-х годов XX века в центре внимания физиков оказалось новое явление – **грозовой электрический разряд** в средней атмосфере на высотах от 20 до 100 км, лежащих выше абсолютного большинства облаков. Это приводит к возникновению нескольких абсолютно новых классов разрядных явлений.

В работе приведены результаты исследований фрактальных характеристик **джетов и спрайтов** – наиболее интересных типов высотных разрядов в ионосфере. Даны кратко их физические характеристики.

Полученные результаты дают основу для более глубокого понимания развития, релаксации таких атмосферных процессов и учета действия такого рода естественных сверхмощных природных помех на функционирование разнообразных радиосистем авиационного и космического уровня. Данные могут быть полезны при теоретическом рассмотрении таких разрядов как **гигантского природного солитона**.

Первые результаты фрактально-скейлинговой обработки таких природных и искусственных образований в ионосфере ранее были доложены на Международной конференции «Турбулентность и волновые процессы», посв. 100-летию со дня рождения академика Михаила Дмитриевича Миллионщикова (1913 - 1973 гг.) – **МГУ (26 – 28 ноября 2013 г.)**.

Схема атмосферной глобальной электрической цепи (ГЭЦ)



Глобальная электрическая цепь или ГЭЦ представляет собой распределенный токовый контур, которые “замкнуты” электрически проводящей атмосферой. ГЭЦ состоит из совокупности твердых и газоплазменных оболочек, объединенных непрерывностью плотности электрического тока, с грозowymi генераторами в качестве основных источников электродвижущих сил и невозмущенными областями свободной атмосферы в качестве зон возвратных токов. Физической причиной формирования ГЭЦ в атмосфере служит резкий рост проводимости воздуха с высотой. Вблизи поверхности Земли проводимость воздуха очень мала и составляет $(2\div 3)\cdot 10^{-14}$ См/м, что соответствует концентрации легких ионов около $10\cdot 3$ см⁻³.

С ростом высоты благодаря увеличению уровня ионизации, определяемого до 40 км галактическими космическими лучами, а выше – ультрафиолетовым и рентгеновским излучением Солнца, проводимость растет почти экспоненциально с характерным масштабом 6 км. Уже на высоте H слоя ионосферы (около 80 км) она увеличивается более чем на 10 порядков по сравнению с тропосферой. Проводимость земли в поверхностном слое (и тем более воды в океане) тоже превышает проводимость пограничного слоя атмосферы на 10 ... 12 порядков.

Таким образом, постоянно функционирующие грозовые генераторы оказываются сосредоточенными в достаточно узком слабопроводящем слое между земной поверхностью и ионосферой. Часто при упрощенном описании ГЭЦ земная поверхность и нижняя граница ионосферы (около 60 - 70 км) рассматриваются как обкладки гигантского сферического конденсатора, который разряжается в областях хорошей погоды и заряжается в областях грозовой активности. При этом квазистационарные токи зарядки не замыкаются полностью на землю вблизи грозовых облаков, а частично “затягиваются” в вышележащую область высокой проводимости и растекаются по ионосфере. Считается, что именно квазистационарные токи в первую очередь “несут ответственность” за поддержание разности потенциалов ≈ 350 кВ между ионосферой и землей. 4

Эльфы, джеты, спрайты и т.д.

Каждые сутки небо прочерчивают 4 миллиона молний, ежесекундно – примерно 50.

А над свинцовыми грозовыми фронтами, в верхних слоях атмосферы разворачивается световое шоу “призрачных молний”: голубые джеты, красно-фиолетовые спрайты, красные кольца парящих в вышине эльфов.

Это разряды очень высокой энергии, которые бьют не в землю, а в ионосферу.

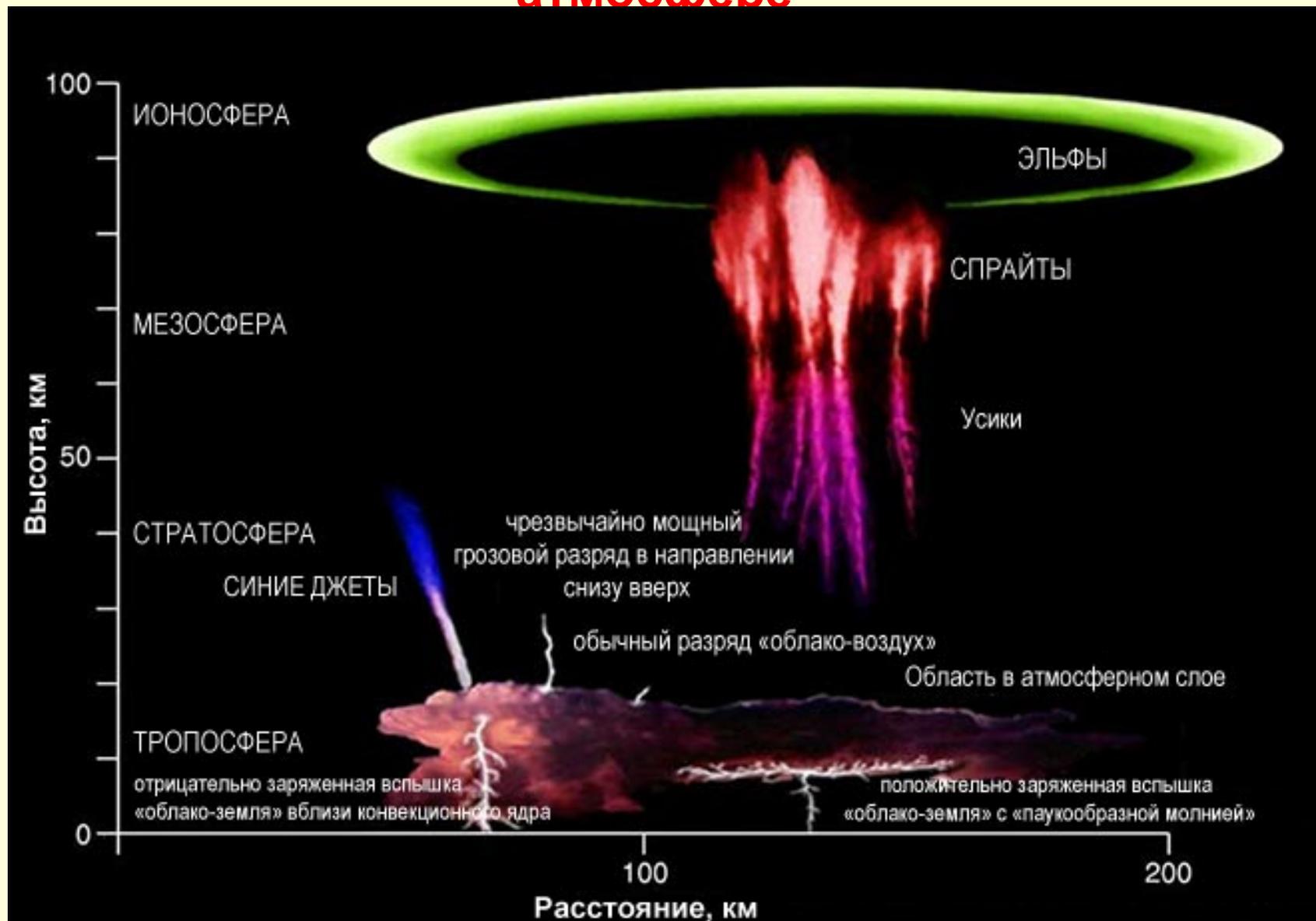
В настоящее время, высотные электрические разряды (20 ... 100 км) подразделяются на несколько основных типов: эльфы, джеты, спрайты, гало и т.д.

Физические модели спрайтов, эльфов и джетов до сих пор остаются предметом острых дискуссий. Динамические пространственно-временные особенности и морфология спрайтов могут быть объяснены, в частности, фрактальной геометрией разрядов и перколяцией. Мы имеем здесь еще один пример самоорганизованной критичности, когда динамика системы (в данном случае высотного разряда) обусловлена достижением порога так называемой направленной перколяции, которая характеризует формирование разветвленных (фрактальных) проводящих каналов, перекрывающих всю длину спрайта.

Иначе обстоит дело с вопросами статистической обработки данных. Здесь по традиции используют классические методы. Это не позволяет извлечь всю информацию о таких новейших атмосферных структурах.

Применение математической теории дробной меры и фракталов открывает для физиков и экспериментаторов целый ряд новых методологических принципов. В частности, при такой фрактальной обработке можно исследовать топологию самих разрядов во времени и пространстве.

Динамические фрактальные структуры в атмосфере



Краткая их история - в ночь с 5 по 6 июля 1989 года, в истории изучения Земли произошло важное событие. Джон Рандольф Уинклер, отставной профессор, 73-летний ветеран NASA, направил на грозовые облака высокочувствительную видеокамеру, а потом, просматривая запись, кадр за кадром, обнаружил две яркие вспышки, которые в отличие от молний шли не вниз, к земле, а вверх, к ионосфере. Так были открыты **спрайты** - самые крупные из высотных разрядов в атмосфере Земли. Они наглядно подтвердили существование на нашей планете ГЭЦ и дали новые возможности для ее исследования. Его статьи буквально вызвали шок у специалистов по астрономии, атмосферному электричеству, радиофизике, атмосферной акустике, физике газового разряда и аэрокосмической безопасности. После этих публикаций в NASA уже не могли отмахнуться от возможной угрозы космическим кораблям и начали развернутое исследование высотных разрядов.

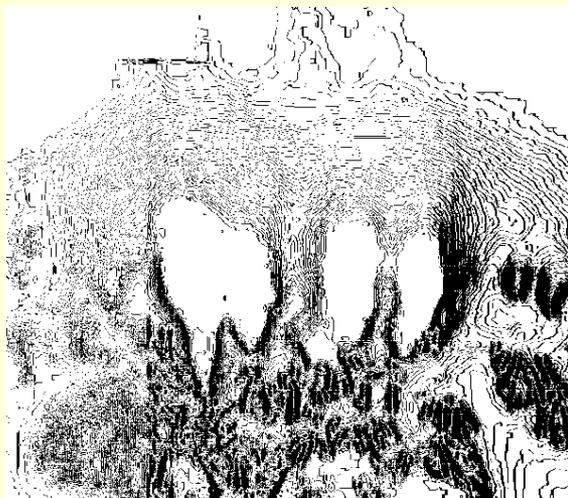
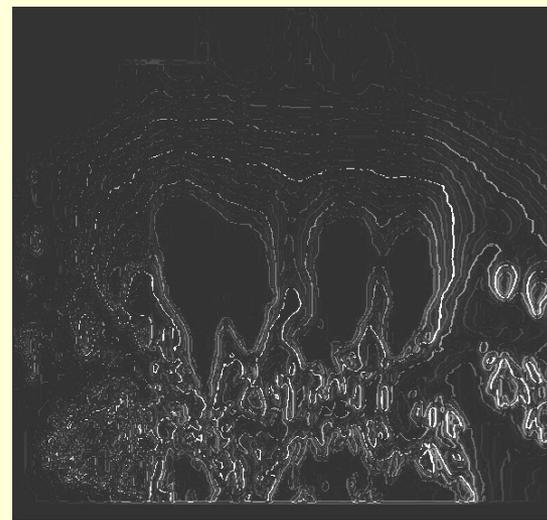
Самые короткоживущие высотные разряды - **эльфы** возникают в нижней ионосфере на высотах 80 ... 100 км. Возникнув в центре, свечение расширяется до 300 ... 400 км, меньше чем за миллисекунду, а затем угасает. Рождаются эльфы через 300 микросекунд после сильной молнии, ударившей из грозового облака в землю. Ствол молнии становится “передающей антенной”, от которой со скоростью света “стартует” мощная сферическая электромагнитная волна очень низкой частоты. За 300 микросекунд она добирается до высоты 100 км, где “возбуждает” красное свечение молекул азота.

Самые загадочные высотные разряды – **голубые джеты**, это также свечение молекул азота в ультра-фиолетово-голубой полосе. Они выглядят как голубой узкий перевернутый конус, “стартующий” с верхней границы грозового облака. Иногда джеты достигают высоты 40 км, скорость распространения их от 10 до 100 км/с. Их появление не всегда связано с разрядами молний. Кроме голубых джетов выделяют “голубые стартеры” (распространяются до высот 25 км) и “гигантские джеты” (распространяются до высот нижней ионосферы примерно 70 км). Гигантские джеты наблюдаются очень редко; к настоящему времени насчитывают не более дюжины таких событий. Интерес физиков к гигантским джетам под стать их размерам, ведь эти разряды совершают “беспосадочный перелет” из тропосферы прямо в ионосферу.

Спрайты - очень яркие объемные вспышки длительностью порядка миллисекунд, возникающие на высоте 70 - 90 км и спускающиеся вниз на 30 - 40 км. Их ширина достигает в верхней части десятки километров. Спрайты вспыхивают в мезосфере примерно через сотую долю секунды после разряда мощных молний “облако - земля”, иногда на удалении несколько десятков километров по горизонтали от канала молнии. Красно-фиолетовый цвет спрайтов, как и эльфов, связан с атмосферным азотом. Частота появления спрайтов – порядка нескольких тысяч событий в сутки по всему земному шару. Им посвящено наибольшее количество работ высотным разрядам в ионосфере. Тонкая структура нижней части спрайтов характеризуется множеством светящихся каналов с поперечными размерами от десятков до сотен метров. Возникновение спрайтов связано с образованием высокого дипольного момента нескомпенсированного заряда, после особенно мощных молниевых разрядов облако-земля, обычно положительной полярности.



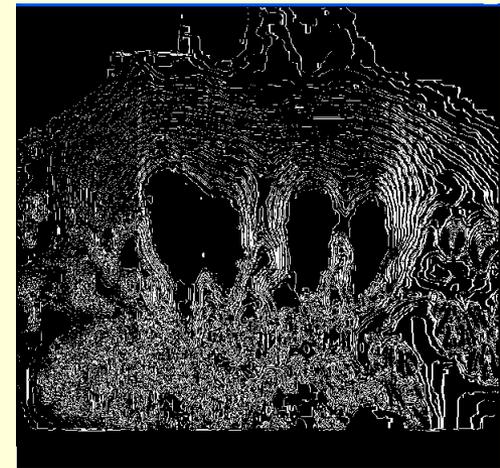
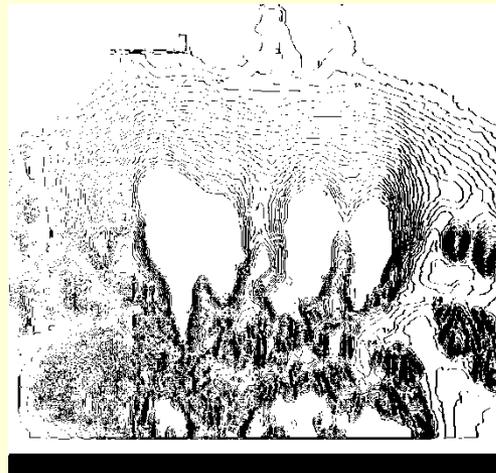
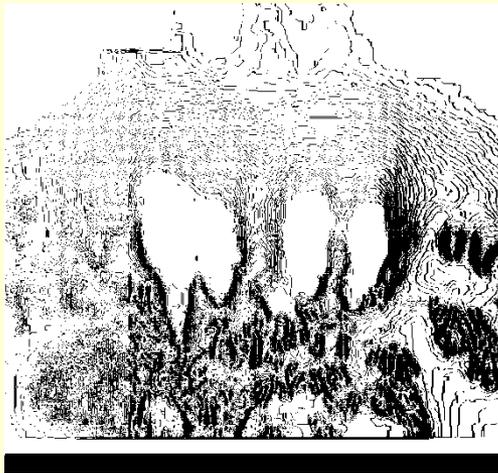
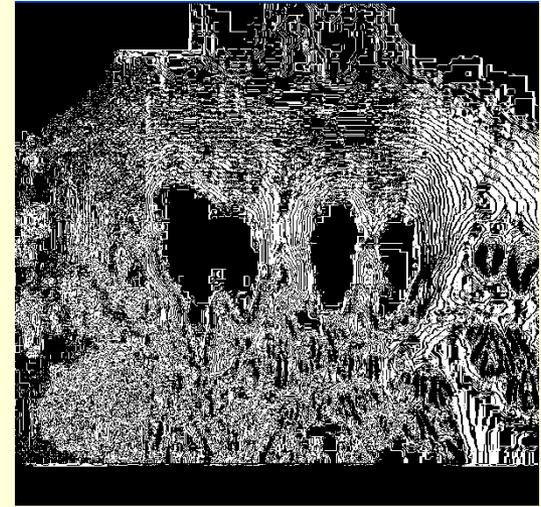
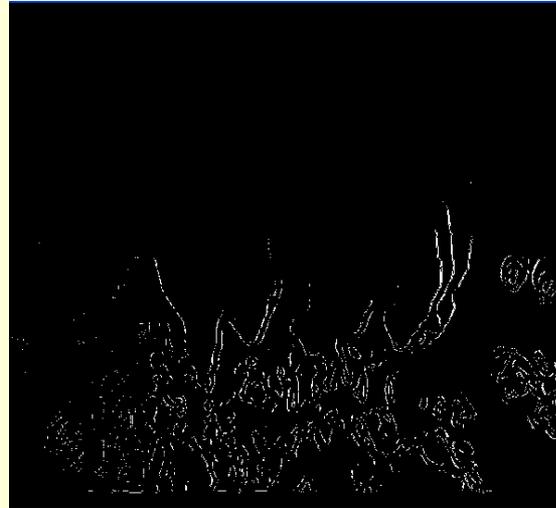
Фрактально-скейлинговая обработка изображения спрайта



Результаты фрактальной фильтрации изображения спрайта:

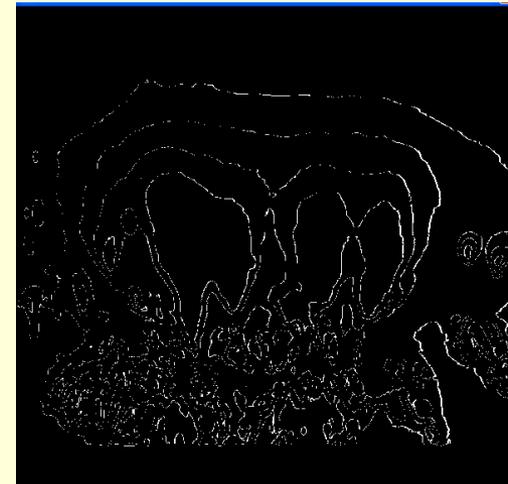
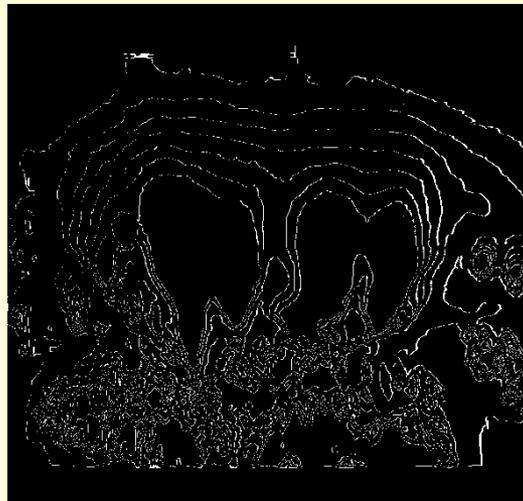
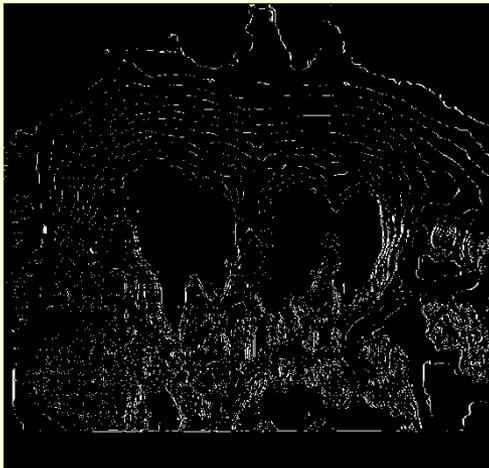
- (а) - исходное изображение спрайта (США, NASA [8]),
- (б) – карта оценок фрактальной размерности со средним значением фрактальной размерности $D = 2,43$,
- (в) - срез карты по значению $D = D - 0,05$.
- (Четко различаются внешние, основные и сверхтонкие структуры спрайта).

Фрактально-скейлинговая обработка изображения спрайта (продолжение)

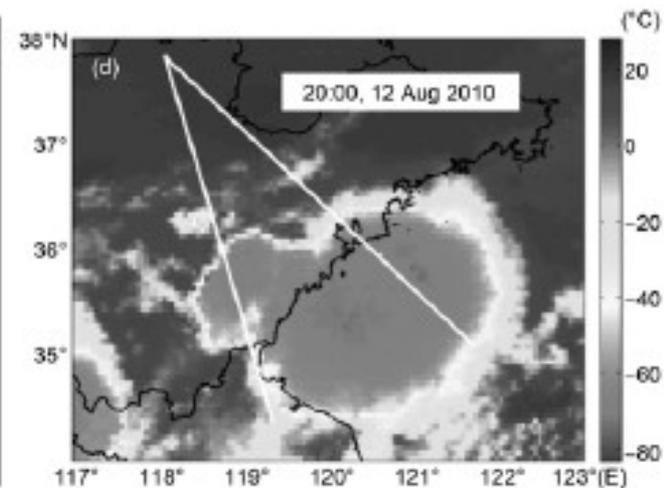
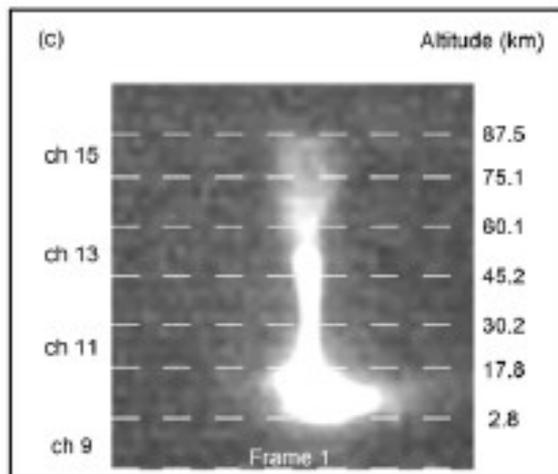
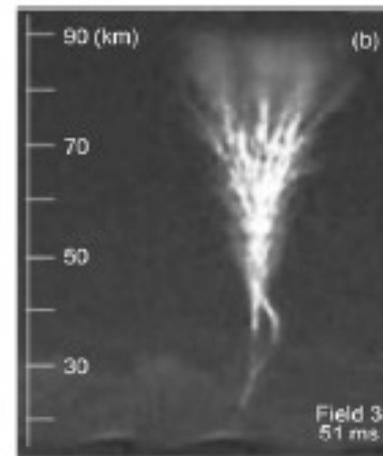
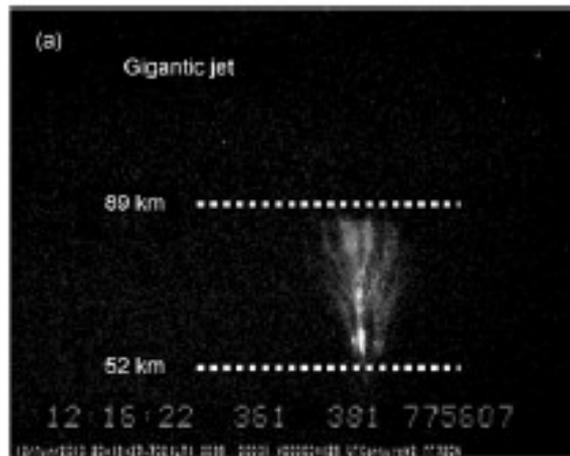


Результаты фрактальной фильтрации изображения спрайта (слева направо):
 $D = 2,1; 2,2; 2,3; 2,5; 2,6.$

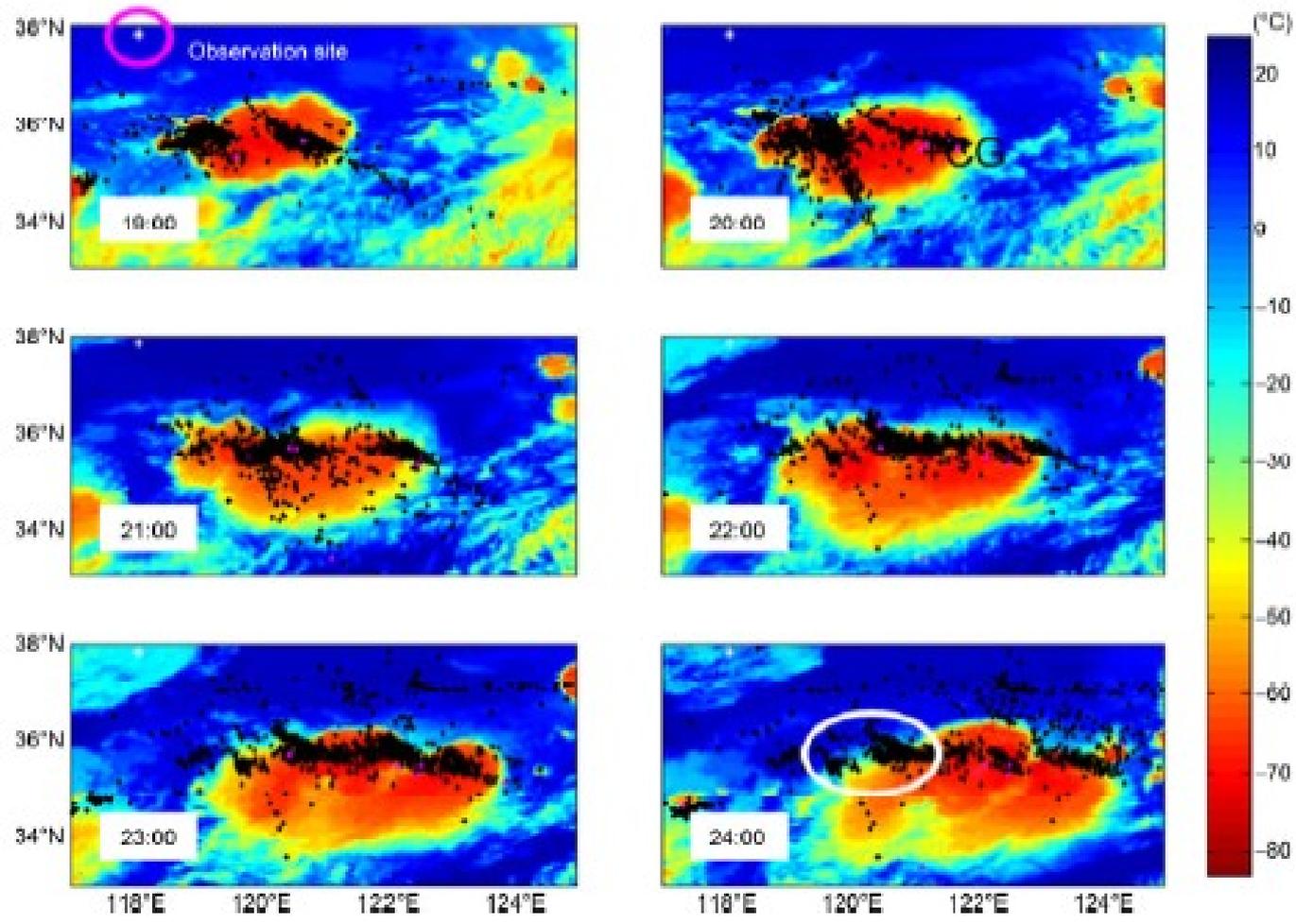
Фрактально-скейлинговая обработка изображения спрайта (окончание)



Результаты фрактальной фильтрации изображения спрайта (слева направо): $D = 2,7; 2,8; 2,9; 3,0$.



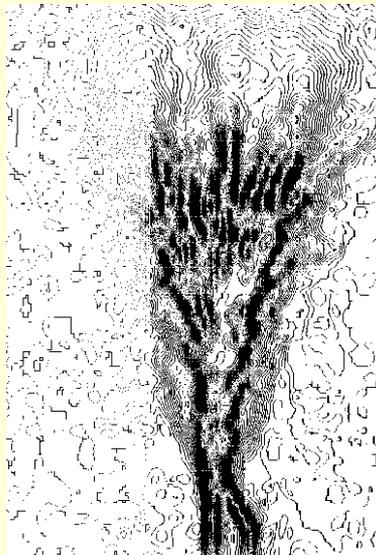
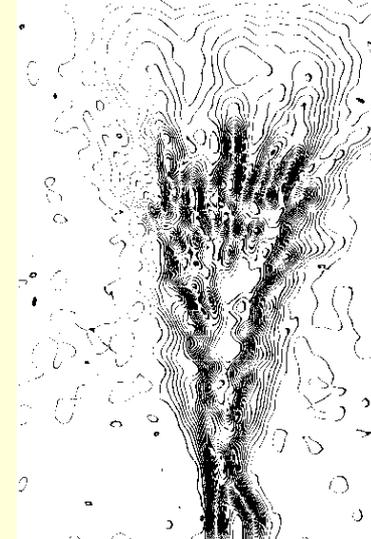
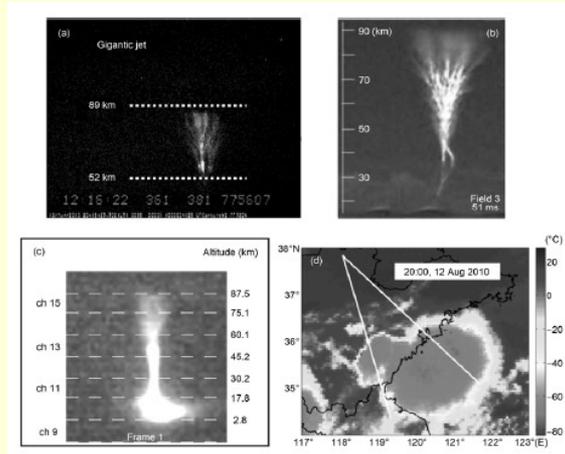
Изображения гигантского джета: (a) - наблюдаемый джет, (b) и(c) – изображения того же самого джета, сделанные разными коллективами, (d) – температурная картина, снятая из космоса



Дата наблюдения: 12.08.2010, Китай

Температурная карта в ИК-диапазоне. Черные точки – молнии, бьющие вниз.
Обведенный белый кружок на изображении, снятом в 19:00,
показывает место наблюдения

Фрактально-скейлинговая обработка изображения джета (Китай)



- Результаты фрактальной фильтрации изображения гигантского джета (съемка в Китае, 12 августа 2010 г.):
- (а) - изображение джета,
- (б) и (в) – срезы оценок фрактальной размерности D . (Четко видны ветви и каналы.).

Выводы

Одним из новых видов мощных импульсных помех являются специфические разряды атмосферного электричества, открытые сравнительно недавно.

Фрактально-скейлинговая методология, примененная для описания морфологии джетов, спрайтов и эльфов, может быть успешно использована для оценки их характеристик и динамики их развития. Такая оценка будет полной и объективной - она основана на количественных оценках фрактальной размерности D при оконтуривании связанных структур, и она оперативна, так как обработка данных выполняется легко на компьютерах. Затем решаются задачи математической физики: динамика природного солитона.

Полученные результаты дают основу для более глубокого понимания действия такого рода помех на функционирование современных наземных и космических радиосистем.

Приведем некоторые характеристики спрайтов [1]:

характерный объем $30 \times 30 \times 30$ км; пространственные масштабы неоднородностей – внешний порядка 10 км, основных структур порядка 1 км, сверхтонкой структуры менее 100 м; концентрация электронов $N_e \sim 10^4$ см⁻³, длительность вспышки ~ 10 мс; время релаксации электронной концентрации $\sim 1 \dots 10$ с; температура электронов $T_e \sim 2$ эВ во время вспышки и $T_e \sim 0,02$ эВ в период релаксации; полный момент тока в разряде $ps \sim 100$ кА x км.

1. Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // NATO Science Series. V.225 / Eds.

M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft.- Dordrecht, The Netherlands, 2006.

Литература

- Sprites, Elves and Intense Lightning Discharges // NATO Science Series. V.225 / Eds. M. Fullekrug, E. Mareev, M. Rycroft.- Dordrecht, The Netherlands, 2006.- 398 pp.
- Потапов А.А. Фракталы в радиофизике и радиолокации: Топология выборки. Изд. 2-е, перераб. и доп.- М.: Университетская книга, 2005.- 848 с.
- Потапов А.А. Оценки фрактальных характеристик радиотеплового излучения атмосферы // Abstracts Int. Conf. “Turbulence and Wave Processes”, dedicated to the centenary of Mikhail D. Millionshchikov (1913 – 1973) (November 26 – 28, 2013, Moscow, МГУ).- М.: INTUIT.RU Ltd., 2013. P. 155 – 158.
- Potapov A.A. Research of the fractal and scaling properties of tropospheric and ionospheric turbulence with artificial perturbations // Сб. тр. Междунар. конф. “Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность: МСС-14” (Москва, ИКИ РАН, 24 - 27 ноября 2014 г.).- М.: ЛЕНАНД, 2014. С. 334 – 339.
- Подосенов С.А., Потапов А.А., Фоукзон Дж., Менькова Е.Р. Неголономные, фрактальные и связанные структуры в релятивистских сплошных средах, электродинамике, квантовой механике и космологии: в 3 тт. / Под ред. А.А. Потапова. М.: ЛЕНАНД, 2015.- 1128 с.
- Potapov Alexander A. Fractal Radar: Towards 1980 – 2015 // Proc. of CHAOS 2015 Int. Conf. (26 – 29 May 2015, France).- Paris: Henri Poincaré Institute, 2015. P. 559 - 573.
- Potapov Alexander A. Chaos Theory, Fractals and Scaling in the Radar: A Look from 2015. Chapter 12 in the book: The Foundations of Chaos Revisited: From Poincaré to Recent Advancements / Ed. C. Skiadas.- Switzerland, Basel: Springer Int. Publ., 2016. P. 195 - 218.

THANK
for
ATTENTION!