

Грубич А.О. ЗАО «ТИМЕТ», Минск
timet@inbox.ru

УНИВЕРСАЛЬНЫЕ СВОЙСТВА РАДИОАКТИВНОГО ОТЛОЖЕНИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАГРЯЗНЕНИЯ ПОЧВЫ

Универсальные свойства отложения:

- ❑ мультифрактальность
пространственной структуры,
- ❑ логнормальность
распределения плотности
активности.

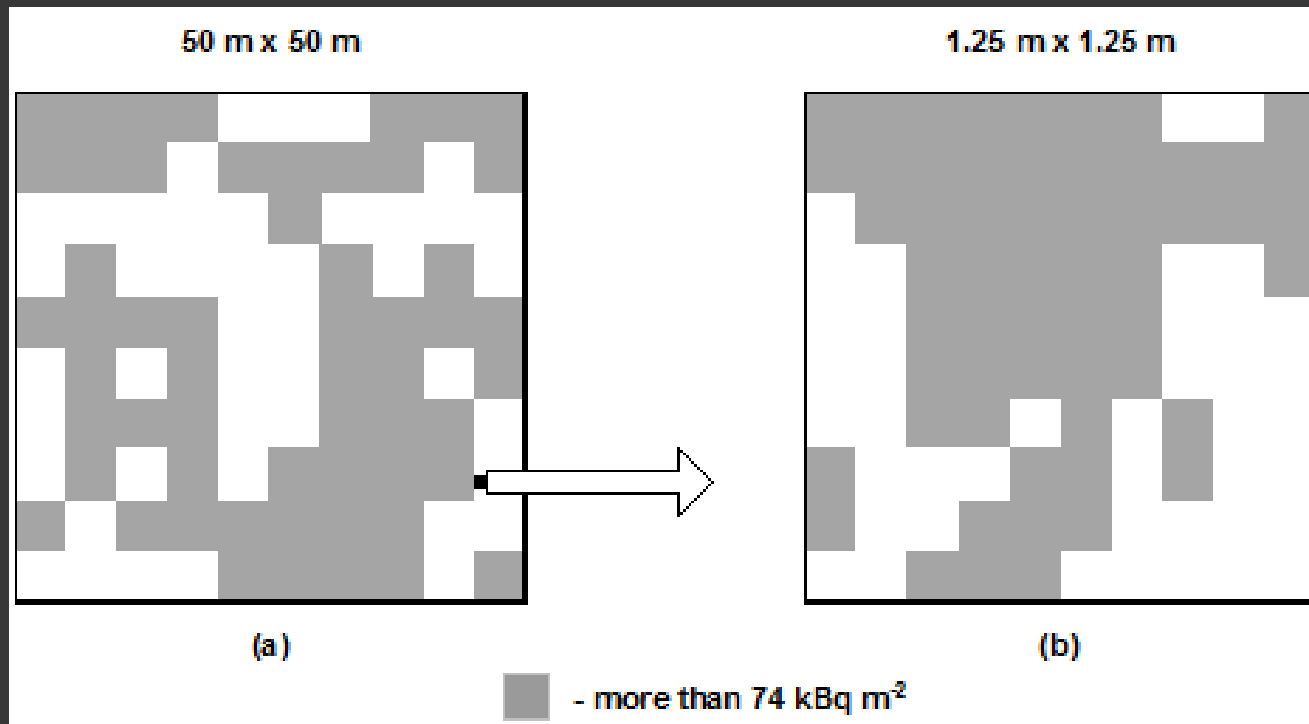
Пятнистость



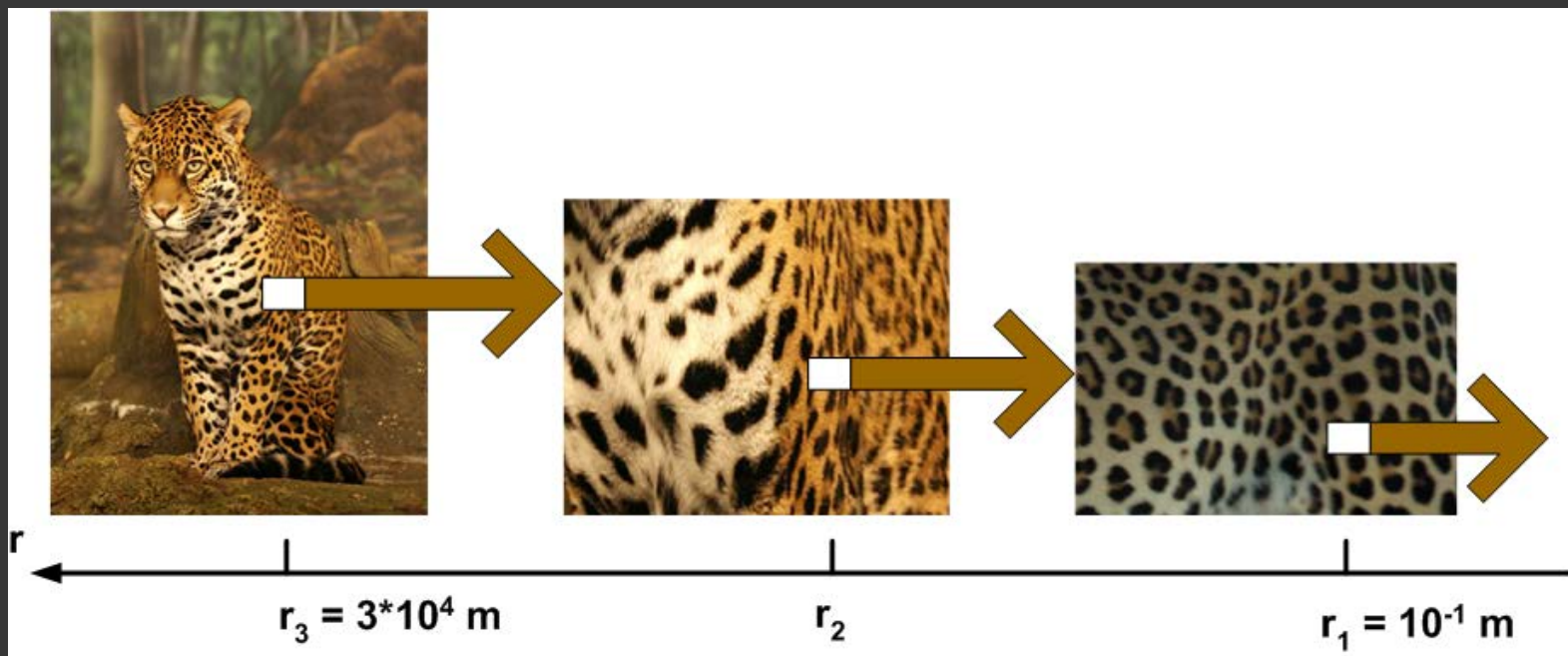
Пример. Структура страты с плотностью активности меньше, чем 74 kBq/m^2 (*Grubich A.O., 2012*).

(a) — участок $50 \text{ м} \times 50 \text{ м}$;

(b) — суб-участок $1.25 \text{ м} \times 1.25 \text{ м}$, черный квадрат на рис. (a).



С увеличением масштаба карты (уменьшением единицы масштаба r) каждая страта рассыпается на множество более мелких страт. При разных значениях единицы масштаба картина загрязнения оказывается примерно самоподобной. Диапазон скейлинга, по крайней мере, от $r = 10$ см до $r = 30$ км (Grubich, 2012).



Если число страт с уменьшением единицы масштаба r увеличивается, то корреляционная размерность D оказывается меньше, чем размерность плоскости. Это означает, что отложение имеет **фрактальную** (самоподобную) пространственную структуру.

Стратам с разными значениями плотности активности, x , соответствуют разные значения корреляционной размерности $D(x)$. Поэтому, более точно, наблюдается **мультифрактальная** пространственная структура.

Мультифрактальность

Впервые это **универсальное свойство** пространственной структуры радиоактивного отложения было описано в *(Salvadori, 1989)*.

Первая публикация в периодической печати – *(Raes et al., 1991)*.

Какова причина образования
мультифрактальной (**квазисамоподобной**
при разных масштабах)
пространственной структуры отложения?

Объяснение было предложено в
(*Барьяхтар и др., 1993*): осаждение на
поверхность земли пыли и аэрозолей
существенно зависит от **турбулентности**
атмосферы, характеризуемой
перемежаемостью (пульсациями)
скорости вихрей и персистентностью
(памятью – сохранением тенденции при
изменении скорости).

Какое статистическое распределение описывает гистограмму частот плотности активности (Бк/м²) проб почвы, отобранных на участке?

Варианты ответа:

1) *Нормальное*

2) *Логнормальное*

3) *Предпочтительного типа распределения не существует.*

Конкретный тип распределения зависит от многих факторов: размера участка, вида растительности (луг/лес), особенностей выпадения (сухое/влажное) и т.д.

Логнормальность

Например, в монографии (*Хомутинин и др., 2001*) логнормальность распределения плотности активности рассматривалась, фактически, как установленный факт.

Однако это обстоятельство не нашло отражение в практике радиационного контроля и мониторинга почв: до сих пор нет ни одной МВИ или МРК, согласно которой результаты измерений обрабатывались бы с учетом логнормальности. Почему?

В обзоре (*Daniels and Higgins, 2002*) обращено внимание на то, что в ряде случаев:

- 1) **Правый хвост** эмпирического распределения **не описывается** логнормальным распределением.
- 2) Эмпирическое распределение может быть описано как логнормальным, так и **Вейбулла** распределением.
- 3) Эмпирические распределения **удельной активности не описываются** логнормальным распределением.

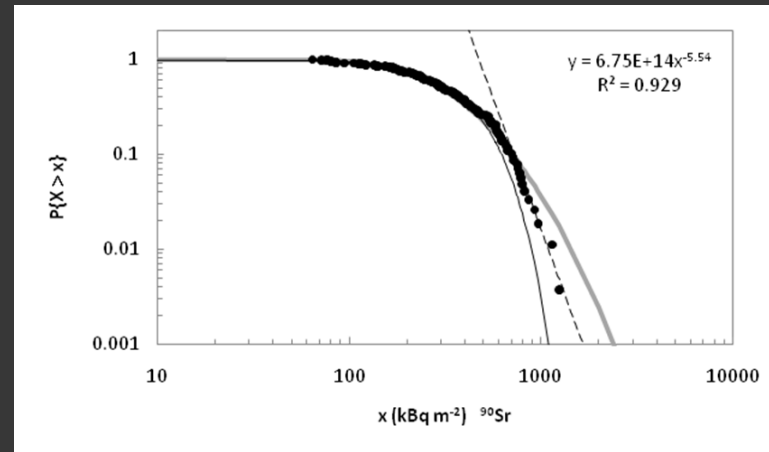
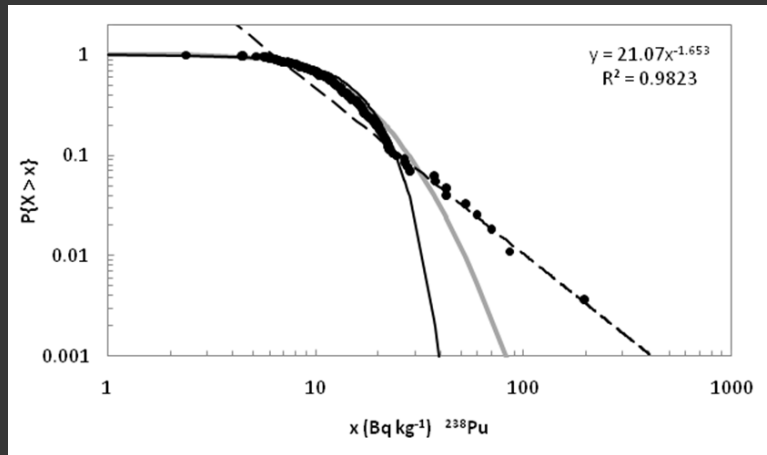
На основании этих фактов (*Daniels and Higgins, 2002*) пришли к выводу, что логнормальность – всего лишь **идеализация**.

В (*Grubich et al., 2013*) была проведена подгонка нормального, Вейбулла и логнормального распределения к 14 наборам данных плотности активности и показано, что частота описания логнормальным распределением равна $f = 13/14 \approx 0,93$.

Для девяти рассмотренных наборов данных удельной активности $f = 1,0$.

Однако имелись наборы данных, в которых правый хвост эмпирического распределения действительно **не описывался** логнормальным распределением.

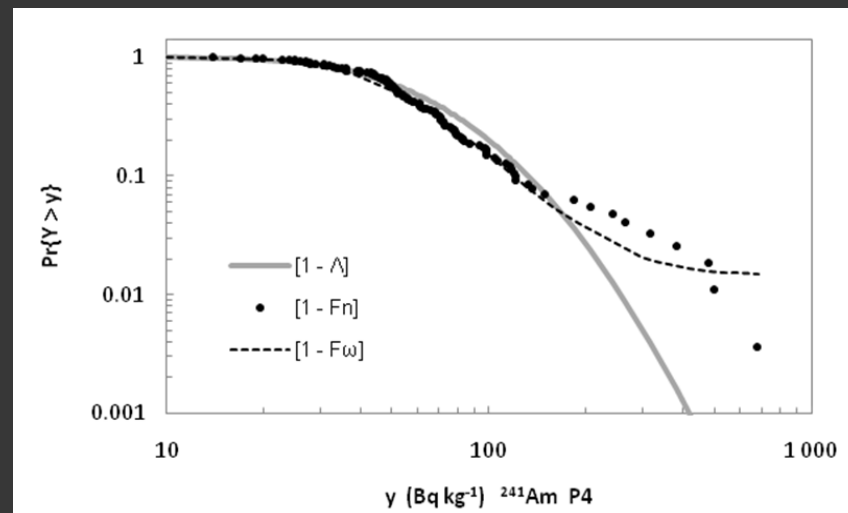
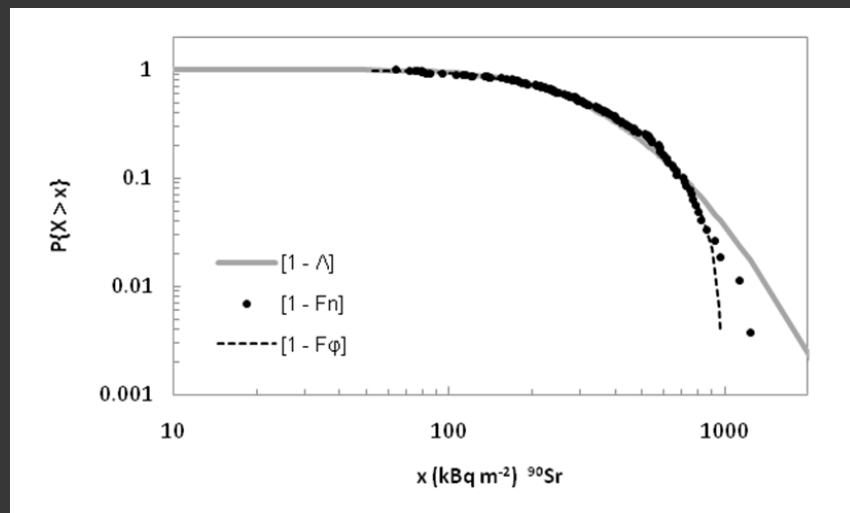
Капризы хвостов



Ось ординат – вероятность $(1 - F(x))$, где $F(x)$ – функция распределения. Точки, серая линия и сплошная линия – графики для эмпирического, логнормального и Вейбулла распределений соответственно.

Казалось бы, вывод (*Daniels and Higgins, 2002*) о том, что логнормальность – это идеализация, верен.

Факторы, влияющие на форму распределения (*Grubich, 2015*)



[1 – F_ϕ] – с учетом неопределенности измерений, $u = 0,3$

[1 – F_ϕ] – с учетом распределения плотности почвы на участке

В (*Grubich, 2014*) показано, что в случаях размера выборки $n < 100$ эмпирическое распределение порой описывается распределением Вейбулла. Однако с увеличением размера выборки набор данных, как правило, начинает описываться логнормальным распределением.

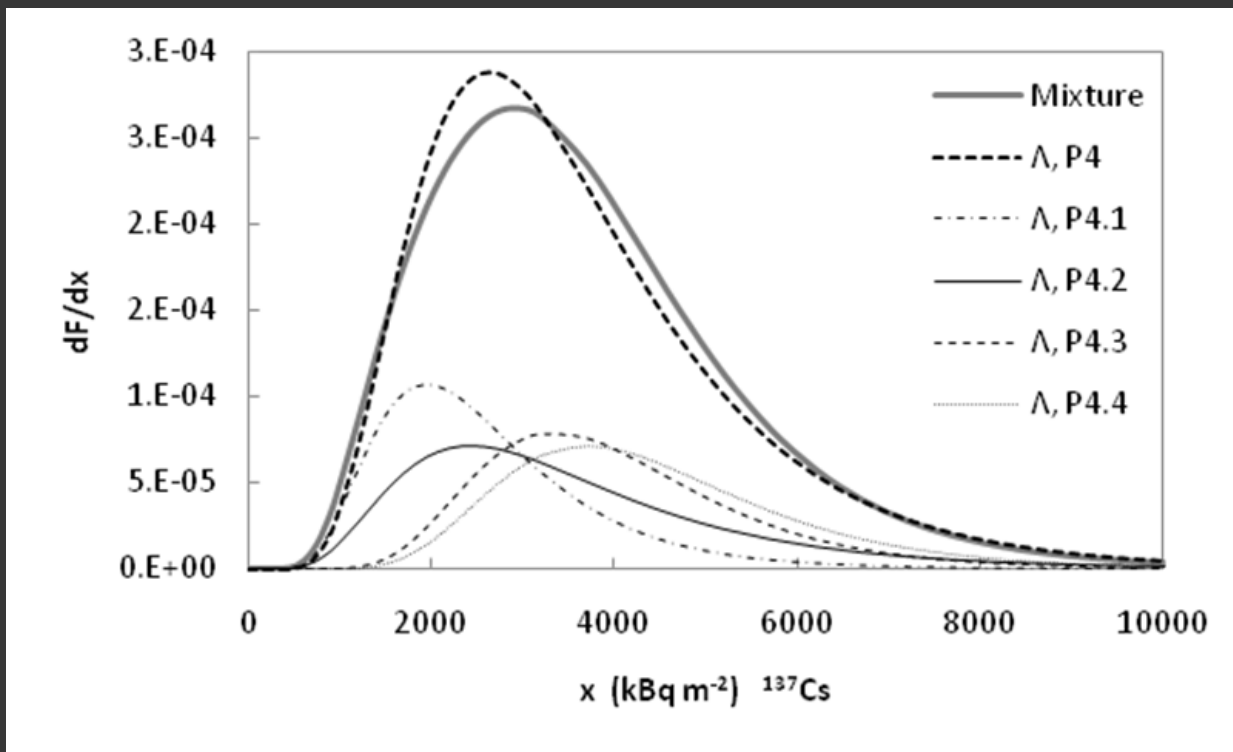
Таким образом, анализируя результаты подгонки распределений к набору данных необходимо учитывать: размер выборки, тип величины (плотность либо концентрация), однородность выборки.

Еще одна заноза:

Каким образом распределения на участке и на суб-участках, из которых он составлен, могут описываться семейством логнормального распределения?

Ведь смесь двух логнормальных распределений в общем случае не является логнормальным распределением.

Ответ дает дробление участка на совокупность большого числа суб-участков. В (Grubich, 2014) на ряде численных примеров было показано, что при условиях, наблюдаемых на практике, смесь большого числа логнормальных распределений также описывается логнормальным распределением. Непрерывным аналогом такой смеси является сложное распределение вероятностей.



Другая заноза

Субъективным препятствием для широкого использования логнормального распределения является бытующее мнение о том, что логнормальным распределением можно описывать распределение плотности активности только на так называемых **безградиентных** участках.

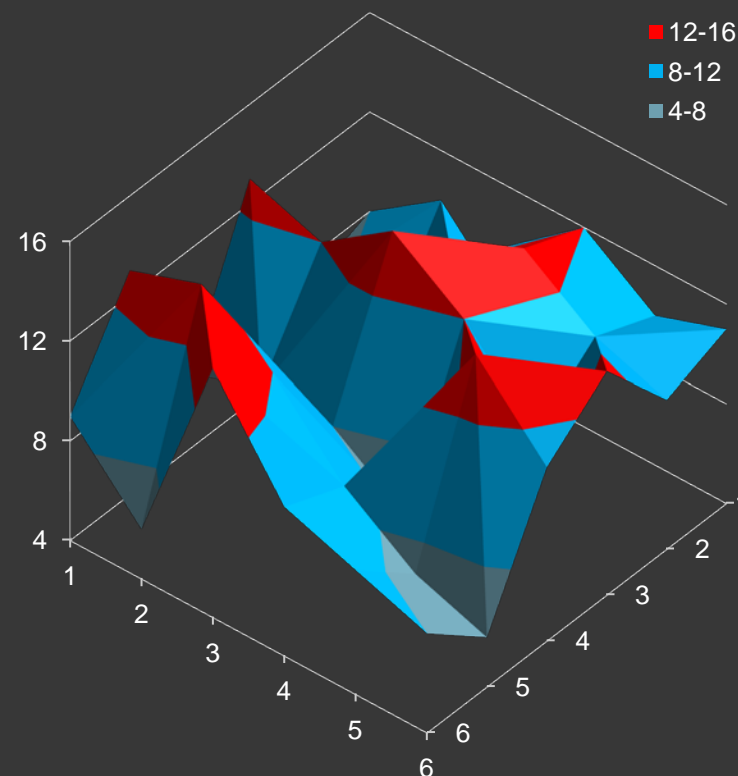
Вот заноза, так заноза: на многих участках наблюдается как раз градиент плотности активности.

Рассмотрим «участок»



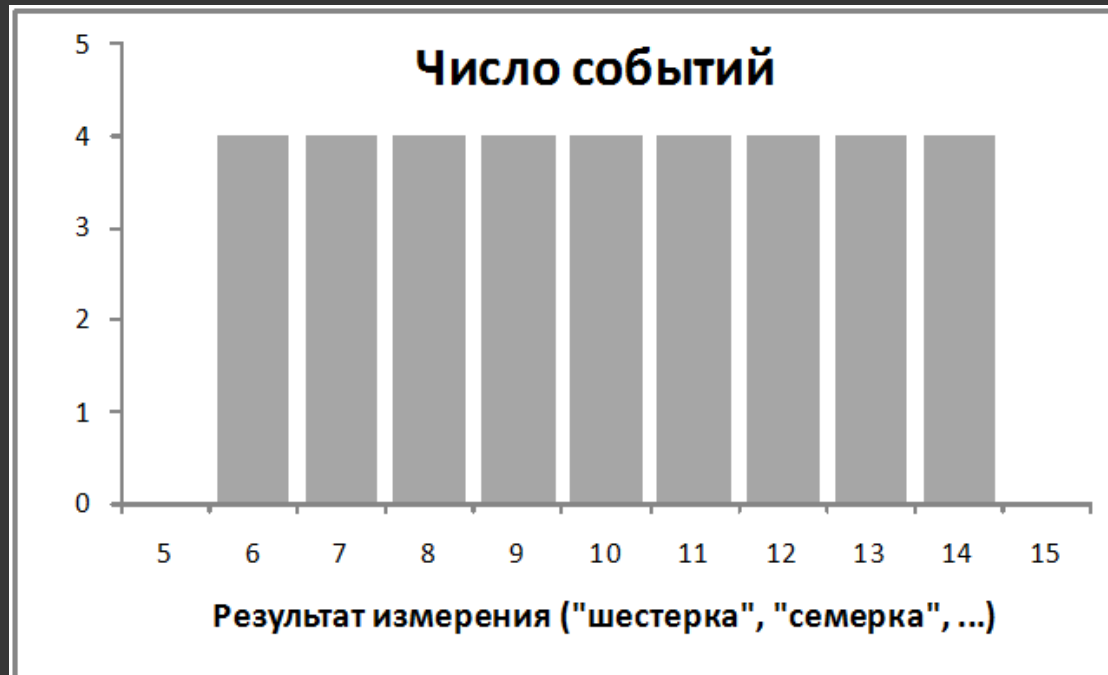
Пространственное распределение «плотности активности», соответствующее предыдущему слайду:

8	10	7	12	10	11
7	6	11	13	11	10
13	12	14	12	9	13
7	8	8	6	14	11
13	14	12	9	7	6
9	6	14	10	9	8



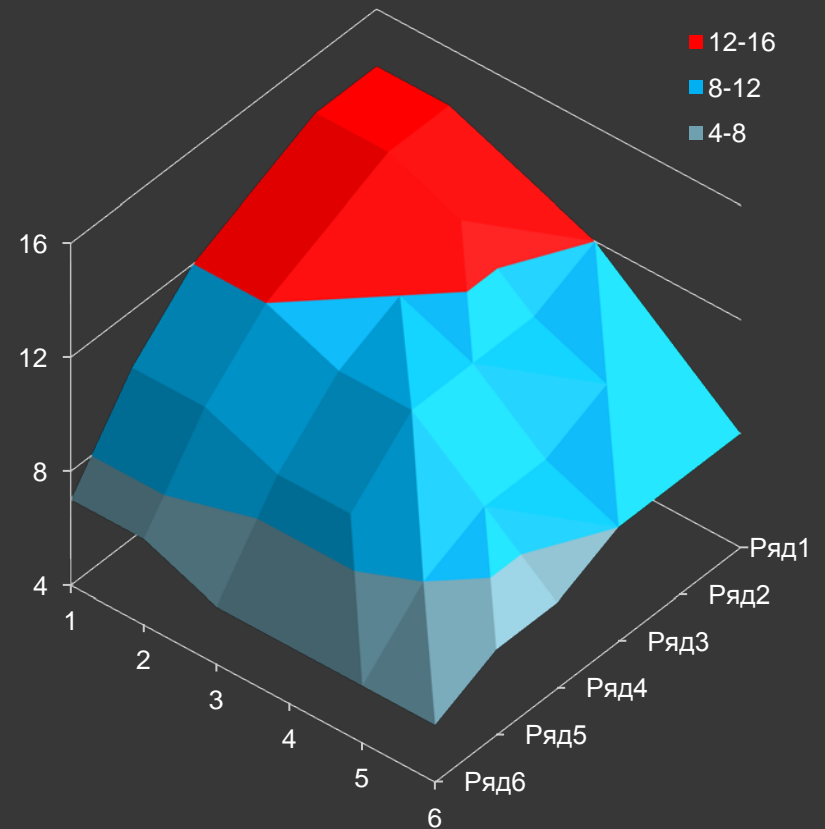
6 – «шестерка», 7 – «семерка», ..., 14 – «туз».

Плотность распределения



Нетрудно представить «колоду карт» с логнормальным распределением.

Любой тип распределения описывает как безградиентные, так и градиентные участки. Одному и тому же распределению соответствует множество всевозможных реализаций.



Пример градиентного участка для равномерного распределения

Резюме:

Логнормальное распределение плотности активности не идеализация, а универсальное свойство радиоактивного отложения.

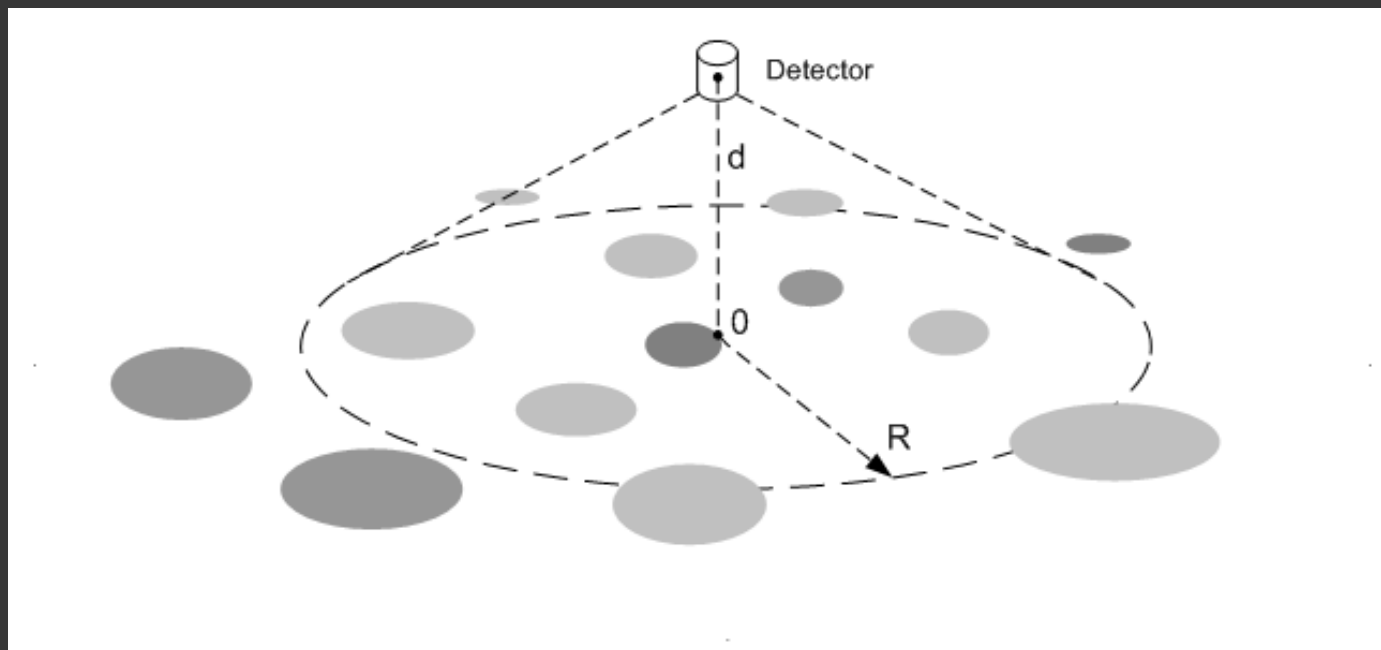
Отложение является случайным полем плотности активности, описываемым логнормальным распределением и имеющим мультифрактальную пространственную структуру.

Что дает понимание ЭТИХ СВОЙСТВ ОТЛОЖЕНИЯ практике?

Некоторые примеры приводятся ниже:

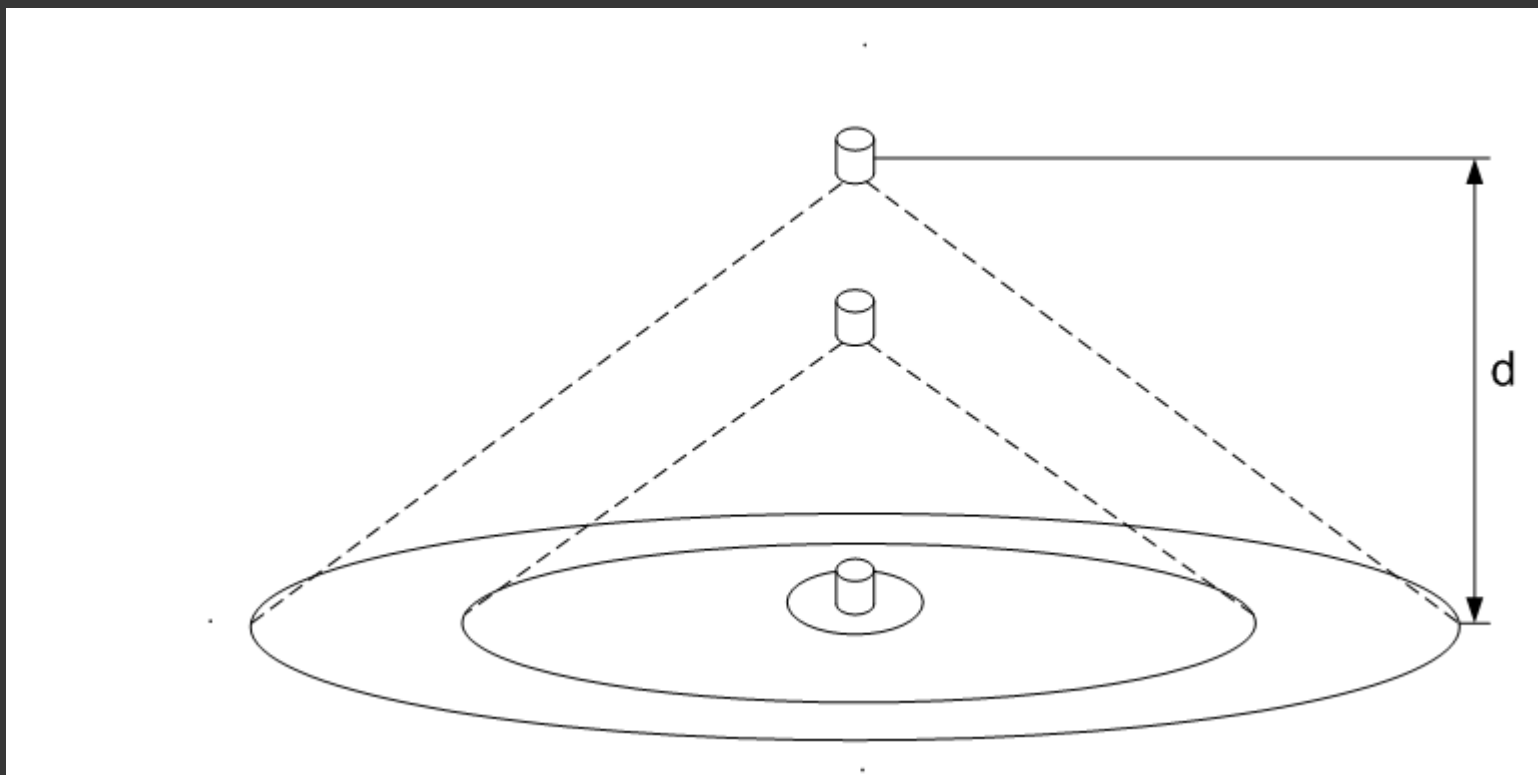
СЛЕДСТВИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОСТИ

Для **любой высоты** детектора, d , над поверхностью земли реальная, фактическая геометрия измерения *in situ*:

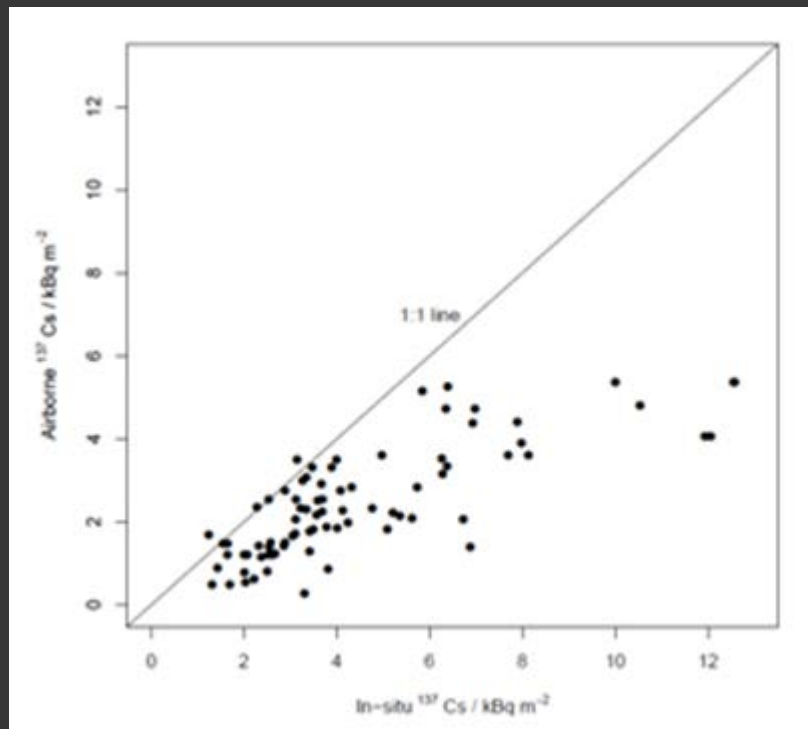


Пятнистость, пятнистость и еще раз пятнистость.

Поскольку пятнистость одинакова при любой единицы масштаба, то неопределенность измерения *in situ* одного порядка величины для **любой высоты** расположения детектора над поверхностью земли.

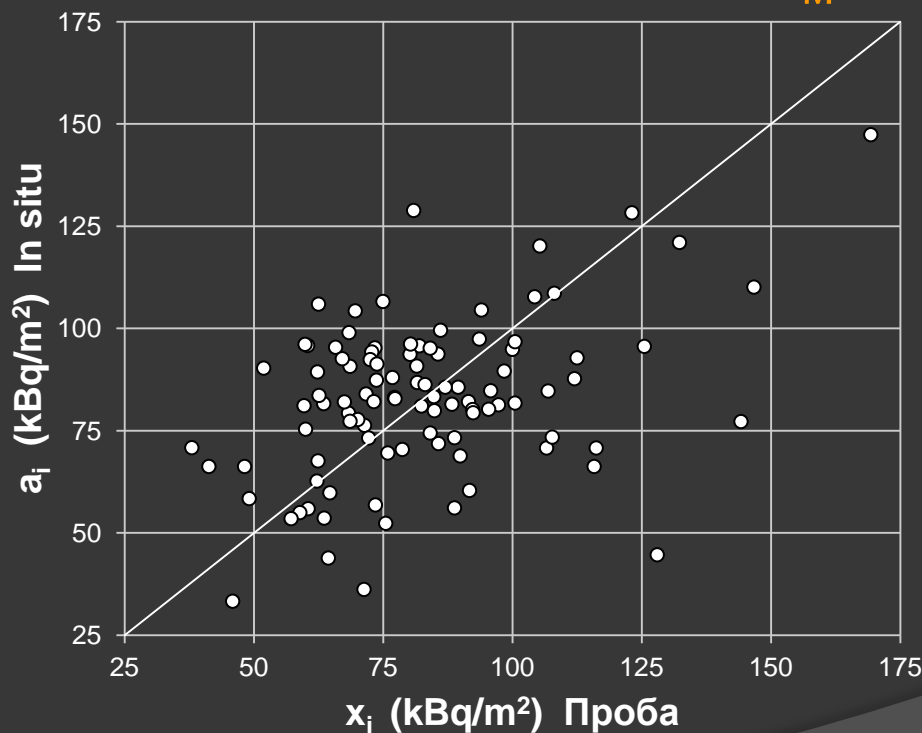


Пример (*Rawlins et al., 2011*): Измерение *in situ* для $d = 56$ м против измерения *in situ* для $d = 1$ м:



Примерно такая же картина будет и в случае $d = 1$ м против $d = 0.1$ м.

Пятнистость – основной фактор, определяющий величину неопределенности измерения *in situ*. Пример: Коэффициент вариации плотности активности $CV = 0.28$. Стандартная неопределенность из-за отличия модели измерения *in situ* от реального, пятнистого распределения плотности активности (см. слайд 25) $u_M \approx 20\%$ ($d = 0.04$ м). Таким образом, для $P = 0.95$ имеем $2u_M \approx 40\%$.



Как следствие, расширенная неопределенность измерения *in situ* плотности активности ^{137}Cs **порядка 50%** и более.

Это обстоятельство было учтено, в частности, в межлабораторных сличениях (*Miller et al., 1998*), в которых в случае неоднородного загрязнения почвы ^{137}Cs результаты измерений *in situ* сравнивались исключительно между собой. Сравнение с плотностью активности проб почвы было исключено на стадии планирования сличений.

Для естественных радионуклидов (либо глобальных выпадений ^{137}Cs в результате ядерных испытаний) расширенная неопределенность измерения для $d = 0.1(1.0)$ м невелика.

Выводы:

Метод измерения с отбором пробы почвы **первичен** по сравнению с методом измерения *in situ*. Обоснованное заключение о точности измерения *in situ* можно сделать только на основании результата измерения пробы почвы.

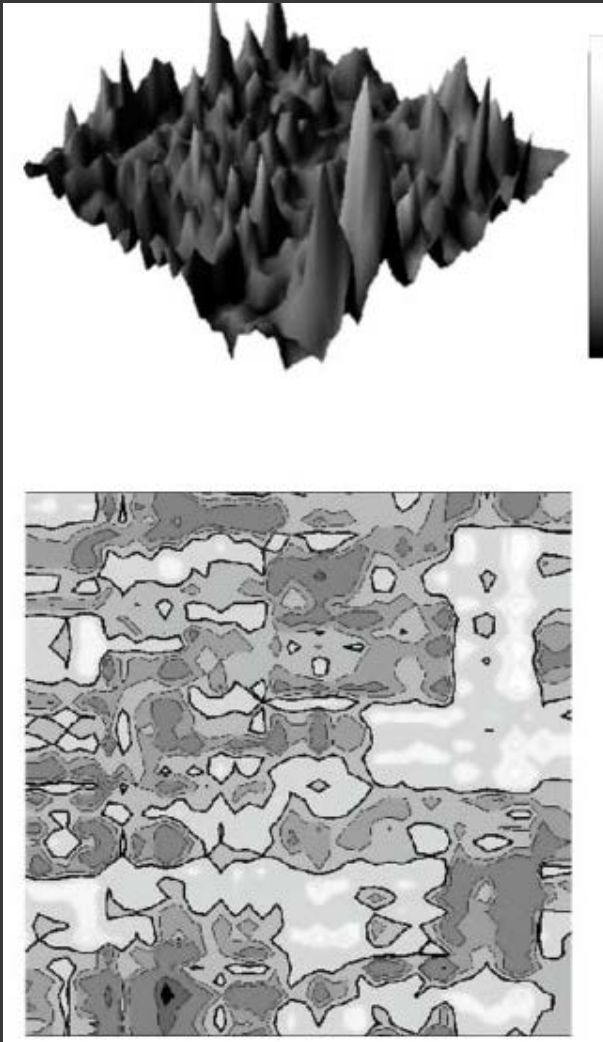
Эти простые соображения никак не учитываются в существующих МВИ *in situ*. А жаль! Почему бы не рекомендовать отбирать пробу, например, для каждого 10го либо 20го измерения?

СЛЕДСТВИЕ МУЛЬТИФРАКТАЛЬНОСТИ

Значения коэффициента вариации плотности активности (удельной активности) $CV = s/\langle x \rangle$ сосредоточены в интервале (0.15, 1.0), ширина которого **не зависит от единицы масштаба**, по крайней мере, в диапазоне r **от 0.1 м до 30 км** (см. слайды 5, 25-29). Ширина интервала не зависит и от величины плотности активности либо удельной активности.

Страты на картах радиоактивного отложения (области, выделенные изолиниями) дают весьма приближенное, **качественное** описание уровней загрязнения почвы на местности.

Для страты, ограниченной, например, изолиниями 15 и 40 Ки/км², можно поставить вопрос: Какова площадь поверхности областей страты с плотностью активности большей, чем 40 Ки/км²?



**Свойство
логнормальности
отложения
позволяет дать
количественные
оценки площади
поверхности таких
областей.**

**Логнормальное случайное
поле (Кляцкин, 2011)**

Site	Dataset	Nuclide	r (m)	CV
P3	1	^{137}Cs	1000	0.499
	2	^{90}Sr	1000	0.912
	3	^{241}Am	1000	0.735
	4	^{238}Pu	1000	0.853
	5	$^{239}, ^{240}\text{Pu}$	1000	0.778
P4*	26	^{137}Cs	500	0.450
	27	^{90}Sr	500	0.637
	28	^{241}Am	500	0.488
	29	^{238}Pu	500	0.590
	30	$^{239}, ^{240}\text{Pu}$	500	0.560

* (*Bondar et al., 2011*), см. также (*Grubich et al., 2013*)

Ответ зависит от среднего уровня загрязнения страты, $\langle x \rangle$, и коэффициента вариации $CV = s/\langle x \rangle$.
 Суммарная площадь областей страты (ограниченной изолиниями 15 и 40 Ки/км²) с плотностью активности большей 40 Ки/км² приводится в таблице (%):

CV $\langle x \rangle$ (Ки/км²)	0,3	0,4	0,5	0,6
20	0,6	2,3	4,4	6,3
25	4,0	7,9	10,9	13,0
30	13,0	17,4	19,9	21,3

И, наконец, обработка наборов данных для плотности активности почвы с использованием логнормальности распределения приведет к получению более точных оценок по сравнению с оценками, полученными методами непараметрических статистик.

Литература

- ✓ Барьяхтар В.Г., Гончар В.Ю., Яновский В.В., 1993. Природа сложной структуры пятна загрязнений радионуклидами в результате аварии на ЧАЭС. Укр. фіз. журн. 38, 7, 967-975.
- ✓ Кляцкин В.И., 2011. Интегральные характеристики – ключ к пониманию структурообразования в стохастических динамических системах. УФН, 181(5), 457-482.
- ✓ Хомутинин Ю.В., Кашпаров В.А., Жебровская Е.И., 2001. Оптимизация отбора и измерений проб при радиоэкологическом мониторинге. Киев.
- ✓ Bondar, Y., Strand, P., Brown, J., Navumav, A., Skipperud, L., Zhukova, O., Sokolik, G., Kashparov, V., 2011. Radioactive contamination of the territory of Belarus in the Polessie State Radiation-Ecological Reserve. Prepared and edited by Y. Bondar and J. Brown. Final Report November 2011. SFP.EAP.SFPP 983057.
- ✓ Daniels, W.M., Higgins, N.A., 2002. Environmental Distribution and the Practical Utilisation of Detection Limited Environmental Measurement Data. NRPB-W13
- ✓ Grubich A.O., 2012. Multifractal structure of the ^{137}Cs fallout at small spatial scales. Journal of Environmental Radioactivity 107, 51-55.
- ✓ Grubich, A., Makarevich, V.I., Zukova O.M., 2013. Description of spatial patterns of radionuclide deposition by lognormal distribution and hot spots. J. Environ. Radioact. 126, 264–272.
- ✓ Grubich, A., 2014. Statistical and structural properties of radionuclide deposition. European Researcher, 73, No. 4-2, 720-735.
- ✓ Grubich, A., 2015. On the lognormality of radionuclide deposition. J. Environ. Radioact. 143, 47–51.
- ✓ Miller, K.M., Shebell, P., Monetti, M.A., et al., 1998. An Intercomparison of In Situ Gamma-Ray Spectrometers. Radioactivity & Radiochemistry, 9 (4), сmp. 27-40.
- ✓ Raes, F., De Cort, M., Graziani, G., 1991. Multi-fractal nature of radioactivity deposition on soil after the Chernobyl accident. Health Phys. 61, 271-274.
- ✓ Rawlins, B.G., Scheib, C., Beamish, D., Webster, R., Tyler, A.N., Young, M.E., 2011. Landscape-scale controls on the spatial distribution of caesium-137: a study based on an airborne geophysical survey across Northern Ireland. Earth Surf. Process. Landform, 36, сmp. 158-169.
- ✓ Salvadori, G., 1989. Modelli Matematici per lo Studio della Distribuzione della Radioattività in Italia Indotta dall'Incidente Nucleare di Chernobyl. Tesi di Laurea, Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Matematica, A.A. 1987/88.