

**Обрушение морских волн :  
пространственно-временная структура  
точечных дискретных полей и модели  
«выбросов» гауссового поля.**

**Е. А. Шарков**

**Институт космических исследований РАН**

**E-mail: [easharkov@iki.rssi.ru](mailto:easharkov@iki.rssi.ru)**

# Введение

- **Предмет обсуждения** : важнейший нелинейный элемент динамики морского волнения – процесс обрушения свободных гравитационных волн и последующие за ним эволюция и динамика дисперсных пенных систем .
- **Физический объект** – пространственно-временное поле центров обрушений (ЦО) в определенном пространственном кадре .

# Введение

- **Волновая динамика:** диссипация волновой энергии гравитационной волны при ее обрушении ( скорость диссипации, влияние на статистический спектр волнения)
- **Энерго и массообмен :** проблема штормового усиления энерго- и массопереноса через поверхность океана
- **Мировой океан как регулятор  $\text{CO}_2$  в атмосфере Земли :** механизмы транспортировки газа ( $\text{CO}_2$ ) из атмосферы в океан
- **Дистанционное зондирование:** проблема спекл-сигналов в поле обратного рассеяния; чернотельная модель радиоизлучения пенных структур ; проблема физической интерпретации  $K$ -распределения в статистическом поле обратного рассеяния

## Необходимые физические характеристики:

- **дифференциальные плотности распределения ЦО ( и производные ) в определенном пространственном кадре (от  $100 \text{ м}^2$  до  $100 \text{ км}^2$  ) от степени и стадии развития волнения**
- **степень структурированности поля ЦО – либо пространственная независимость ЦО, либо жесткая корреляция, либо масштабо-инвариантные связи**
- **время жизни ЦО и его последующих дисперсных образований**

# Введение

- Мифы и легенды :
- «девятый вал»;
- «десятая волна» (Китайгородский, ДАН,2001);
- «шахматная доска» ;
- «накопление энергии волной для обрушения»;
- «обратная зависимость количества обрушений от длины энергонесущей волны» (Бортковский, 1983; Бордюгов и др.,1986).

# Модель выбросов гауссового поля за фиксированный уровень

Snyder and Kennedy, J. Phys. Ocean., I, II, III, 1983

- МП = Гауссова поверхность
- ЦО = выброс ГП за фиксированный уровень «а»
- Интенсивность потока пересечений  $= f\{m_{ij} [ S ( k_x, k_y ) ] \}$  (Karlin, 1968)
- Физические предпосылки уровня «а»:  
отрицательное ускорение  $> 0,5 g$  (Longuet-Higgins, 1969); узкополосный шумовой спектр  $ak_m = 0,25$  (Longuet-Higgins, 1969); высота существенной волны для спектра Пирсона—Московитца  $ak_m = 0,18$  (Pirson and Moskowitz, 1964)

# Раздел 1. Классификация методов оптико-дистанционных исследований

- **I тип** - аэрофотосъемка с борта высотного аэронасосителя для выявления закономерностей распределения центров диссипации морского волнения на больших площадях морских акваторий (порядка нескольких км<sup>2</sup>) без дифференциации по типу пенных систем (Покровская и Шарков, ДАН, 1987; ИЗК, 1986, 1987)

# Раздел 1. Классификация методов оптико-дистанционных исследований

- **II тип** - аэрофотосъемка высокого разрешения с борта малоскоростного аэронавигатора для исследования пространственно-статистических характеристик площадной и линейной геометрии пенных структур различного типа, но без выявления временной динамики (Бондур и Шарков, *Океанология*, 1982; *ИЗК*, 1986)



# Раздел 1. Классификация методов оптико-дистанционных исследований

- **III тип** - исследование временной динамики процесса обрушения индивидуальных гравитационных морских волн, временной эволюции геометрических свойств отдельных дисперсных образований на морской поверхности с борта НИС кино-и фотосъемка с длиннофокусными объективами- (Бортковский, 1983; Черный и Шарков, ИЗК, 1988 )

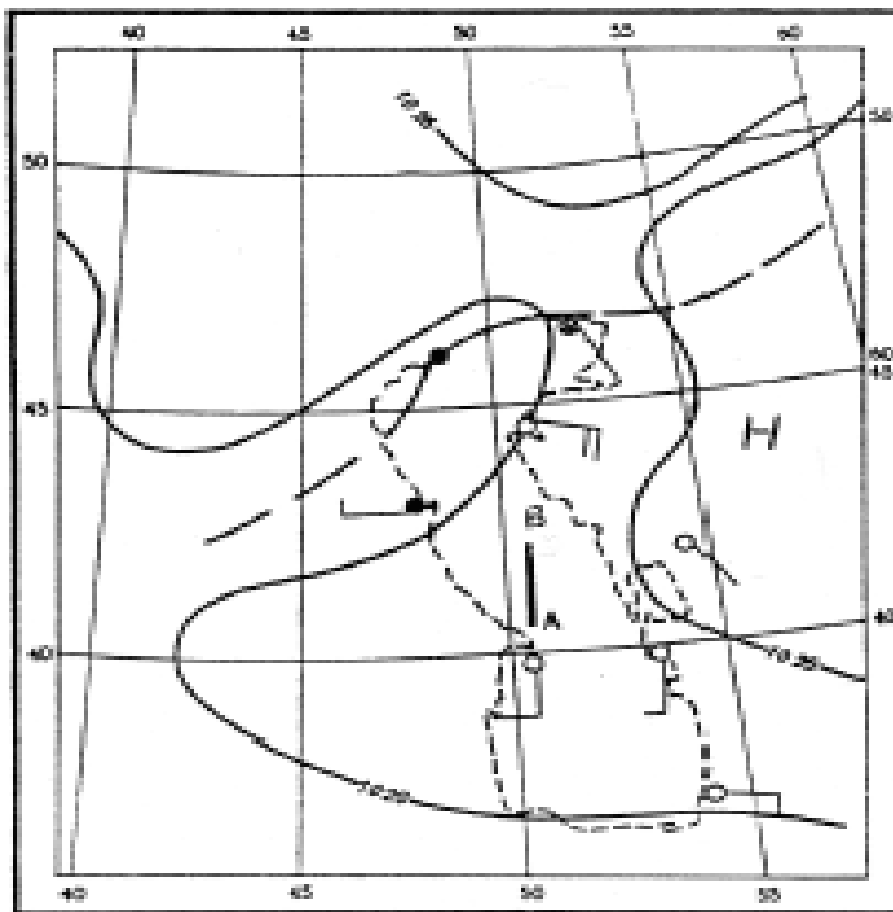
# Раздел 1. Классификация методов оптико-дистанционных исследований

- **IV тип** - исследование дисперсной структуры слоя аэрации и поверхностных дисперсных систем при помощи макрофотосъемки проб пенной массы, взятых с поверхности или непосредственно в поверхностном слое моря при помощи герметичных боксов нулевой плавучести (Райзер и Шарков, ФАО, 1980; Тимофеев и Шарков, 1992; Шарков, ИЗК, 1994).

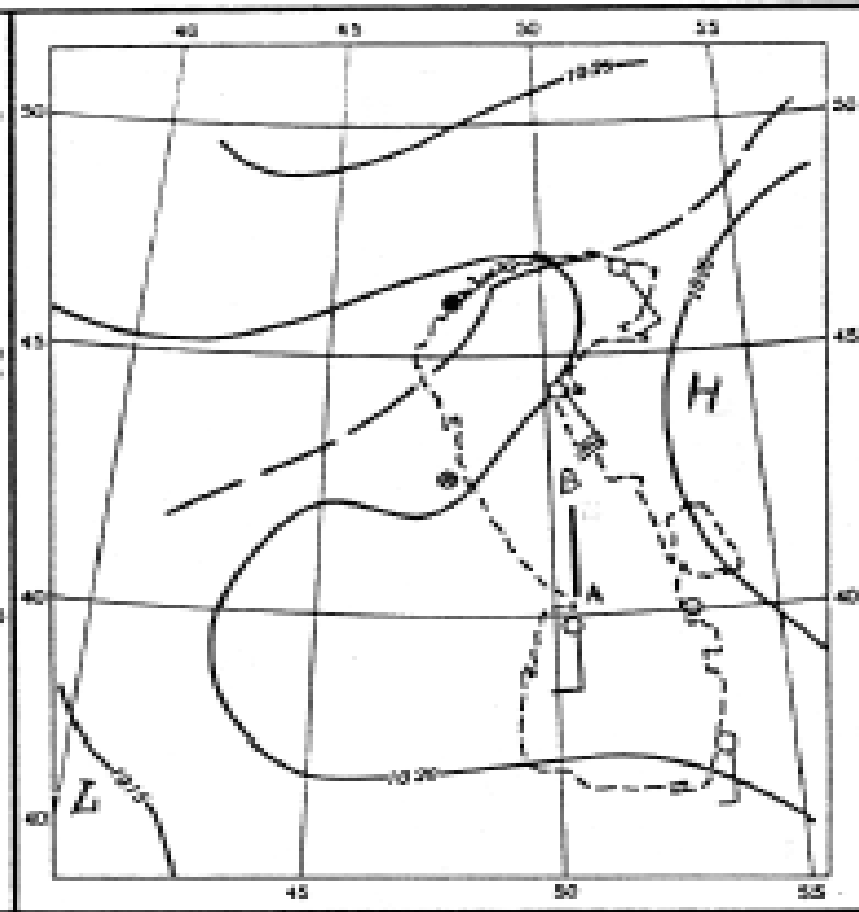
## Раздел 2. Пространственно-стохастические поля обрушений

- Летно-морская экспедиция ИКИ РАН «Каспий-81».
- Самолеты-лаборатории АН-30 и ИЛ-14.
- Двух-уровневые потоковые метеоизмерения и волнографические измерения на платформе.
- Оптико-дистанционная аппаратура – МКФ-6 (АН-30) и АФА-100 (Ил-14).
- Режимы полетов – синхронные по времени и разновысотные .
- Эшелон АН-30 - 5100 м ; масштаб съемки М 1:40800
- Эшелон Ил-14 - 400м ; масштаб съемки М1: 4000 \_
- Маршрут - 250 км ( через платформу ).

# Приземная синоптика и маршрут самолетов (31.10.1981)

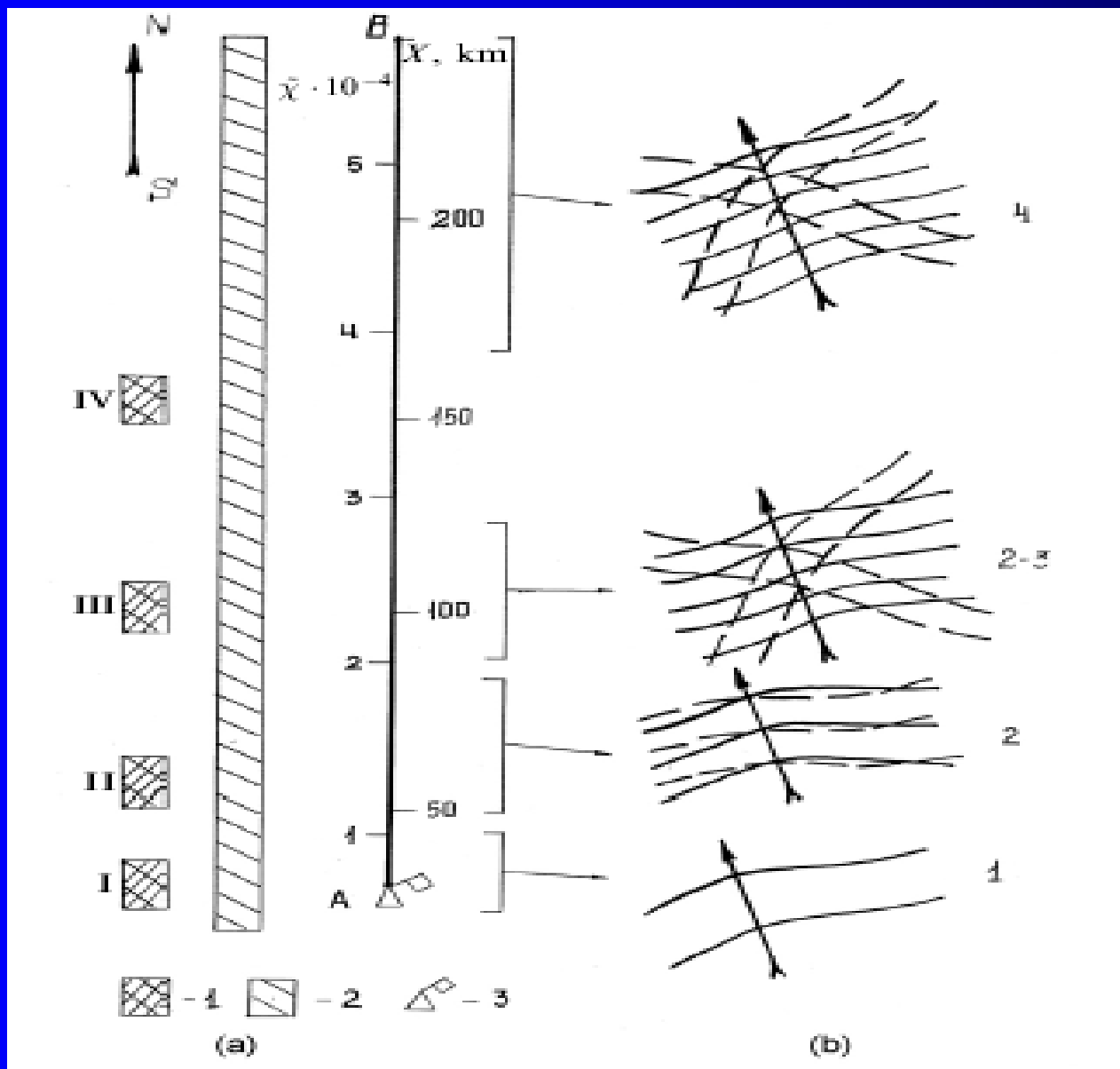


(a)



(b)

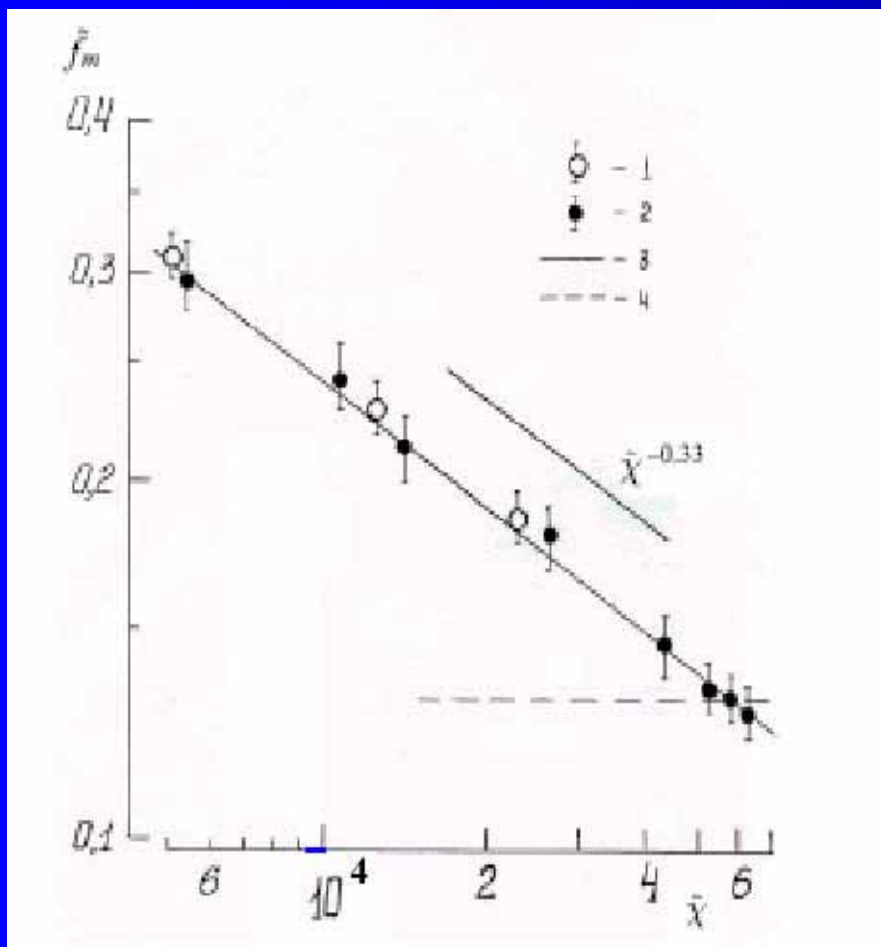
# Схема данных визуальных наблюдений (степень развитости волнения) и аэрофотосъемки.



## Термические и турбулентные характеристики приводного слоя условия ( по контактным измерениям)

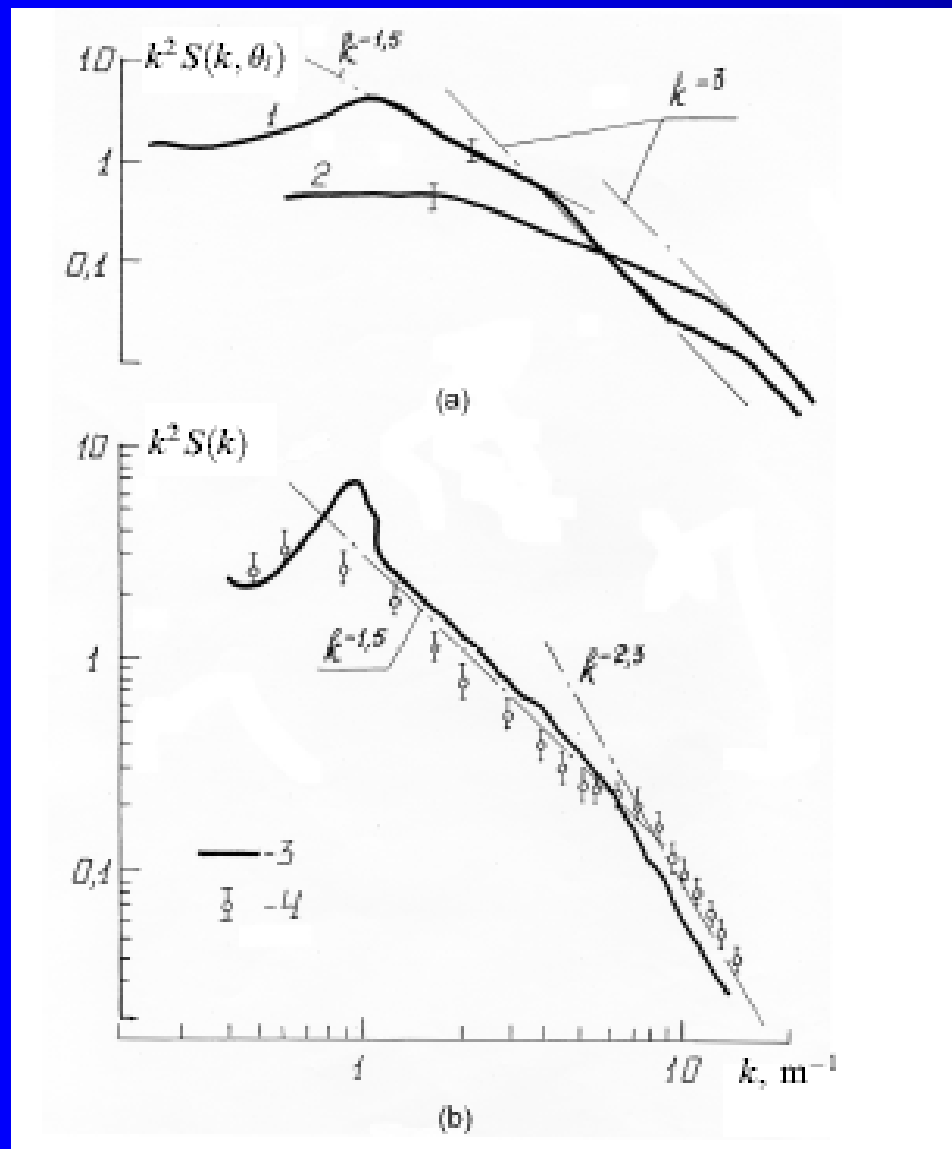
- напряжение трения  $\tau = 0,05 \text{ Н м}^{-2}$
- турбулентный тепловой поток  $H = - 22.2 \text{ Вт м}^{-2}$
- турбулентный поток влаги  $E = 2 \pm 2.4 \text{ Вт м}^{-2}$
- масштаб Монина-Обухова  $L = 30 \text{ м}$
- динамическая скорость  $u_* = 0.23 \text{ м с}^{-1}$
- масштаб температурных пульсаций  $T_* = 0.37 \text{ К}$
- динамическое число Ричардсона  $R_f = 0.03$
- выраженная температурная инверсия  $T_{10} - T_s > 0$
- профили  $T(z)$  и  $u(z)$  - линейно-логарифмические
- скорость ветра на 10 м -  $u_{10} = 6.2 \text{ м с}^{-1}$

# Волновая ситуация на маршруте.



- Безразмерная частота максимума спектра  $f_0 = f_m$  и  $g^{-1}$  от безразмерного разгона  $X_0 = Xg u^{-2}$ .
- 1 - данные по АФА
- 2 - данные по МКФ-6
- 3 - аппроксимация  $f_0 = 5 X_0^{-0,33}$
- 4 - частота максимума спектра Пирсона –Московитца

# Одномерный спектр волнения $S(k, \phi_i)$ по данным in situ и по оптическим измерениям с двух эшелонов



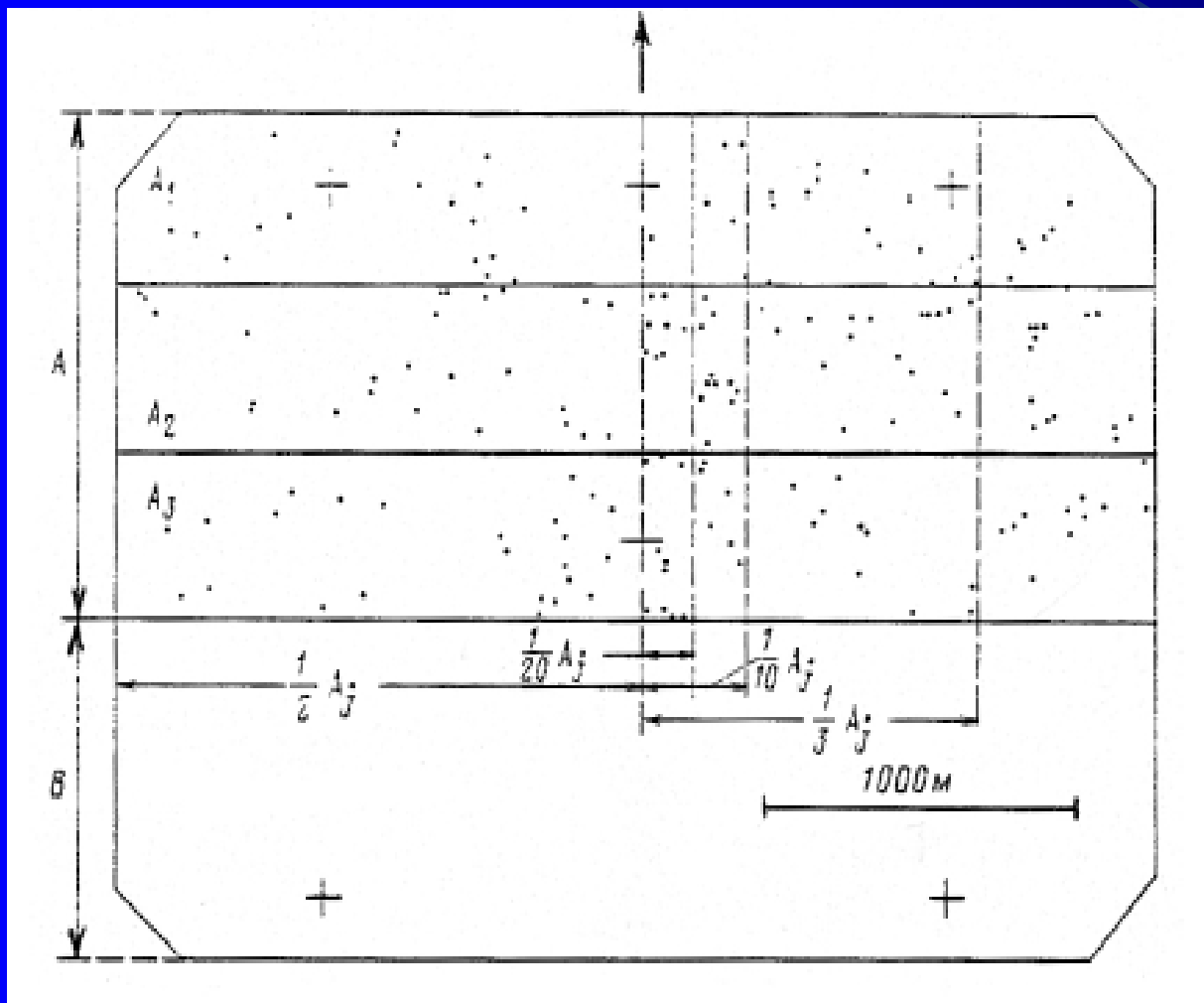
- 1 -  $\phi_i = 0^\circ$
- 2 -  $\phi_i = 90^\circ$
- 3 -  $S(k)$
- 4 - in situ

Аппроксимация - ДВИ  
(анизотропный спектр с постоянным потоком действия) и КВИ (изотропный спектр Филлипса)

$$S_Z(k, \varphi, X) = \begin{cases} 0 & k < k_m \\ B X k^{-10/3} \cos^4 \varphi & k_m < k < k_1 \\ k^{-4} & k_1 < k < k_2 \\ 0 & k_2 < k \end{cases}$$



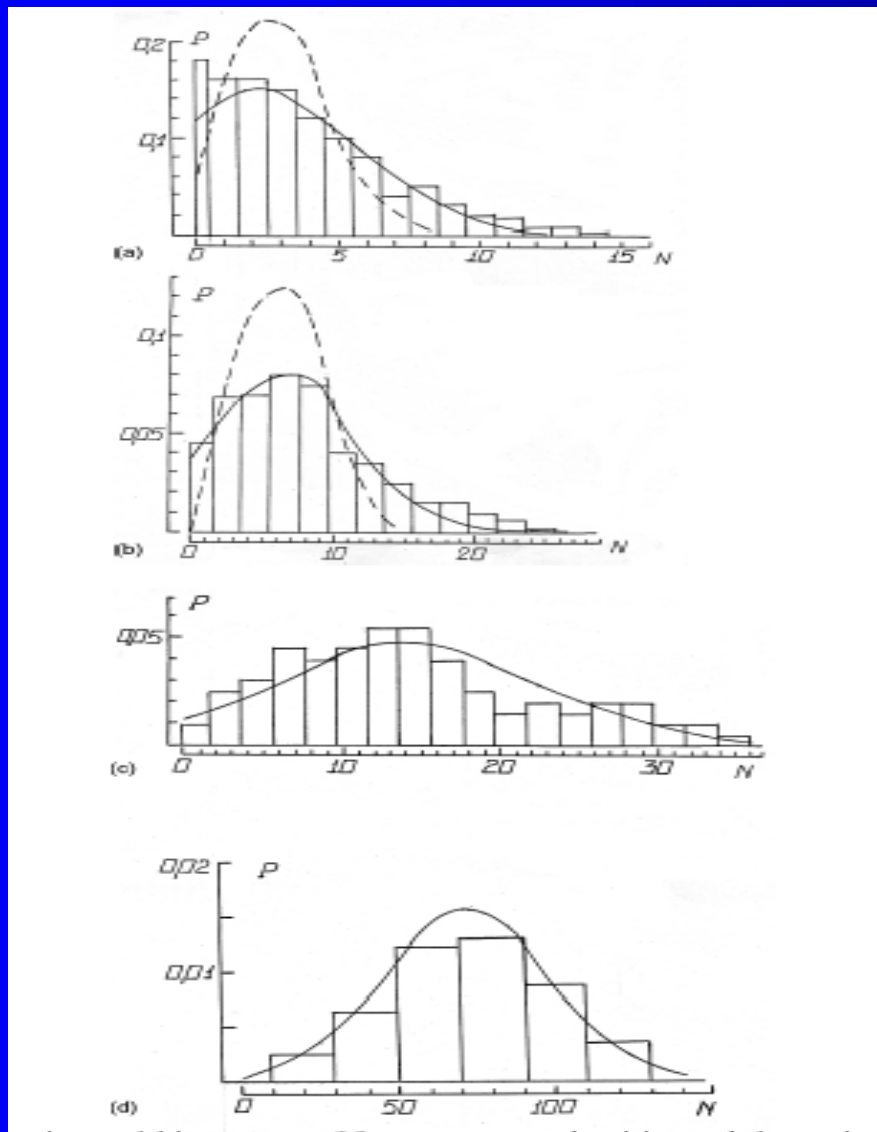
Транспорант с кадра съемки МКФ-6 со случайным полем ЦО  
(зона бликов В и волновые системы сняты )



- Основные зоны  $A_i$  с площадью  $1.49 \text{ км}^2$ .
- Субзоны  $(1/m)A_i$  ( $m = 2, 3, 10, 20$ ) с площадями  $(1/m) 1.49 \text{ км}^2$

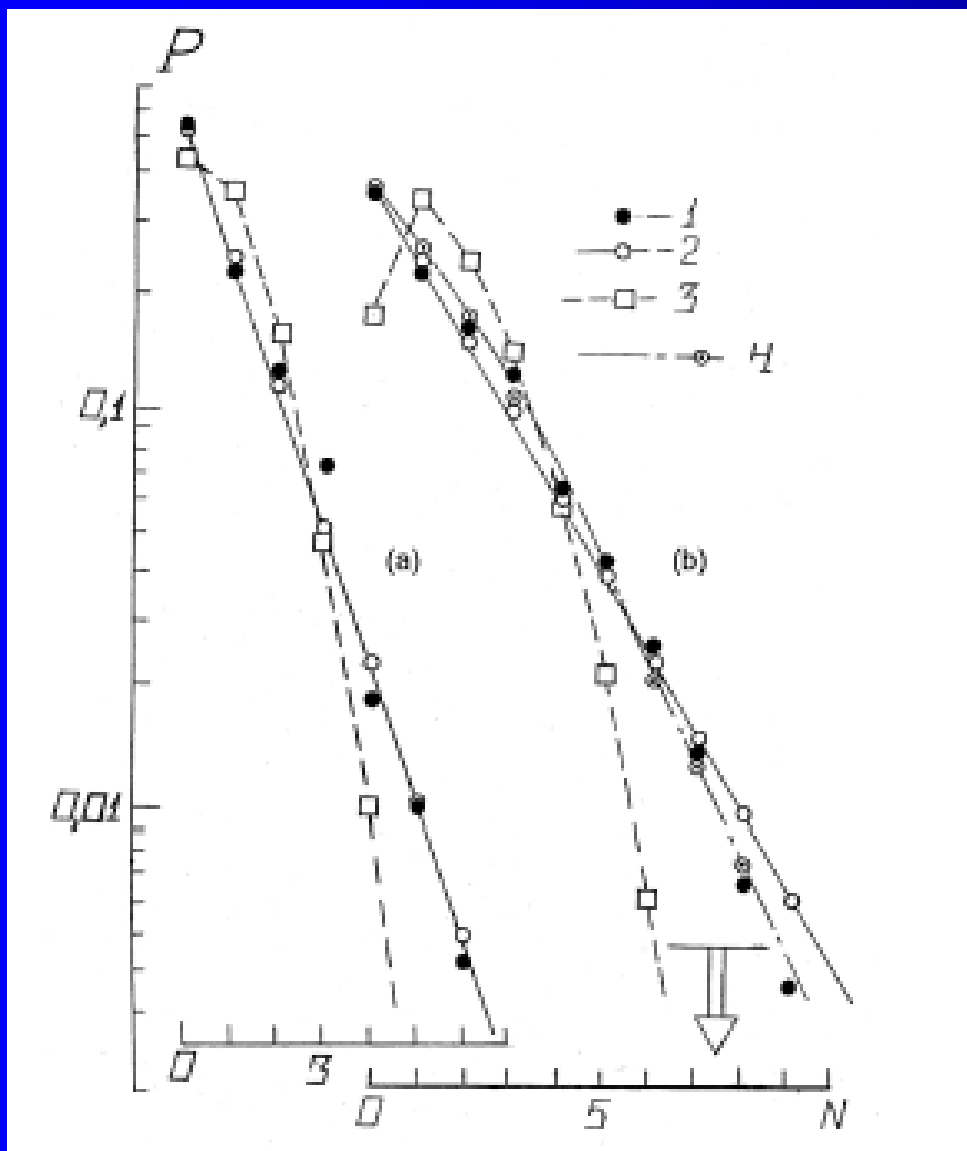
Экспериментальные гистограммы удельной плотности пенных структур и теоретические распределения в пространственных окнах:

(a) —  $1/40 S_0$ ; (b) —  $1/20 S_0$ ; (c) —  $1/10 S_0$ ; (d) —  $1/2 S_0$



- Сплошные линии — биномиальное распределение на диаграммах (a) и (b) и нормальное распределение на (c) и (d); пунктир на диаграммах (a) и (d) — распределение Пуассона

# Экспериментальные гистограммы целочисленных значений удельной плотности центров обрушения (1) для зон (1/160)S<sub>0</sub> (a) и (1/80)S<sub>0</sub> (b).



- 2 – геометрическое распределение с  $p = 0,575$  (a) и  $0,35$  (b); 3 – распределение Пуассона с  $\lambda = 0,86$  (a) и  $1,7$  (b); 4 – отрицательное биномиальное распределение с  $p = 0,49$ ,  $n=1,65$  (b).

# Параметры распределений удельной плотности центров обрушения

№ зоны,	Площадь исследуемого кадра - элемента выборки	Объем выборки	Тип аппроксимирующего закона	Определяющие параметры аппроксимирующего закона
1	$S_0$	39	НР	$N = 149; \sigma = 54$
2	$(1/2) S_0$	39	НР	$N = 73; \sigma = 26$
3	$(1/3) S_0$	39	НР	$N = 52; \sigma = 21$
4	$(1/10) S_0$	390	БР	$p = 1,02 \cdot 10^{-1}; N_0 = 149$
5	$(1/20) S_0$	780	БР	$p = 5,1 \cdot 10^{-2}; N_0 = 149$
6	$(1/40) S_0$	840	ОБР	$p = 2,3 \cdot 10^{-2}; N_0 = 149$
7	$(1/80) S_0$	920	ГР	$p = 0,49; n = 1,65$
8	$(1/160) S_0$	1920	ГР	$p = 0,575$
10	$(1/320) S_0$	960	ГР	$p = 0,71$
11	$(1/640) S_0$	1920	ГР	$p = 0,857$
12	$(1/1280) S_0$	3940	ГР	$p = 0,92$

## Характеризация ДПР ЦО

Целочисленное  
случайное  
точечное поле  
центров  
обрушения

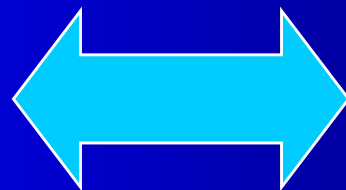
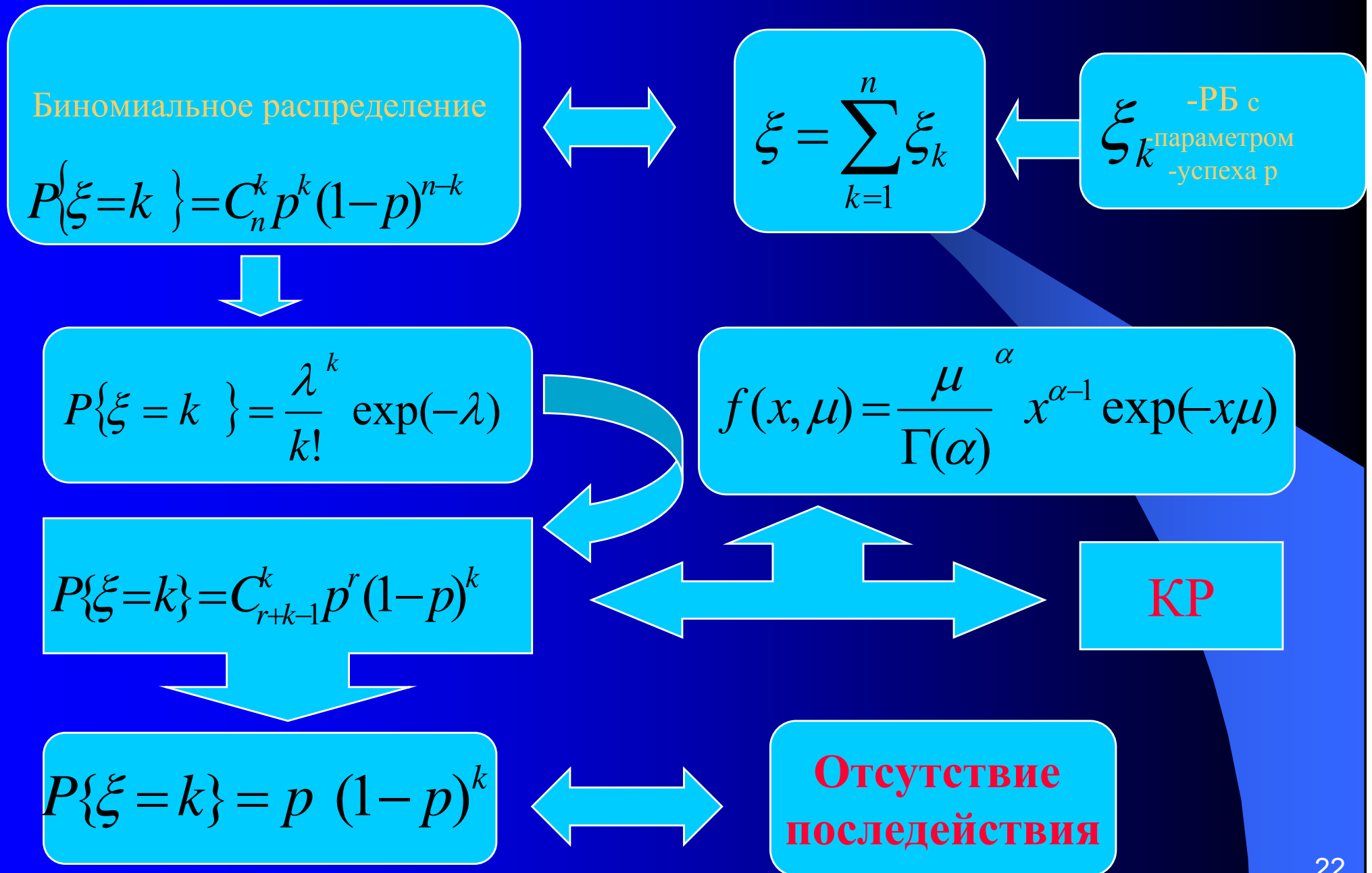
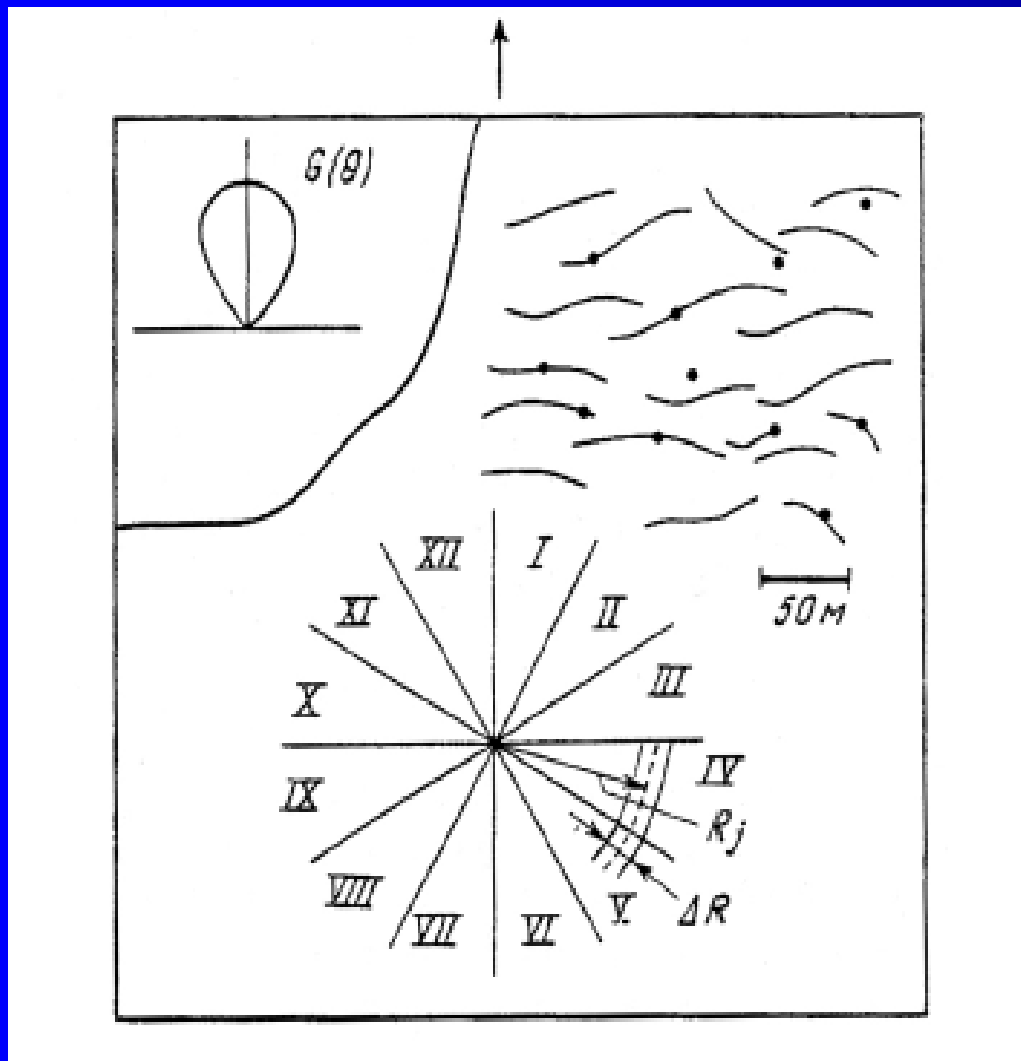


Схема Бернулли  
по двум исключаяющим  
классам  
с вероятностью  
успеха  $p$

# Характеризация ДПР ЦО

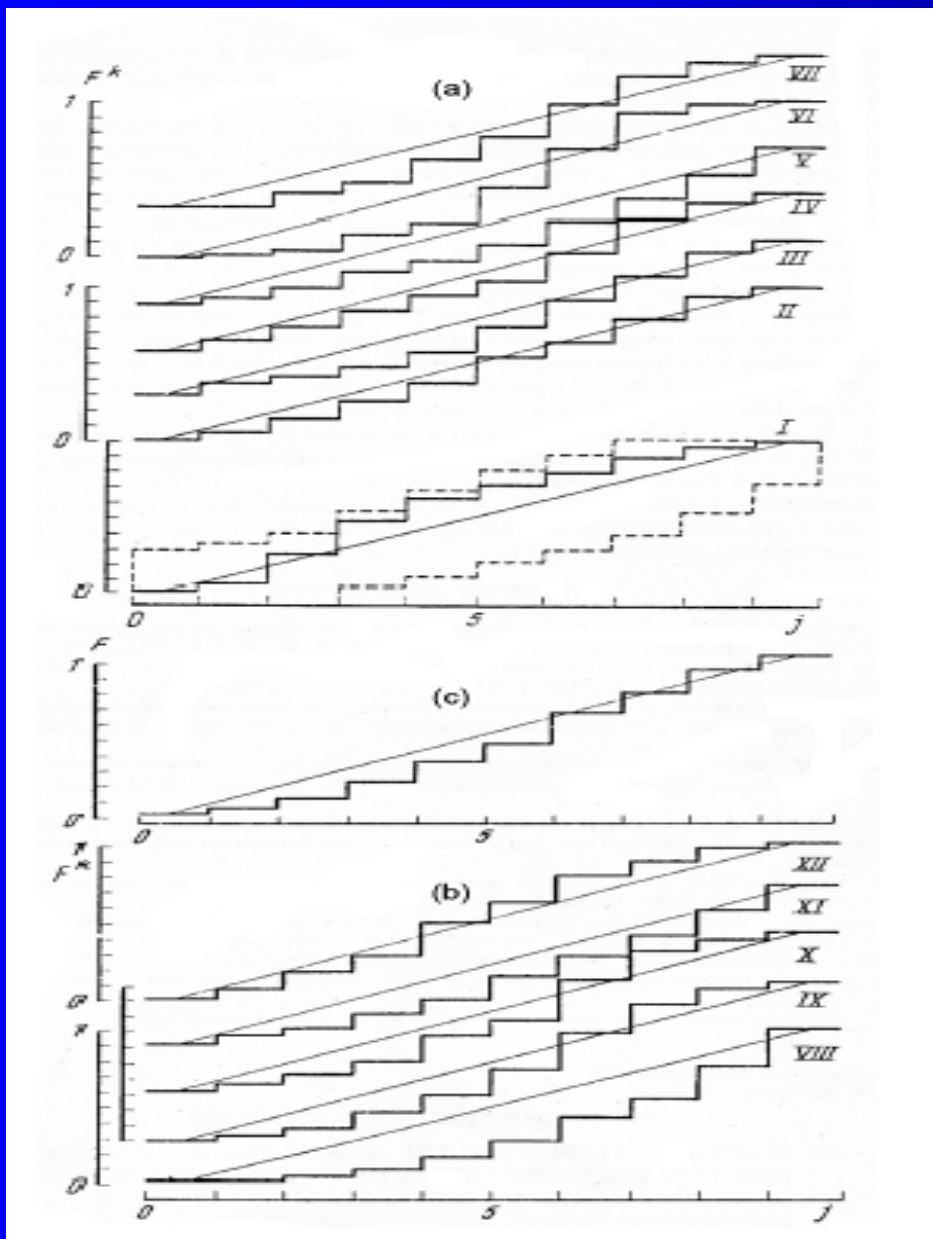


# Азимутальная однородность поля ЦО



- Фрагмент транспорта кадра № 4318 съемки аппаратурой МКФ-6 от 31.10.1981 г. со схематическим представлением систем энергонесущих компонент волнения и случайным точечным полем центров обрушения (точки) в верхней части рисунка. В нижней части показаны геометрия построения 12 секторов и разбиение сектора на пространственные зоны с текущим радиусом  $R_j$  и шагом  $\Delta R$

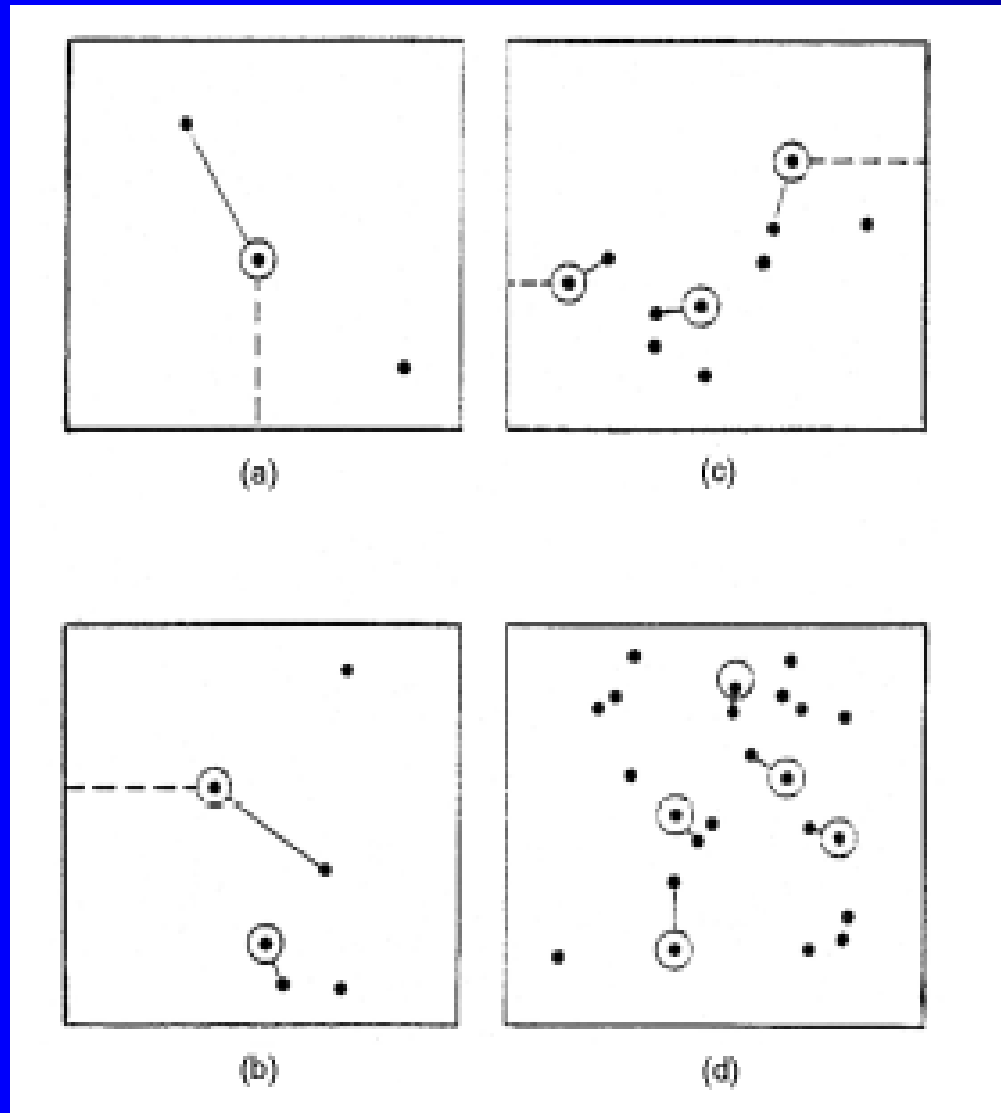
# Азимутальная однородность поля ЦО



- Экспериментальные функции распределения плотности центров обрушения в зависимости от сектора наблюдения: (a) — для секторов I—VII, (b) — VIII—XII; (c) для функции распределения усредненной по всем азимутам. Сплошные ступеньки- экспериментальные значения функции распределения, пунктир — 80% - ный доверительный коридор по критерию Колмогорова — Смирнова; прямые линии - теоретические функции распределения.

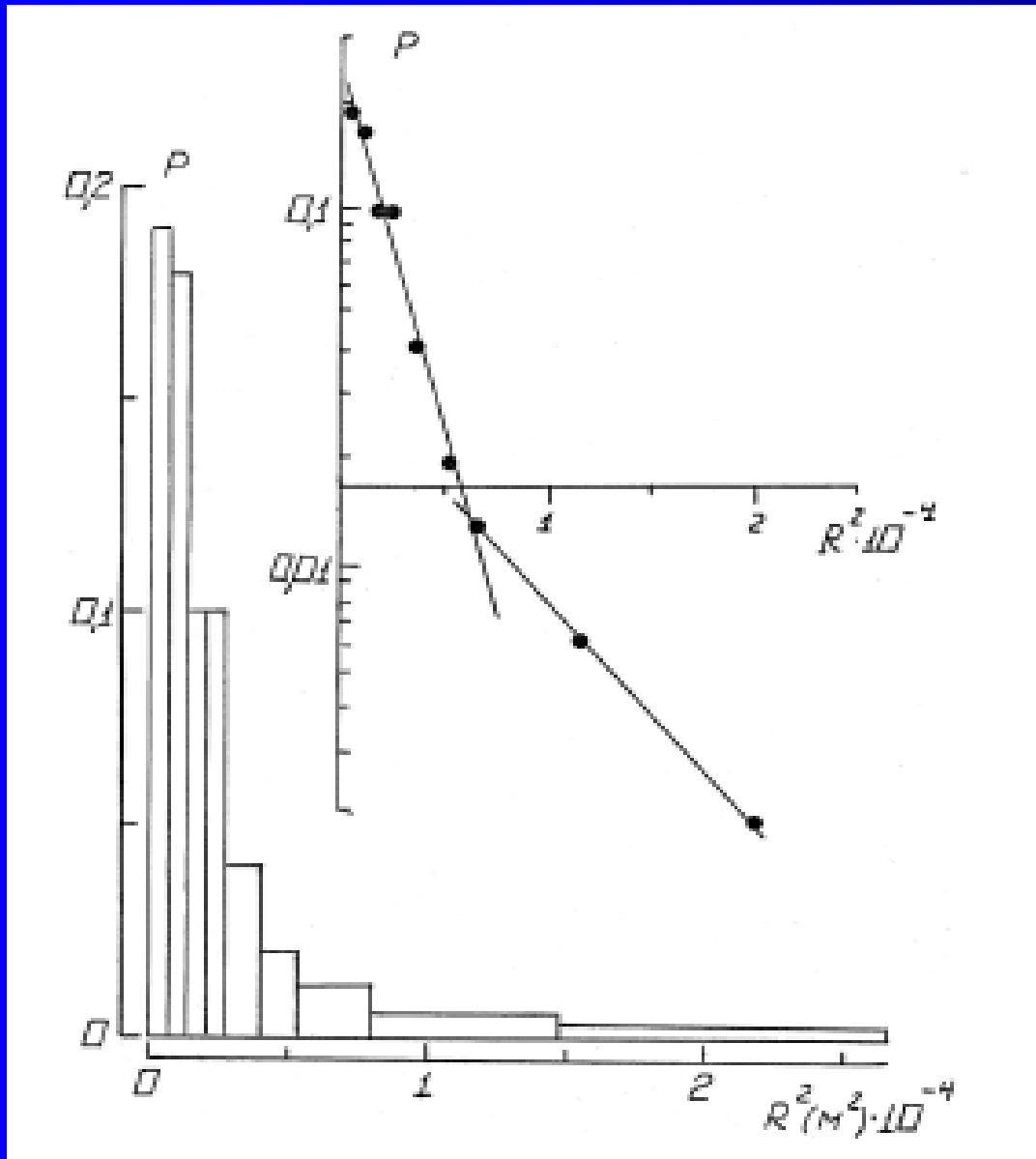


# Экспериментальное доказательство марковского свойства «отсутствия последействия» в поле ЦО на основе принципа ведущий-ведомый центры



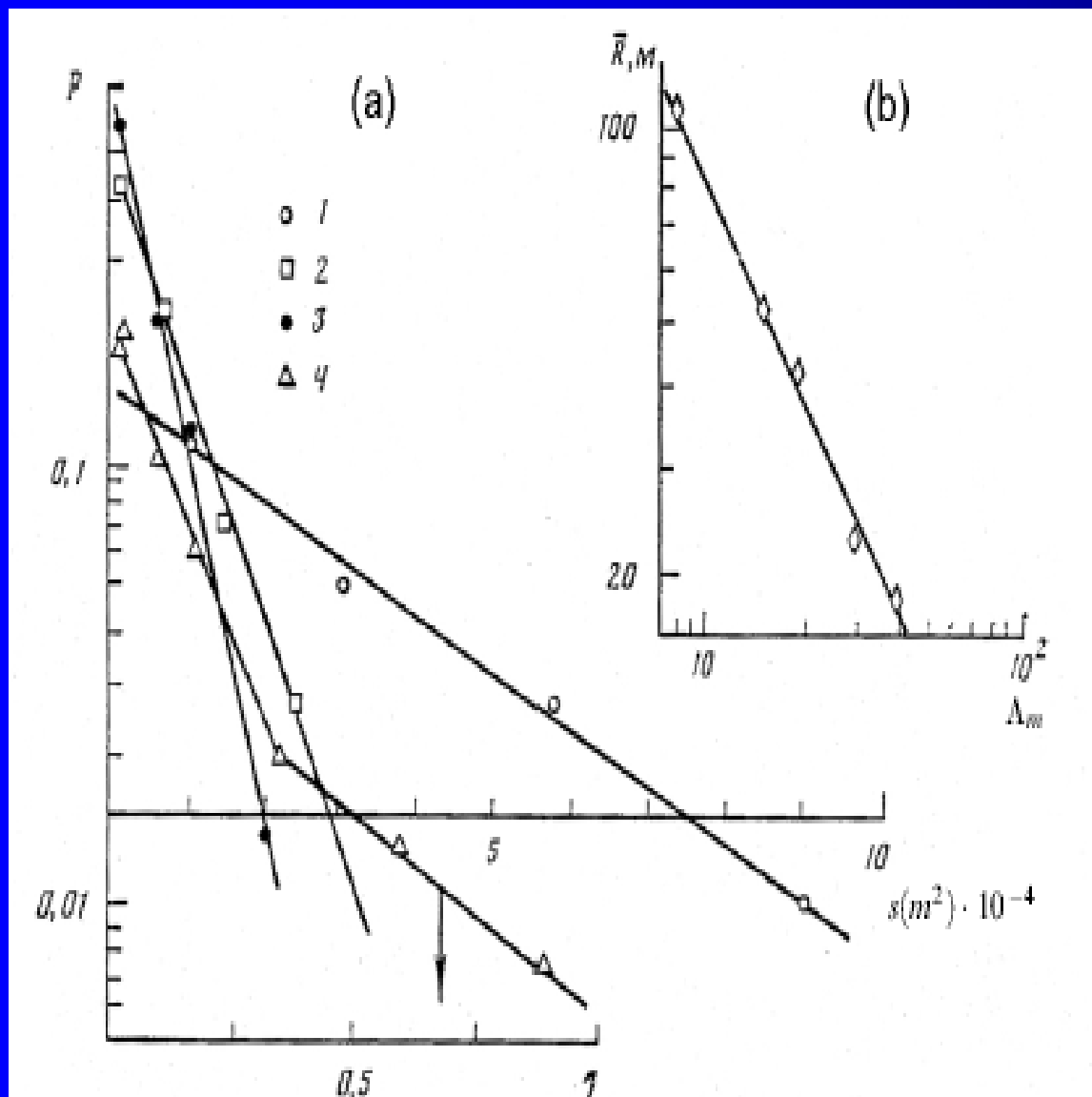
- Примеры транспарантов случайных полей центров обрушения с пространственным окном  $260 \times 280$  м: (a) — серия I при разгоне  $X = 24$  км ; (b) - серия II при  $X = 57$  км ; (c) — серия III при  $X = 95$  км ; (d) — серия IV при  $X = 156$  км. Ведущий центр обведен кружочком .

# Экспериментальное доказательство марковского свойства «отсутствия последействия» в поле ЦО на основе принципа ведущий-ведомый центры



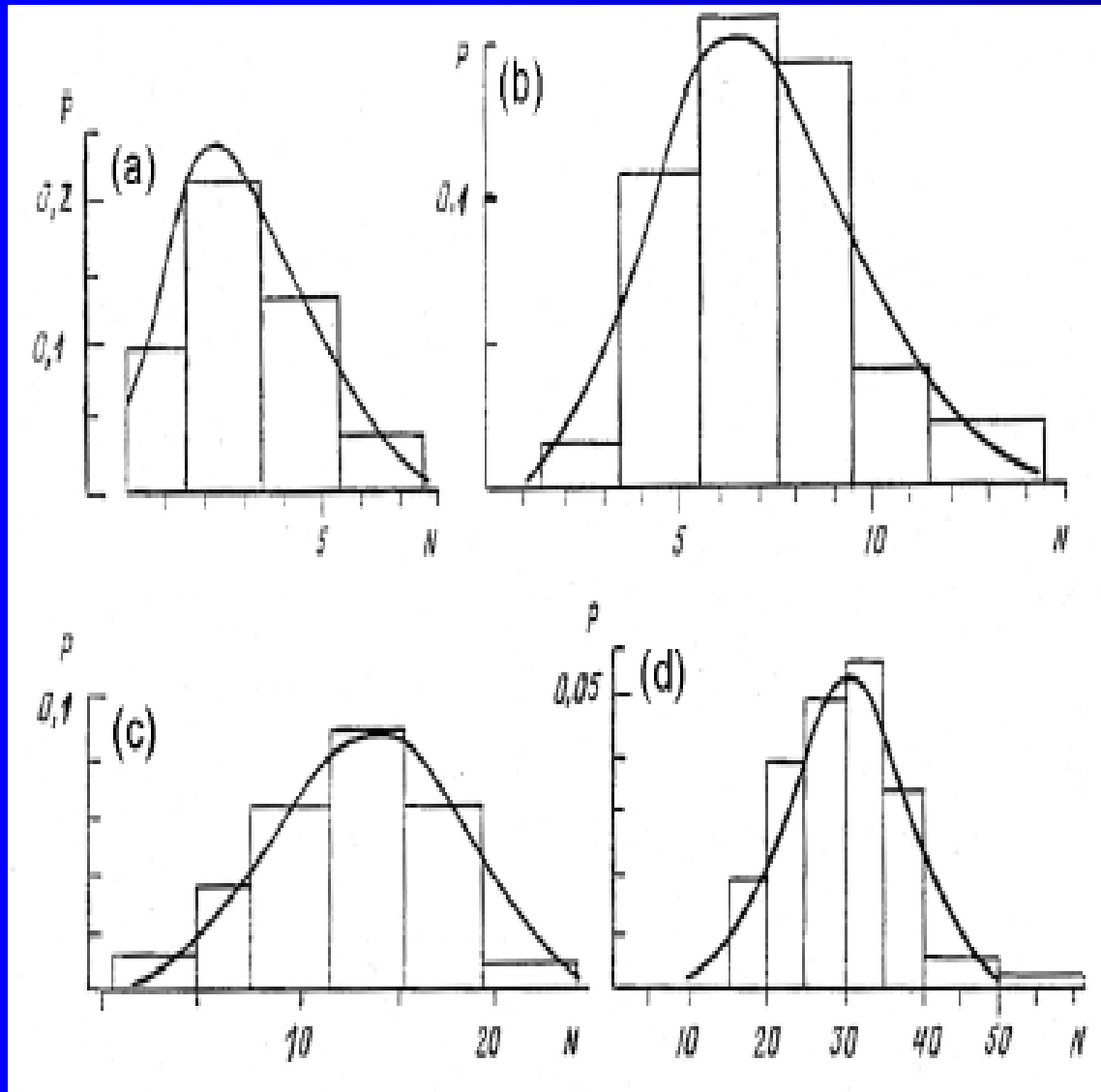
- Экспериментальная гистограмма плотности распределения "площади ожидания"  $S_w$  в линейном и полулогарифмическом (на вставке) масштабах. Объем выборки 320. Сплошные линии экспоненциальная аппроксимация  $p = A \exp(-\alpha S_w)$ ,  $\alpha = 1,44 \cdot 10^{-4} M^{-2}$ .

# Экспериментальное доказательство марковского свойства «отсутствия последействия» в поле ЦО на основе принципа ведущий-ведомый центры



- Экспериментальные гистограммы (а) плотности вероятности площади ожидания  $p(S_w)$  для разгона: 1 —  $X = 24$ ; 2 - 57; 3 - 95; 4 - 156 км; сплошные линии - теоретические показательные распределения; б — экспериментальная зависимость среднего радиуса площади ожидания от длины волны максимума спектра  $\Lambda_m$ : сплошная линия - теоретическая аппроксимация
  - $R = B \Lambda_m^{-1,1}$
  - $(B = \text{const})$ .

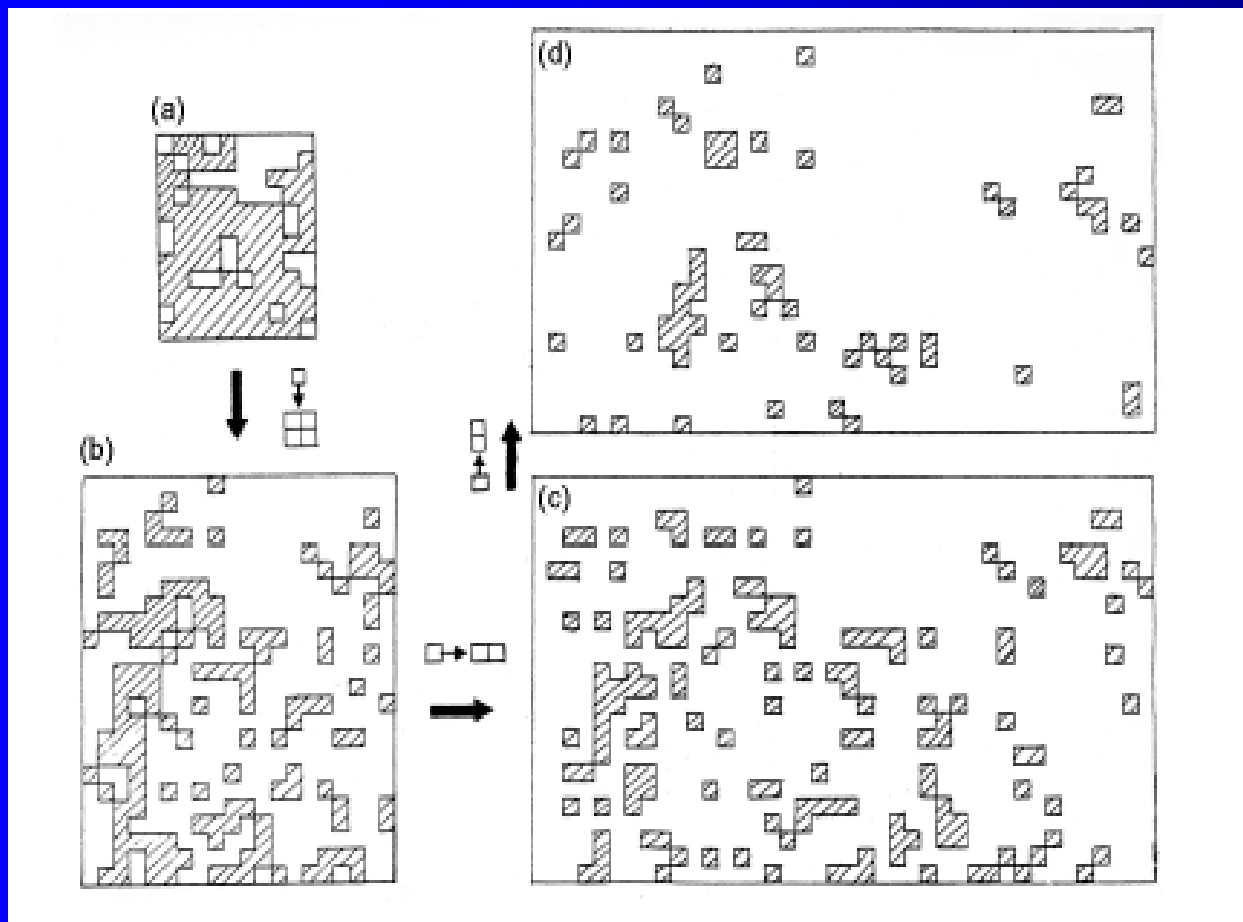
# Интенсивность обрушений в зависимости от разгона



- Экспериментальные гистограммы плотности центров обрушения  $N$  в зависимости от разгона  $X$ : (а) — 24 ; (b) - 57; (с) — 95; (d) — 156 км. Сплошные линии - теоретические распределения .
- Экспериментальная аппроксимация :

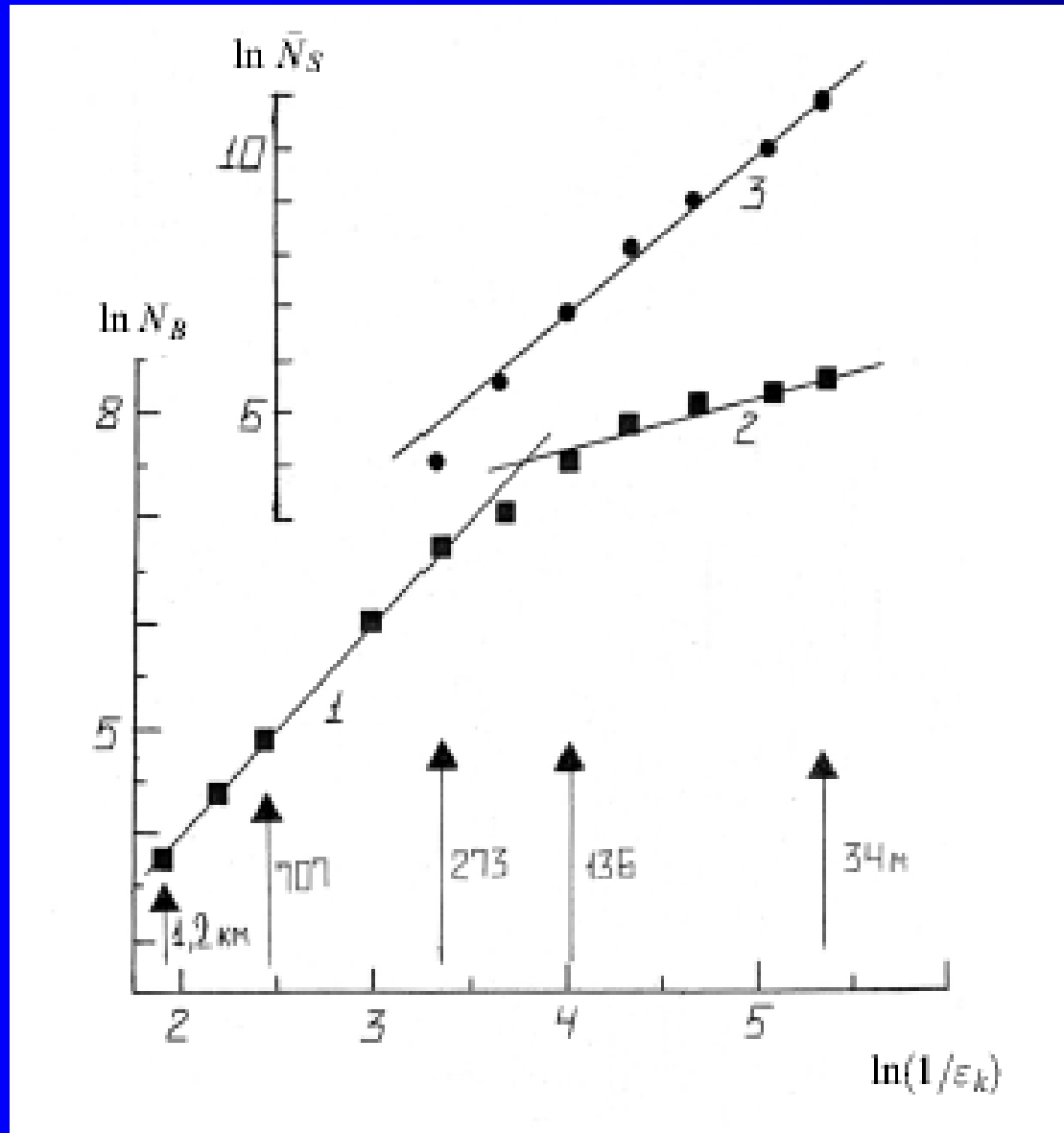
$$\bar{N} = \begin{cases} AX & X \leq 90 \text{ km} \\ BX^2 & X > 90 \text{ km} \end{cases}$$

# Масштабо-инвариантные свойства поля ЦО



- Ячейковая структура поля обрушения морских волн одной и той же морской акватории в условиях развитого волнения ( $X = 250$  км и  $\Lambda_m = 42$  м) при следующих масштабах разбиения:  $k = 4$  (a), 6 (b), 7 (c), 8 (d). Заштрихованные ячейки содержат хотя бы одно обрушение  $N_K > 1$ , пустая —  $N_K = 0$ . На вставках показан характер разбиения площади ячейки при переходе к следующей масштабности дробления

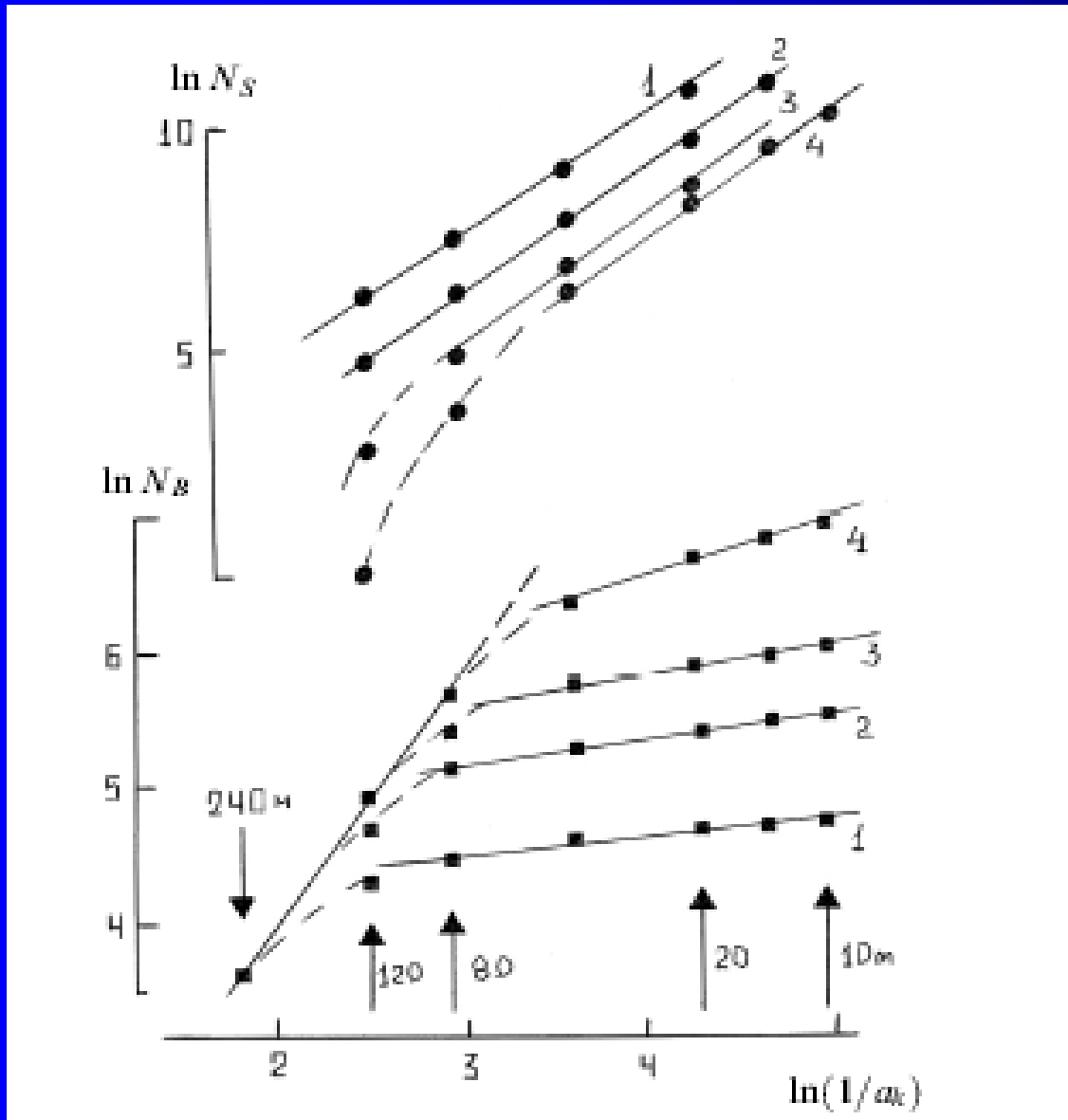
# Масштабо-инвариантные свойства поля ЦО



- Зависимости количества заполненных  $N_B$  и пустых  $N_S$  ячеек от линейного размера пиксела  $\epsilon_k$  для развитого волнения (при  $X=250$  км и  $\Lambda_m=42$  м). Первые три квадрата соответствуют площадям пиксела в 1,5, 0,75 и 0,5 км<sup>2</sup>, а последующие  $1,5/n_K$ , где  $n_K = 5 \cdot 2^K$  ( $K=1-8$ ).

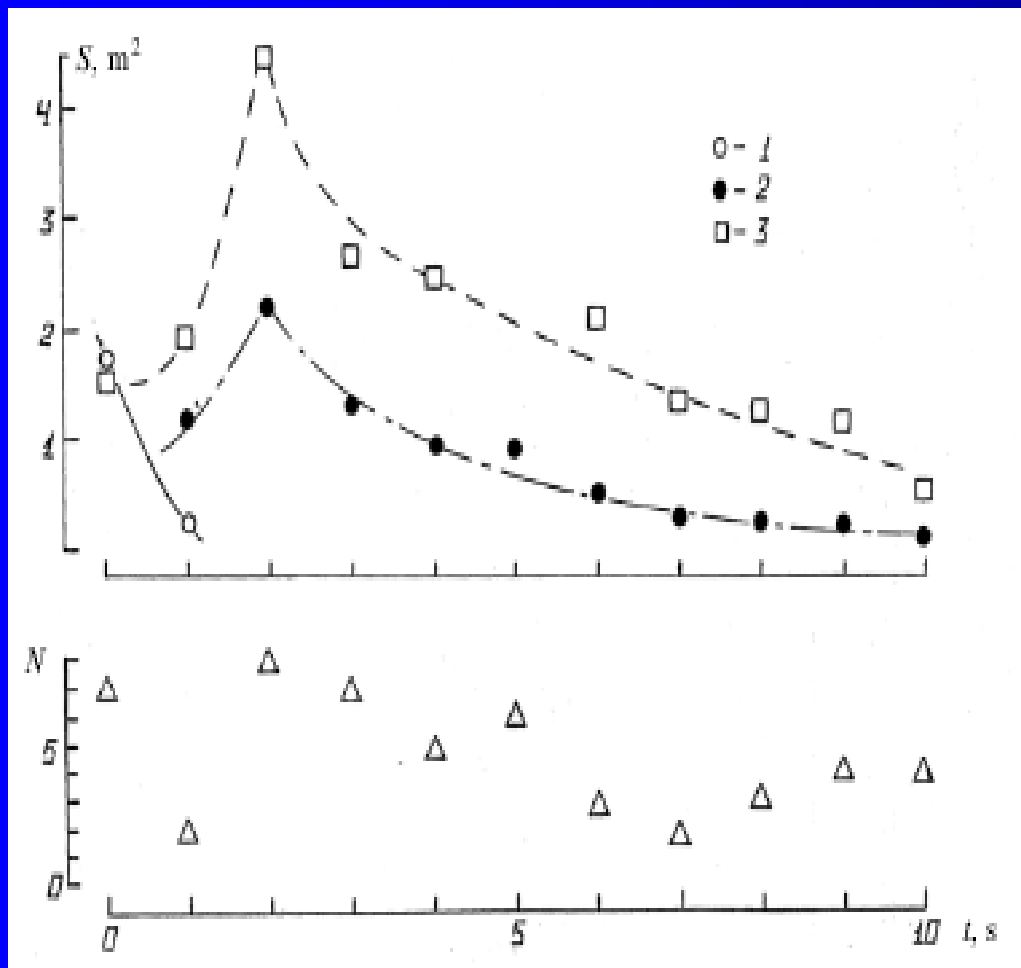
$$d = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{\ln N(\epsilon)}{\ln(1/\epsilon)}$$

# Масштабо-инвариантные свойства поля ЦО



- Зависимости количества заполненных  $N_B$  и пустых  $N_S$  ячеек от линейного размера пиксела  $a_k$  ( $a_k = 240$  м; 120; 80; 40; 20; 14; 10) для развивающегося волнения : 1 – при  $X = 24$  км и  $\Lambda_m = 7$  м ; 2- – при  $X = 57$  км и  $\Lambda_m = 14$  м ; 3 – при  $X = 95$  км и  $\Lambda_m = 18$  м ; 4 – при  $X = 156$  км и  $\Lambda_m = 30$  м .

## Временной ряд параметров обрушения волны



- 1- площадь обрушающегося гребня. 2 – площадь полосовой пены . 3- площадь турбулентного пятна .  
 $N$  – число мезообрушений в площади в 74 кв. м



# Интенсивность выбросов гауссового поля за фиксированный уровень

$$N = (m_{20}m_{02} - m_{11}^2) (2\pi m_{00})^{-3/2} \exp\left\{-\frac{a^2}{2m_{00}}\right\}$$

- (Karlin, 1968)

$$N = \frac{64}{\pi^4 \sqrt{135}} \frac{(ak_m)k_m^{5/4}}{(B_0 + X)^{5/2} k_1^{1/2}} \exp\left[-\frac{4}{3} \frac{(ak_m)^4}{(B_0 + X)k_1^{1/2}}\right]$$

- (Sharkov, 2007)

$$a = (g/2)(2\omega_m^2)^{-1/2}$$

$$ak_m = 0.25$$

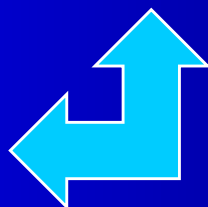
- Узкополосный спектр (Longuet-Higgins, 1969)

$$N \sim X^{-3.3} \exp(-X^{-0.67})$$

$$N \sim X^{-8}$$

- JONSWAP spectrum (Snider and Kennedy, 1983)

$$\bar{N} = \begin{cases} AX & X \leq 90 \text{ km} \\ BX^2 & X > 90 \text{ km} \end{cases}$$



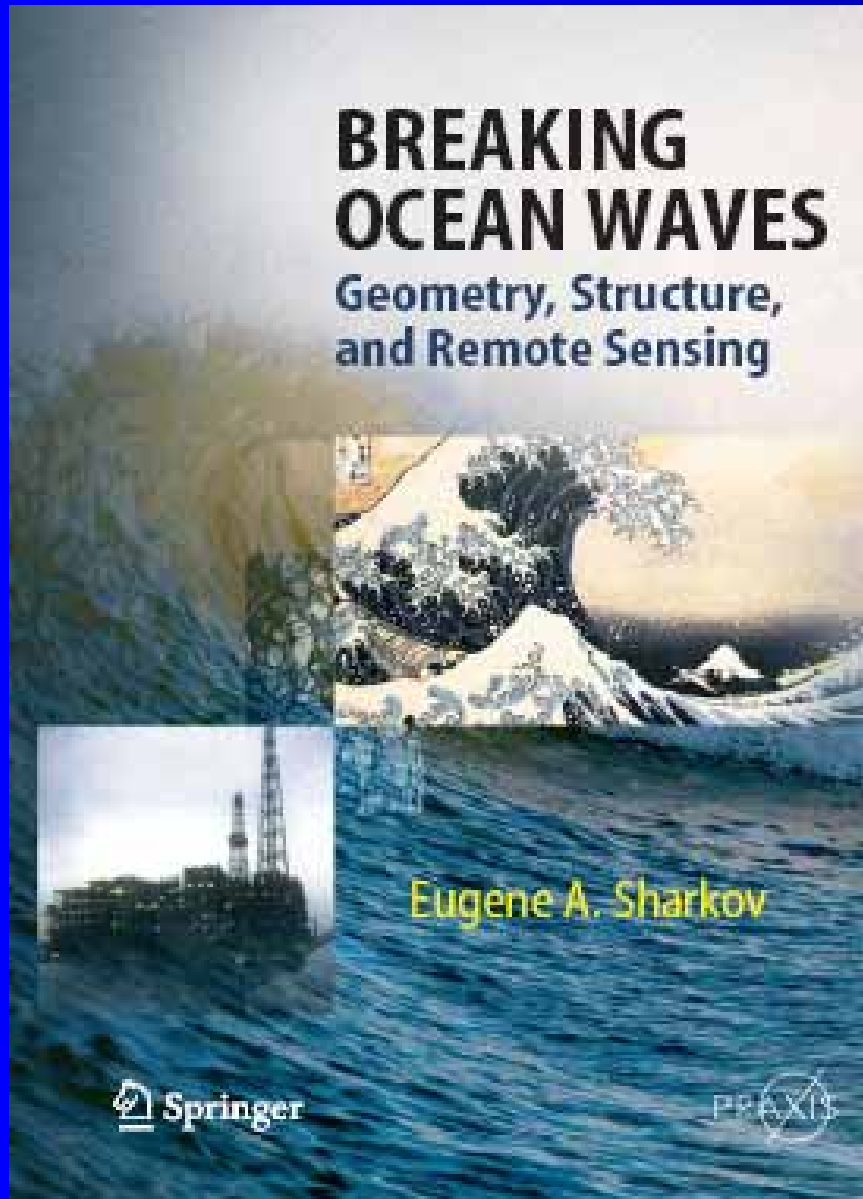
# Выводы

- Поле индивидуальных обрушений свободных гравитационных волн является строго двумерным пуассоновским процессом (марковское свойство «отсутствия последствий»), обладая при этом явно выраженными масштабо-инвариантными свойствами
- Нелинейная стадия процесса обрушения формируется за времена, существенно меньшие, чем период обрушающейся гравитационной волны
- Модель «выбросов» за фиксированный уровень случайного гауссового поля возвышений морской поверхности и концепция «порогового» механизма в корне противоречат экспериментальным данным и принципиально не могут быть использованы для исследования процессов пространственно-временных характеристик полей обрушения гравитационных волн на «глубокой» воде.

## Возможности и перспективы.

- Исследования пространственной структуры обрушений в условиях резконеустойчивой стратификации
- Региональные и глобальные поля обрушений и пенопокрытий
- Поиски структур (фрактального или самоорганизационного типа) в поле выходов внутренних волн и атмосферных внутренних волн
- Теория обрушений в условиях комбинированного спектра волнения в широком диапазоне волновых чисел ( $\Delta k = 100$ ) и с конечным азимутальным спектром и турбулентности приводного слоя
- Учет в радиофизических моделях рассеяния и излучения факт эволюции ДПР в кадре пространственного разрешения

# Литература



- Покровская И.В., Шарков Е.А. ДАН. 1987. Т.293. №5. С.1108-1111.
- Заславский Г.М., Шарков Е.А. ДАН. 1987. Т.294. №6. С.1362-1366.
- Покровская И.В., Шарков Е.А. ИЗК. 1986 №5. С.18-25
- Покровская И.В., Шарков Е.А. ИЗК. 1988 №3. С.11-22.
- Грушин В.А., Ильин Ю.А., Лупян Е.А., Шарков Е.А. и др. ИЗК. 1986. № 2. С. 57-67.