



4-е Всероссийское совещание заведующих кафедрами вузов по вопросам образования в области безопасности жизнедеятельности и защиты окружающей среды (21 – 26 сентября 2009 г., г. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана)

# **Анализ опасностей и количественная оценка риска аварий на опасных производственных объектах**

**Гражданкин Александр Иванович**

*зав. сектором количественной оценки риска, канд. техн. наук*

*НТЦ "Промышленная безопасность" (Москва)*

<http://safety.moy.su/>

[www.safety.ru](http://www.safety.ru)

[gra@safety.ru](mailto:gra@safety.ru)

+7 (495) 620-47-50



# Перечень рассматриваемых вопросов

- **1. Сущность проблемы аварийности и травматизма**  
(энерго-энтропийная концепция природы аварийности и травматизма);
- **2. Основные причины и факторы аварийности и травматизма**  
(общие принципы предупреждения происшествий);
- **3. Как и чем измерить риск аварии**  
(Модели и методы прогнозирования аварий и их последствий);
- **4. Нормативно-методическое обеспечение анализа риска**  
(Примеры оценки риска аварии из практики декларирования промышленной безопасности – см. на <http://safety.moy.su> )



# Примеры крупных промышленных аварий

7 июня 2001 г., США, Норко

Крупнейший в мире пожар на резервуаре

Емкость- 51675 м<sup>3</sup> (325 000 баррелей)

# Примеры крупных промышленных аварий

Вид огненного шара от автоцистерны с 120 м<sup>3</sup> СНГ, Крескент Сити (шт. Иллинойс, США), 21 июня 1970. Масштаб катастрофы можно оценить по ориентирам: водонапорной башне (слева) и поезду (справа).  
Источник: Взрывные явления. Оценка и последствия. Бейкер У. и др. М.: Мир, 1986



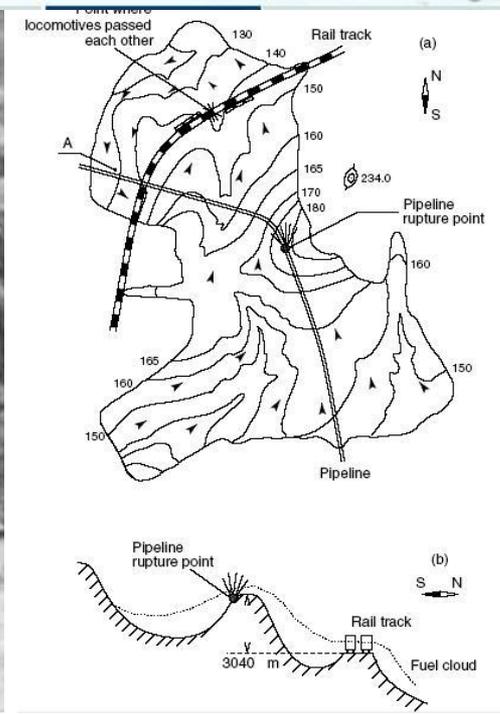
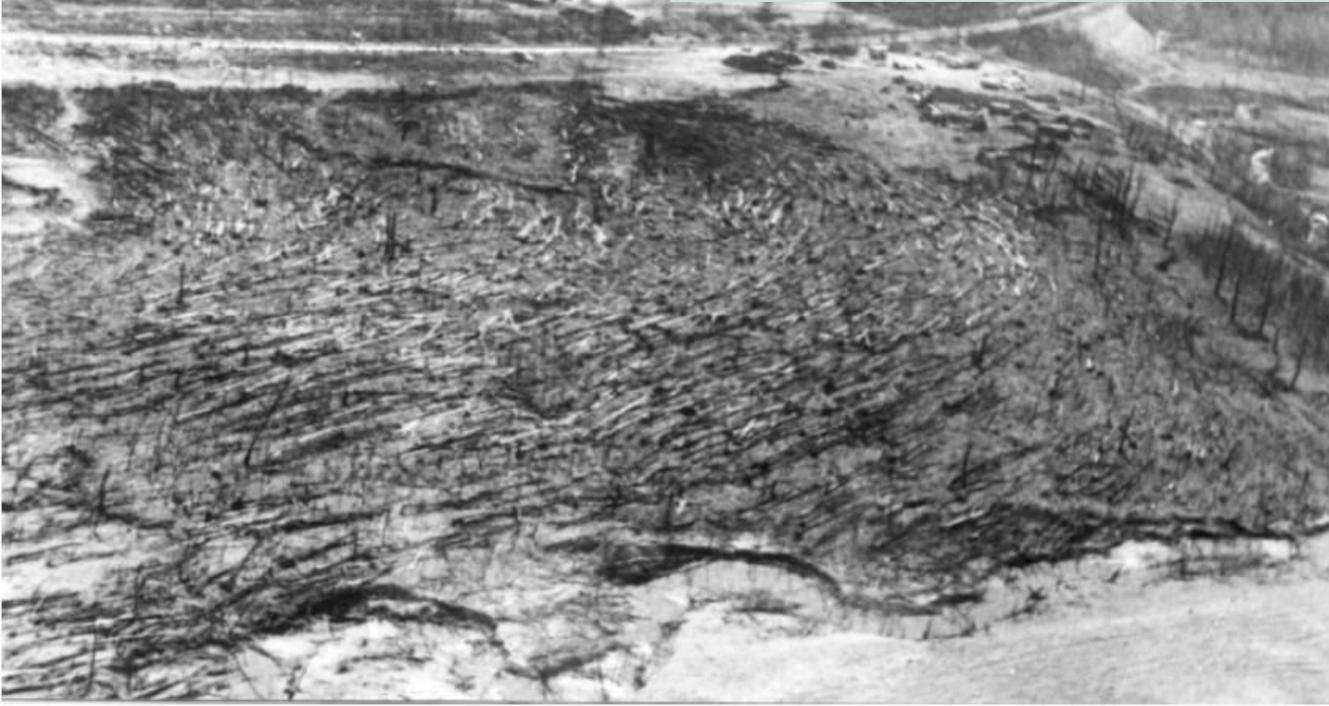
# Примеры крупных промышленных аварий

PUERTOLLANO, SPAIN, 14-AUG-2003:



PUERTOLLANO, SPAIN, 14-AUG-2003: Picture shows smoke coming from a Repsol-YPF petrochemicals complex following an explosion in Puertollano, 230 kilometers (140 miles) south of Madrid August 14, 2003. Three people were killed and seven seriously injured August 14 when an accidental explosion ripped through a Spanish petrochemicals complex, the oil company said. [Photo by Stringer, copyright 2003 by AFP, Getty Images, and ClariNet]

Россия, Уфа, 4 июня  
1989 г. Авария на  
магистральном  
газопроводе. Погибло  
или тяжело пострадало  
1224 человека. Площадь,  
покрытая облаком – 2.5  
кв. км.





PIPER ALPHA, 06.06.1988  
First rescue craft



Северное море, 06.07.88. Авария на платформе «Piper Alpha»  
Погибло 164 чел.

Англия, Лондон, 11 декабря 2005 г -  
самый большой со времён второй  
мировой войны промышленный  
пожар на нефтехранилище  
Bansfield . В общей сложности  
огнем были охвачены 20  
резервуаров с топливом.  
Пострадало 43 человека.



22 августа 2009 г. Ханты-Мансийском АО авария на ЛПДС "Канда"





22 августа 2009 г. Ханты-Мансийском АО авария на ЛПДС "Канда"





# 1. Техногенное происшествие на опасном производственном объекте

- **Авария, инцидент**  
(ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.7.1997 N 116-ФЗ; ФЗ-117);
- **Сверхнормативное загрязнение окружающей среды**  
(ФЗ «Об охране окружающей среды» от 10.1.2002 N 7-ФЗ);
- **Несчастный случай на производстве**  
(Трудовой Кодекс РФ от 30.12.2001 N 197-ФЗ);
- **Пожар**  
(ФЗ «О пожарной безопасности» от 21.12.1994 N 69-ФЗ);
- **Чрезвычайная ситуация**  
(ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» от 21.12.1994 N 68-ФЗ )
- **Аварийный разлив нефти и нефтепродуктов**  
(Постановления Правительства РФ от 21.8.2000 N 613, от 15.4.2002 N 240)

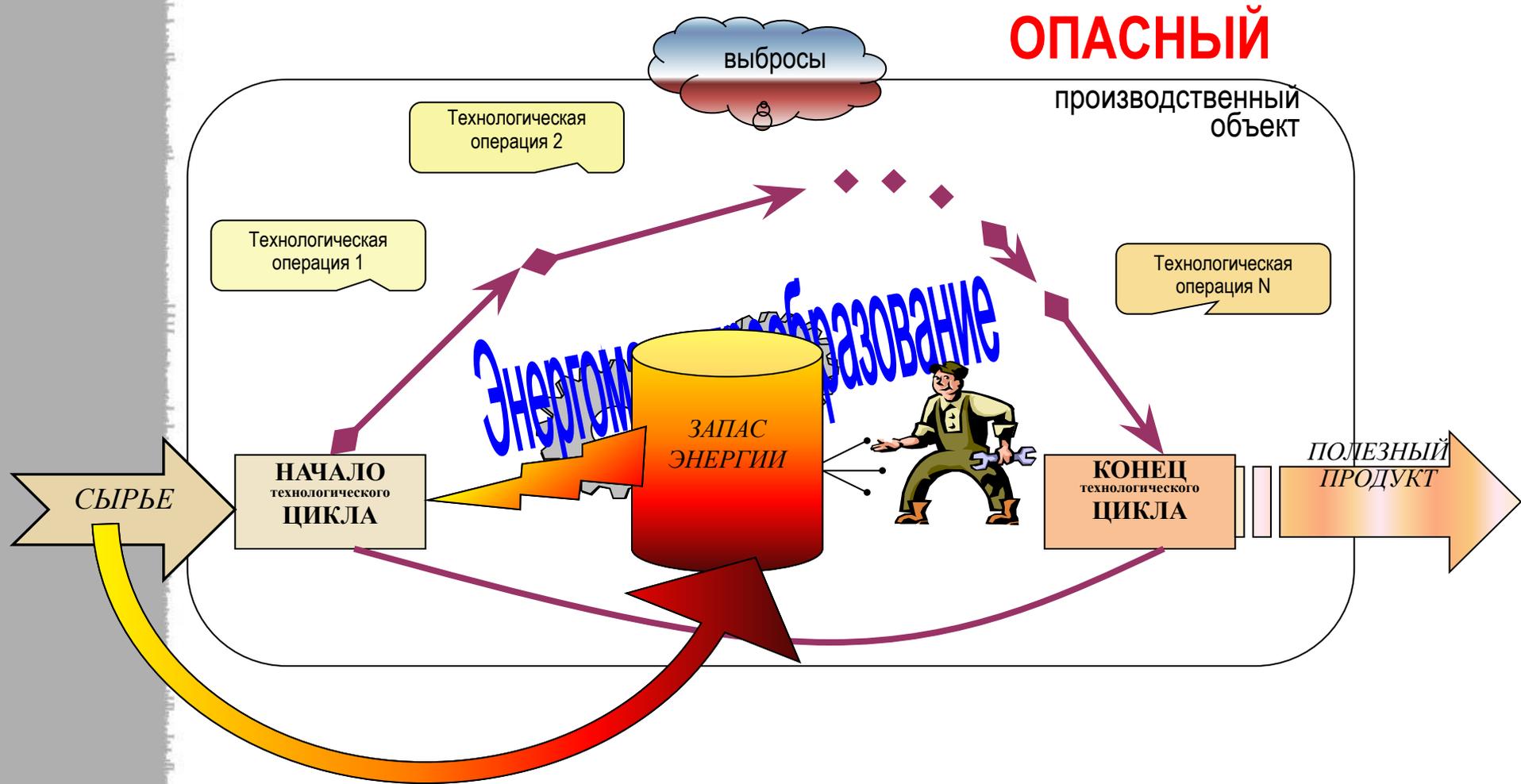


# 1. Энерго-энтропийная концепция природы аварийности и травматизма:

- **Производственная деятельность** связана с **энергопотреблением**  
(выработка, хранение, преобразование различных видов энергии);
- **Уменьшение** энергетических потенциалов сопровождается совершением **работы**
- **Диссипация** - одно из основных свойств энергии: **энтропия** (мера хаоса) закрытой системы самопроизвольно **увеличивается**  
(Второе начало термодинамики);
- **Неуправляемое** высвобождение накопленной энергии приводит к аварии  
(«с точки зрения энергии» это направление более простое, чем совершение полезной «для человека» работы)

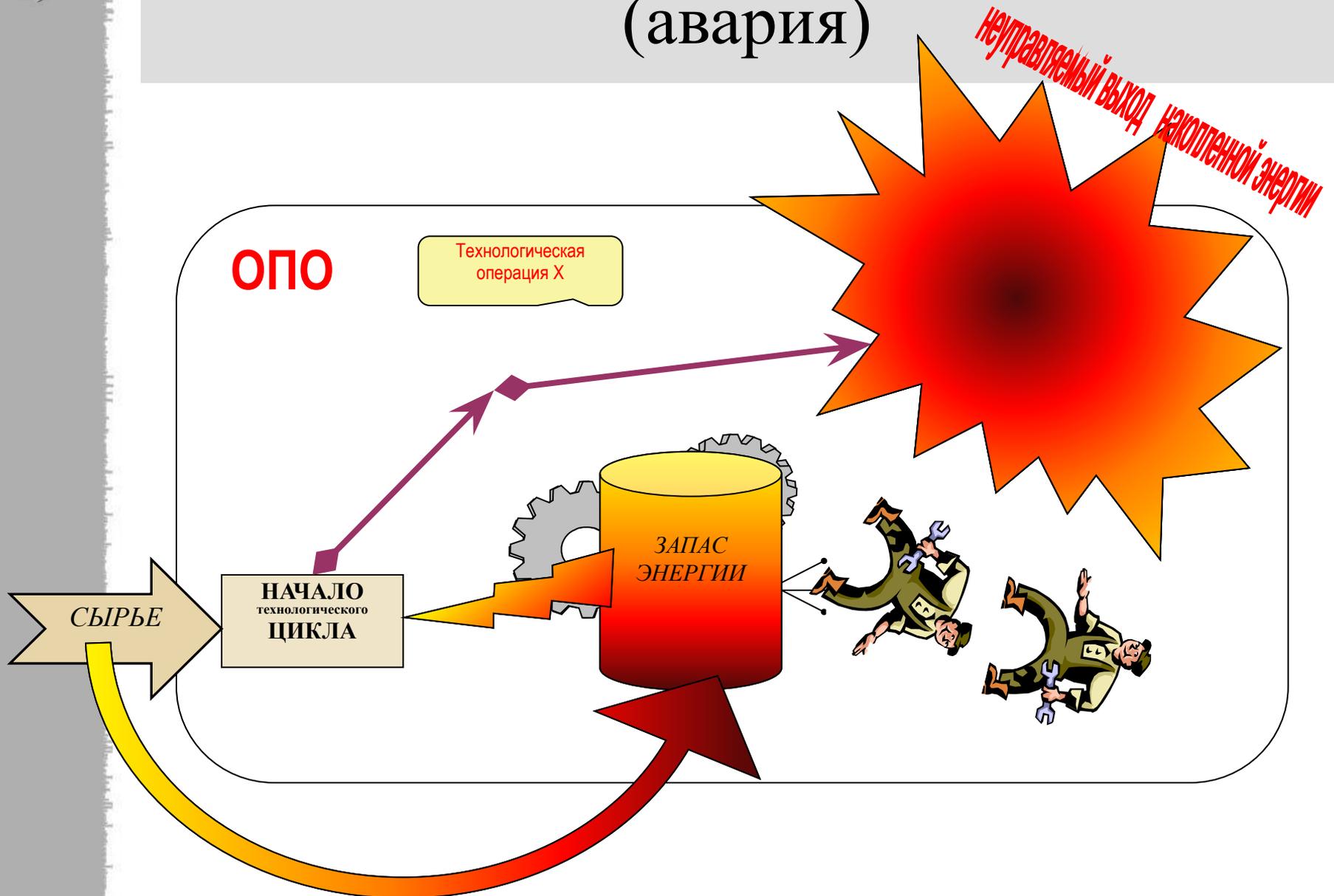


# Штатное функционирование опасного производственного объекта (ОПО)





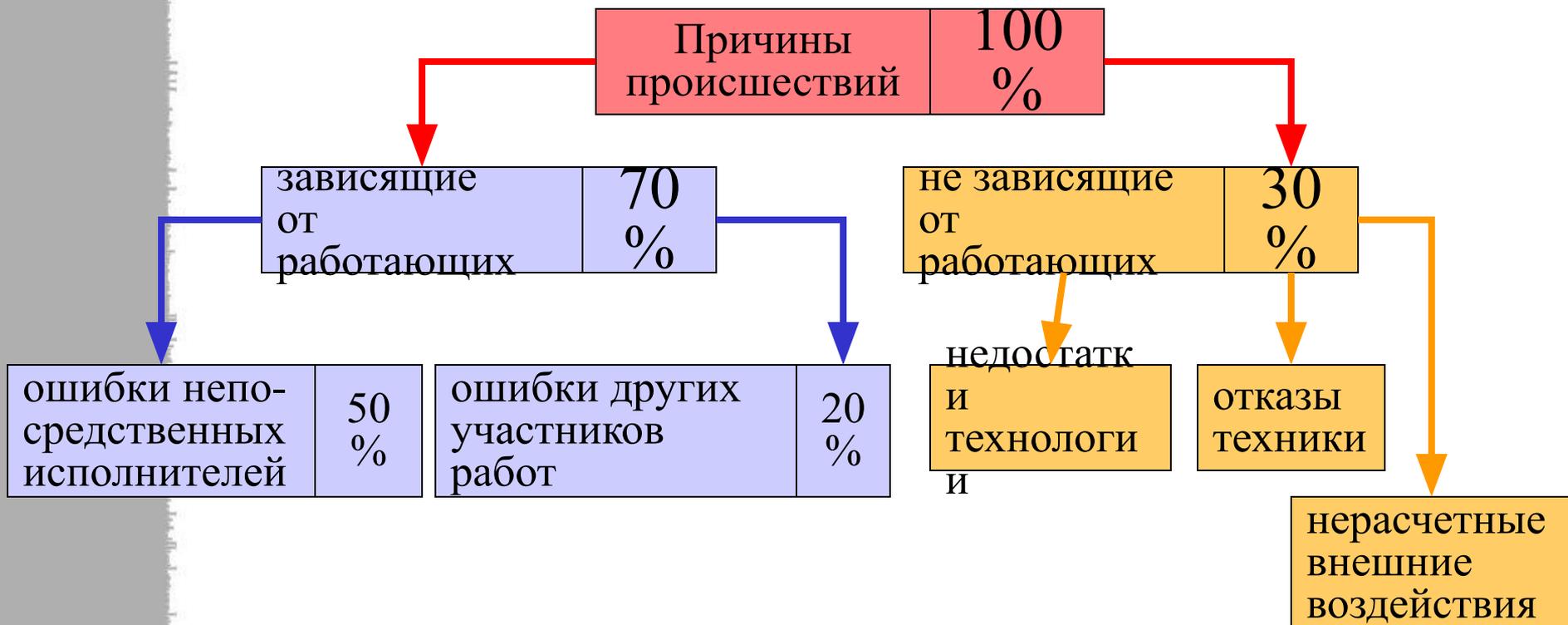
# Нештатное функционирование ОПО (авария)





## 2. Основные причины и факторы аварийности и травматизма

- **Ошибки человека**
- **Отказы техники**
- **Нерасчетные внешние воздействия**





## 2. Основные закономерности возникновения аварий

- К аварии, как правило, приводит не одна причина, а цепь соответствующих предпосылок
- Инициаторами и звеньями такой цепи служат ошибки людей, отказы техники и/или нерасчетные воздействия на них извне
- Типичная причинная цепь: *ошибка/отказ/вн.воздействие—>*
  - > *появление опасности (потока энергии) в неожиданном месте и/или не вовремя*
  - > *отсутствие/отказ средств защиты и/или неточные действия персонала*
  - > *воздействие опасных факторов на незащищенные элементы техники, людей и/или окружающей среды*
  - > *причинение ущерба людским, материальным и/или природным ресурсам.*



# 3. Как и чем измерить риск аварии

**3а.** Основные определения

**3б.** Основные этапы анализа риска

**3в.** Оцениваемые показатели риска аварии

**3г.** Методы анализа опасности и оценки риска



# Опасность, Безопасность, Риск

## основные определения (РД 03-418-01)

**Авария** — разрушение сооружений и (или) технических устройств, применяемых на опасном производственном объекте, неконтролируемые взрыв и (или) выброс опасных веществ. (др. сл-ми событие с причинением ущерба)

**Ущерб от аварии** — потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, причиненные в результате аварии на ОПО и исчисляемые в денежном эквиваленте (др. сл-ми ухудшение потребительских свойств чего-либо).

**ОПАСНОСТЬ аварии** — потенциальная угроза, возможность причинения ущерба человеку, имуществу и (или) окружающей среде вследствие аварии на ОПО (др. сл-ми стохастическое свойство источника вреда, проявляющееся в причинении ущерба).

**РИСК аварии** — мера опасности, характеризующая возможность возникновения аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий.

**БЕЗОПАСНОСТЬ** — **свойство системы** “Источник вреда – потенциальная Жертва” сохранять при функционировании такое состояние, при котором ожидаемый ущерб (РИСК) не превышает приемлемого по социально-экономическим соображениям (**свойство защищенности жертв**).



# 36. Основные этапы анализа риска

**1. ПЛАНИРОВАНИЕ И ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТ**  
(определение целей, задач, выбор методологии, методов, критериев приемлемого риска)

**2. ИДЕНТИФИКАЦИЯ ОПАСНОСТЕЙ**  
Выявление источников опасностей, распределение опасных веществ, предварительная оценка опасностей

**3. ОЦЕНКА РИСКА**  
Анализ частоты, последствий, неопределенностей, обобщение результатов оценки риска

**4. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ  
ПО УМЕНЬШЕНИЮ РИСКА**



# Обобщенная структура ущерба от аварий (РД 03-496-02)

## Ущерб от аварии, $Y$



людские потери,  $N$

материальные потери,  $G$



# Риск аварии (теория вероятностей)

## 1. АВАРИЯ на ОПО - случайное событие

(Под «событием» в теории вероятностей понимается всякий факт, который может произойти или не произойти)

## 2. УЩЕРБ от аварии - случайная величина (СВ) $Y$

(СВ называется величина, которая может принять то или иное значение, причем неизвестно заранее, какое именно)

## 3. РИСК аварии - мера опасности

- вероятностная характеристика СВ ущерба от аварии  $Y$

### Законы распределения СВ

для дискретной

**$N$  (людские потери):**

ряд и функция распределения

для непрерывной

**$G$  (материальные потери):**

функция и плотность распределения

### Числовые характеристики СВ

Положения:

матожидание, мода, медиана

Разброса:

дисперсия, СКО



# 1. Оценка Риска аварии - определение ЗАКОНА распределения случайной величины ущерба $Y$ от аварии

Случайная величина	форма ЗАКОНА распределения СВ ущерба от аварии $Y$	Формальное описание	Традиционное название в риск-анализе	Пример
Дискретная СВ <b>Людские потери</b> при аварии <b>N</b>	Ряд распределения <b>N</b> (графически – многоугольник распределения)	$\frac{n_i}{p_i} \left  \begin{array}{c} 0 \\ 1 - \sum_{i=1}^k p_i \end{array} \right  \frac{n_1}{p_1} \frac{n_2}{p_2} \left  \begin{array}{c} \boxtimes \\ \boxtimes \end{array} \right  \frac{n_s}{p_s} \left  \begin{array}{c} \boxtimes \\ \boxtimes \end{array} \right  \frac{n_k}{p_k}$	Полное <b>описание сценариев</b> аварии с гибелью людей	
	Функция распределения людских потерь <b>N</b>	$\bar{F}(n) = P(N \geq n)$	<b>Социальный риск</b> <b>F/N-кривая</b>	
Непрерывная СВ <b>Материальные потери</b> при аварии <b>G</b>	Функция распределения материальных потерь <b>G</b>	$\bar{F}(g) = P(G \geq g)$	<b>Риск материальных потерь</b> <b>F/G-кривая</b>	
	Плотность вероятности <b>G</b> (графически – кривая распределения)	$f(g) = F'(g) = -\bar{F}'(g)$	Полное <b>описание сценариев</b> аварии с материальными потерями	



## 2. Оценка Риска аварии - определение ЧИСЛОВЫХ характеристик случайной величины ущерба $Y$ от аварии

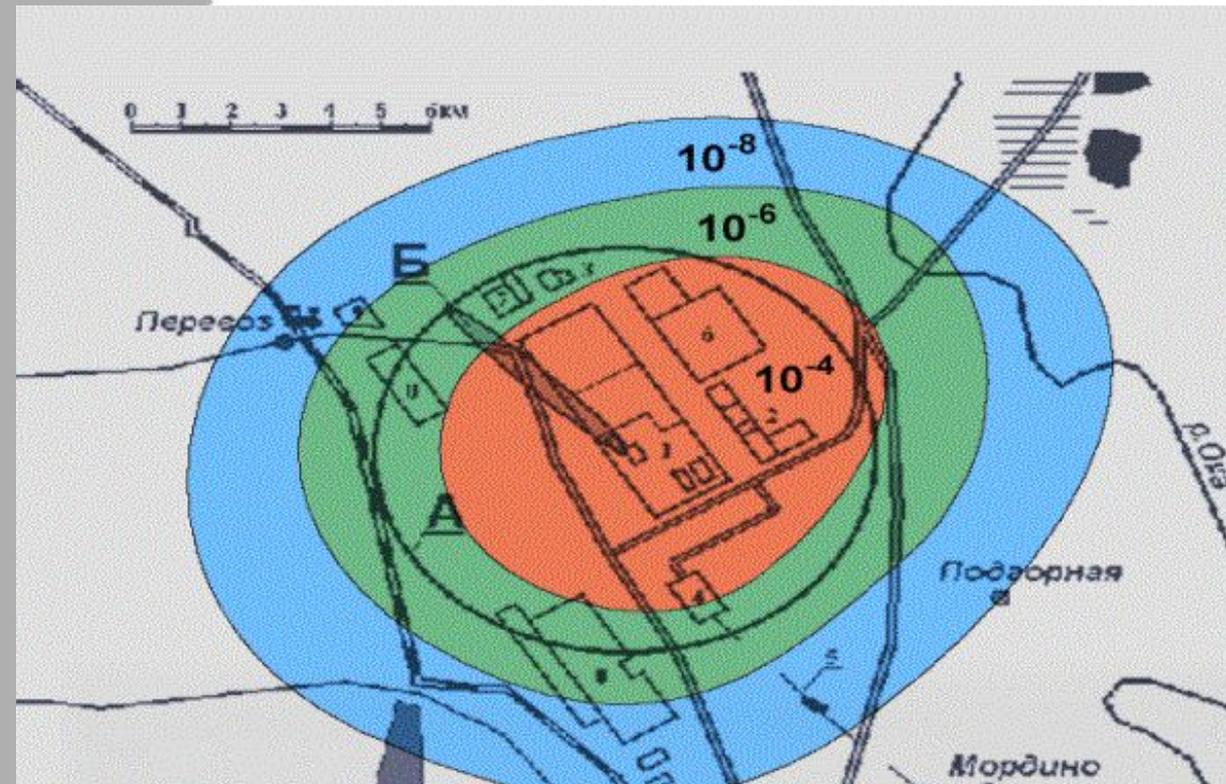
Случайная величина	Числовая характеристика СВ ущерба от аварии $Y$	Формальное описание	Традиционное название в риск-анализе
Дискретная СВ <b>Людские потери</b> при аварии $N$	<b>Математическое ожидание <math>N</math></b>	$R_{\text{ггг}} = M[N] = \sum_{i=1}^k n_i p_i$	<b>Коллективный риск</b> $R_{\text{кол}}$
Дискретные СВ <b>Людские потери</b> при аварии и число рискующих, $N$ и $U$	<b>Математическое ожидание частного <math>N</math> и <math>U</math></b>	$R_{\text{гга}} = M\left[\frac{N}{U}\right] = M[N] \cdot M\left[\frac{1}{U}\right] + K_{n/u}$	<b>Индивидуальный риск</b> $R_{\text{инд}}$
Непрерывная СВ <b>Материальные потери</b> при аварии $G$	<b>Математическое ожидание <math>G</math></b>	$R_{\text{г}} = M[G] = \int_0^{\infty} g f(g) dg$	<b>Ожидаемый ущерб</b>
	<b>Мода <math>G</math></b>	Значение $G=g$ , при котором $f(g) \rightarrow \max$	<b>Наиболее вероятный ущерб</b>
Смешанная СВ <b>Людские и материальные</b> потери при аварии $N, G$	Сумма <b>математических ожиданий <math>N</math> и <math>G</math></b>	$R_{\Sigma} = H \cdot \sum_i n_i p_i + \int g F'(g) dg$ где $H$ – стоимостная оценка человеческой жизни.	<b>Полный ожидаемый вред/ущерб от аварии <math>R_{\Sigma}</math></b>



# Вероятностные Показатели риска аварии (РД 03-418-01)

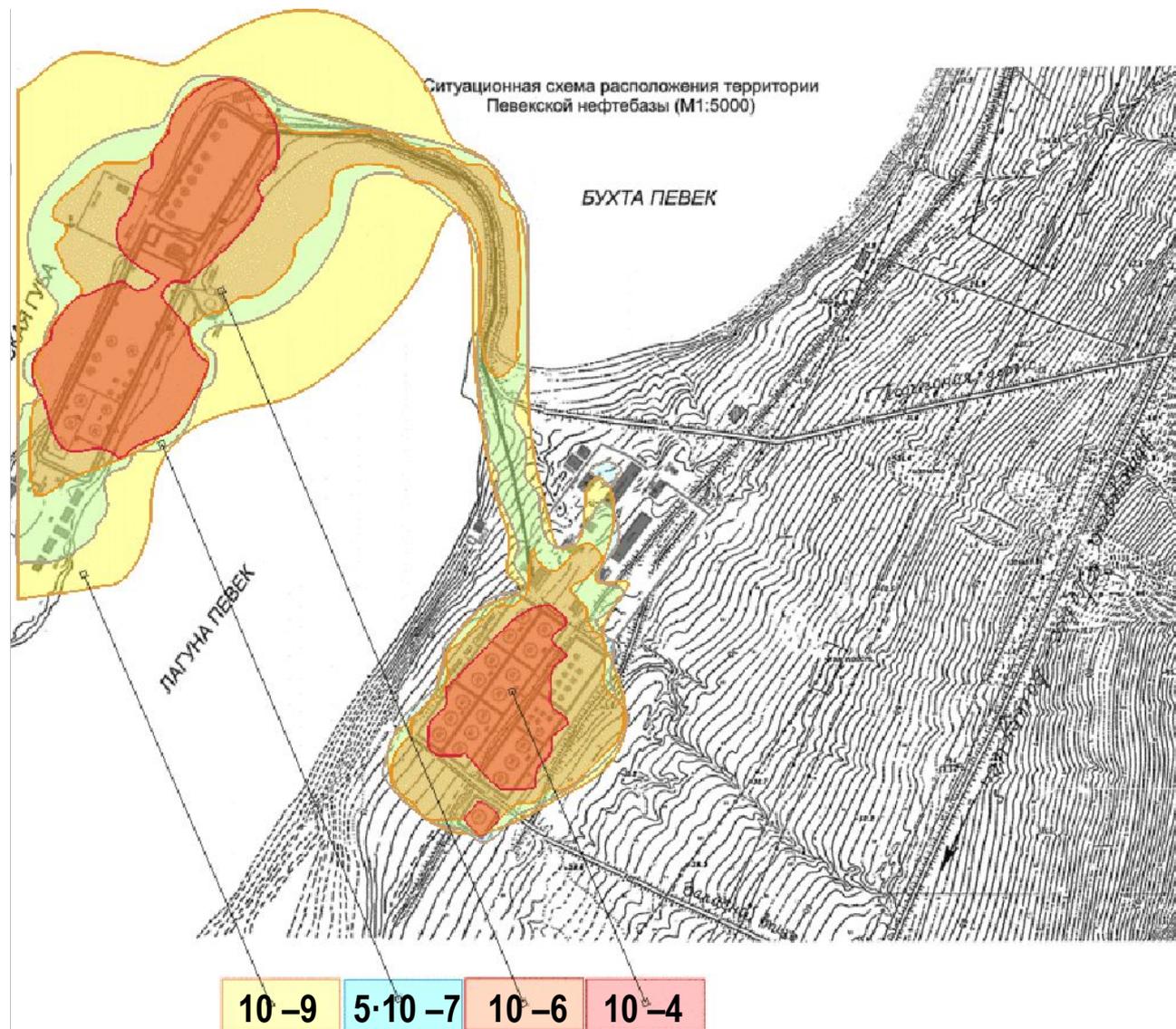
*Потенциальный  
территориальный  
риск (РД 03-418-01) —*

**частота реализации  
смертельно  
поражающих  
факторов аварии в  
определенной зоне  
пространства.**



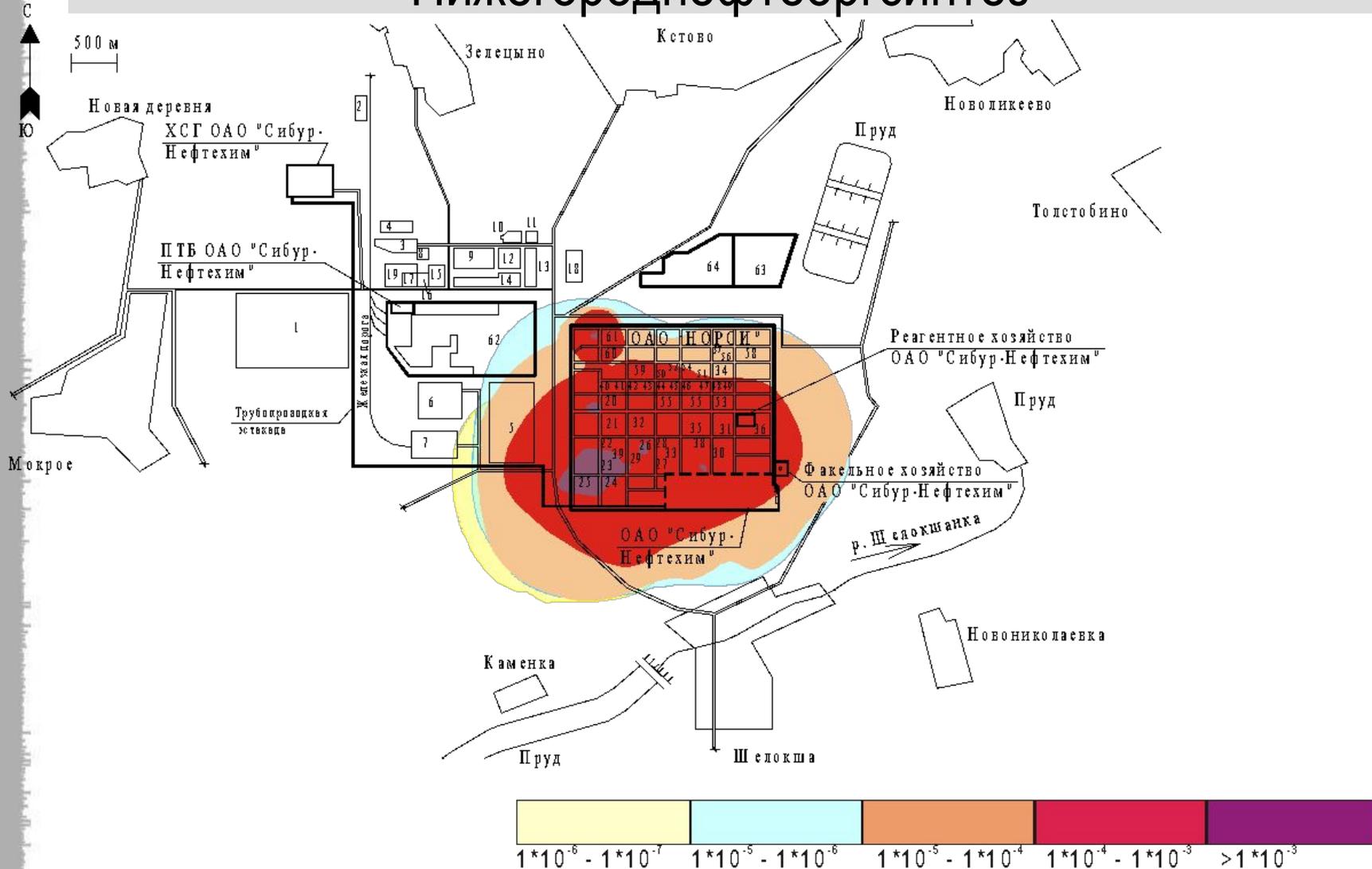


# зоны риска смертельного поражения человека при аварии на площадке Певекской нефтебазы ОГУП "Чукотснаб" (1/год)





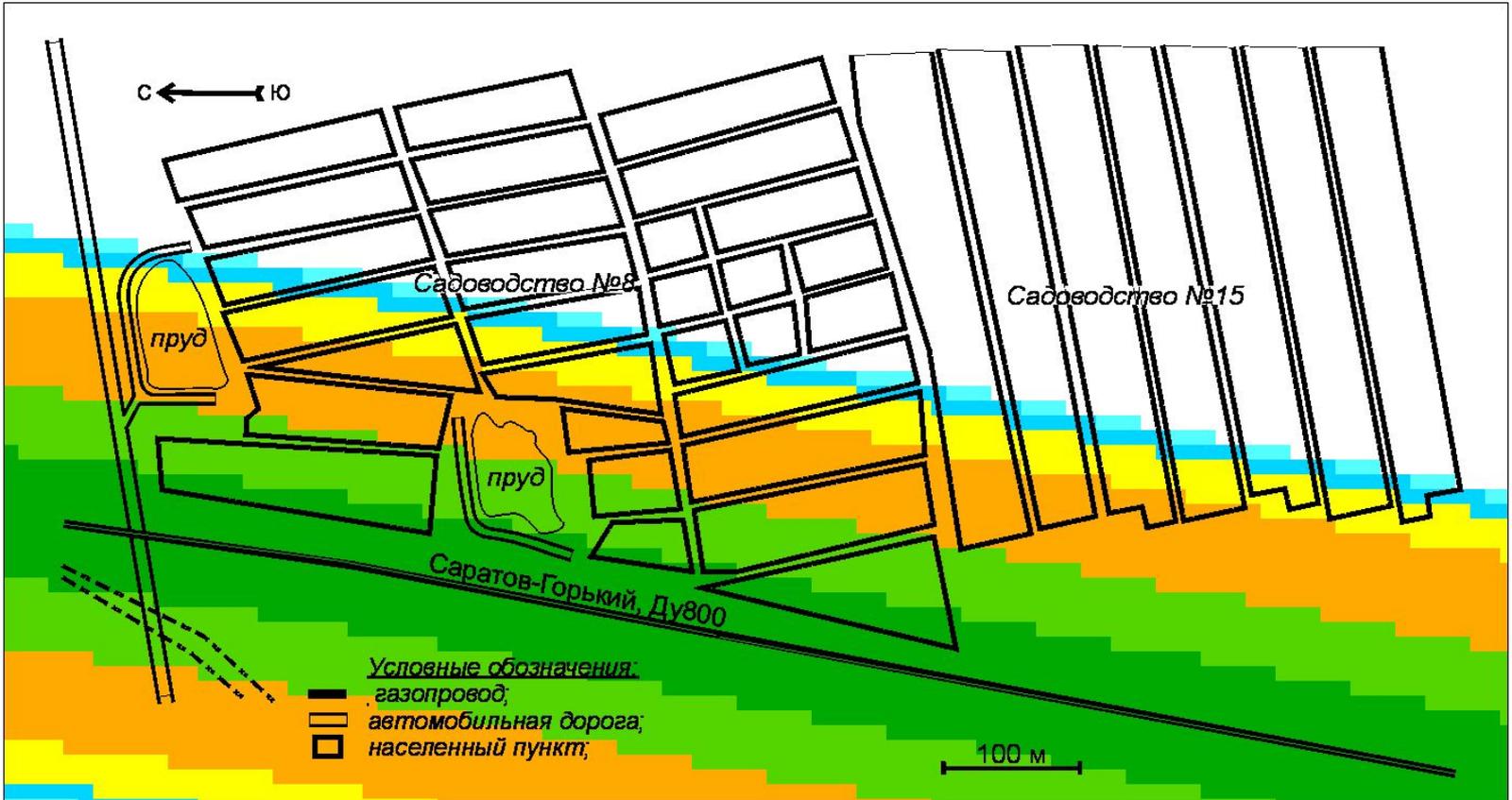
# зоны риска смертельного поражения человека при аварии на ОАО "ЛУКОЙЛ-Нижегороднефтеоргсинтез"



Риск смертельного поражения человека, год<sup>-1</sup>



# зоны риска смертельного поражения человека при аварии на 475-ом км газопровода «Саратов-Горький»



$3 \cdot 10^{-3}$   $10 \cdot 3 \cdot 10^{-4}$   $3 \cdot 1 \cdot 10^{-4}$   $10 \cdot 3 \cdot 10^{-5}$   $3 \cdot 1 \cdot 10^{-5}$   $10 \cdot 3 \cdot 10^{-6}$   $3 \cdot 1 \cdot 10^{-6}$   $10 \cdot 3 \cdot 10^{-7}$   $3 \cdot 1 \cdot 10^{-7}$   $10 \cdot 3 \cdot 10^{-8}$ , 1/год



# Вероятностные Показатели риска аварии (РД 03-418-01)

**Коллективный риск** — ожидаемое количество пораженных в результате возможных аварий за определенное время

(матожидание **людских потерь  $N$**  от аварии)

Т.к. случайная величина  **$N$**  может принять каждое из значений  $n_1, n_2, \dots, n_k$  с некоторой вероятностью  $p_1, p_2, \dots, p_k$ , то:

$$R_{\text{кол}} = M[N] = \sum_{i=1}^k n_i p_i$$



# Вероятностные Показатели риска аварии (РД 03-418-01)

среднегрупповой **Индивидуальный риск** — частота поражения отдельного человека в результате воздействия исследуемых факторов опасности аварий

$$R_{\text{инд}} = M \left[ \frac{N}{U \equiv \text{const}} \right] = \frac{1}{u} M[N] = \frac{R_{\text{кол}}}{u}$$

где:

$U$  - случайное число рискующих,  
 $u$  - общее число рискующих.



# Вероятностные Показатели риска аварии (РД 03-418-01)

**Социальный риск** — распределение числа погибших по частоте:

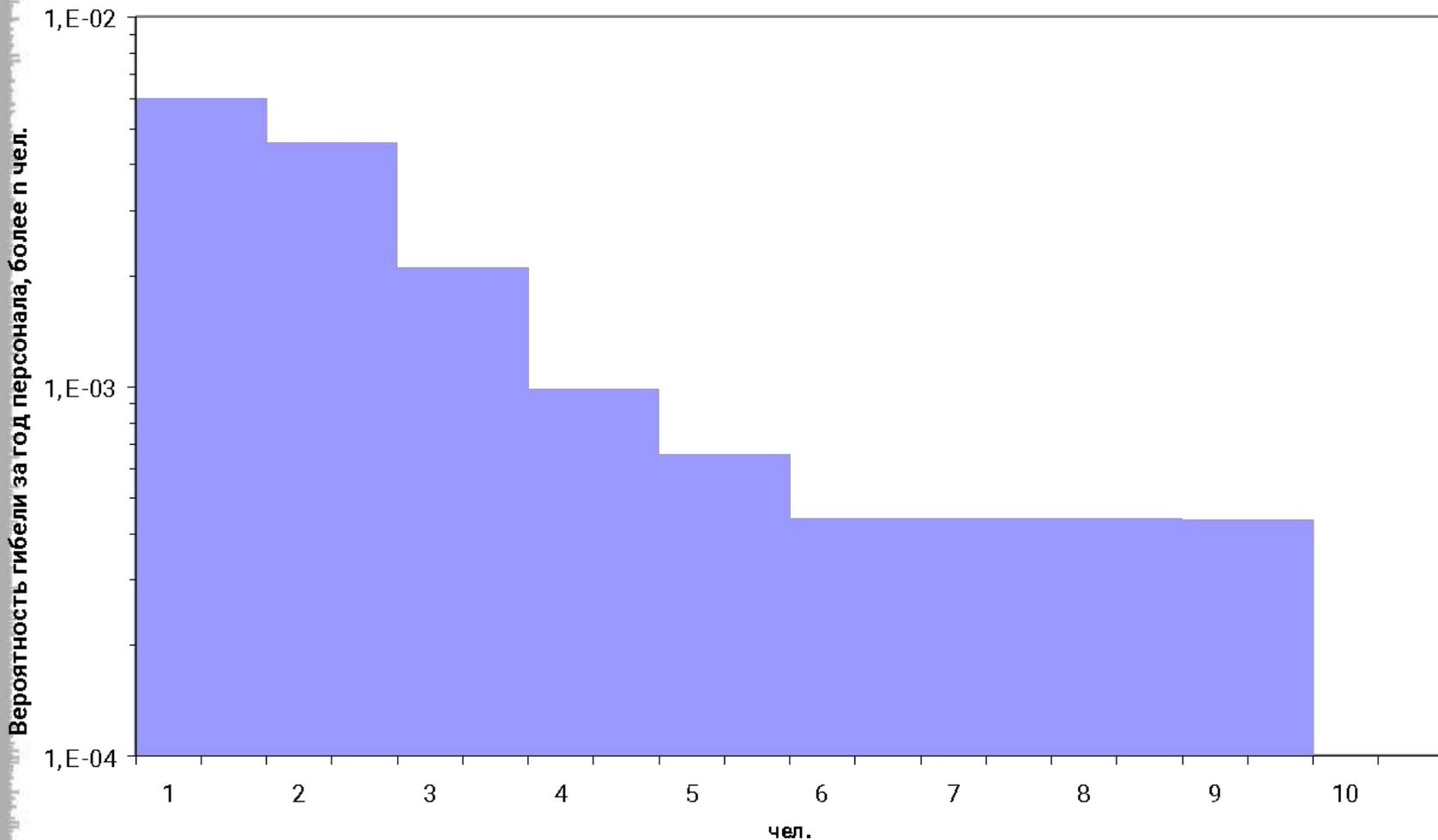
*интегральная функция  
распределения числа  
погибших  $F(n)$  ( $F/N$ -кривая)  
— равна вероятности  $P$   
того, что случайная  
величина числа погибших  $N$   
примет значение больше  $n$ :*

$$\bar{F}(n) = P(N \geq n)$$

$$\bar{F}(y) = \begin{cases} 1, & y = 0 \\ \sum_{i=1}^k p_i = 1 - p_0, & 0 < y \leq y_1 \\ \boxtimes & \boxtimes \\ \sum_{i=s}^k p_i, & y_{s-1} < y \leq y_s \\ \boxtimes & \boxtimes \\ p_k, & y_{k-1} < y \leq y_k \\ 0, & y_k < y < \infty \end{cases}$$

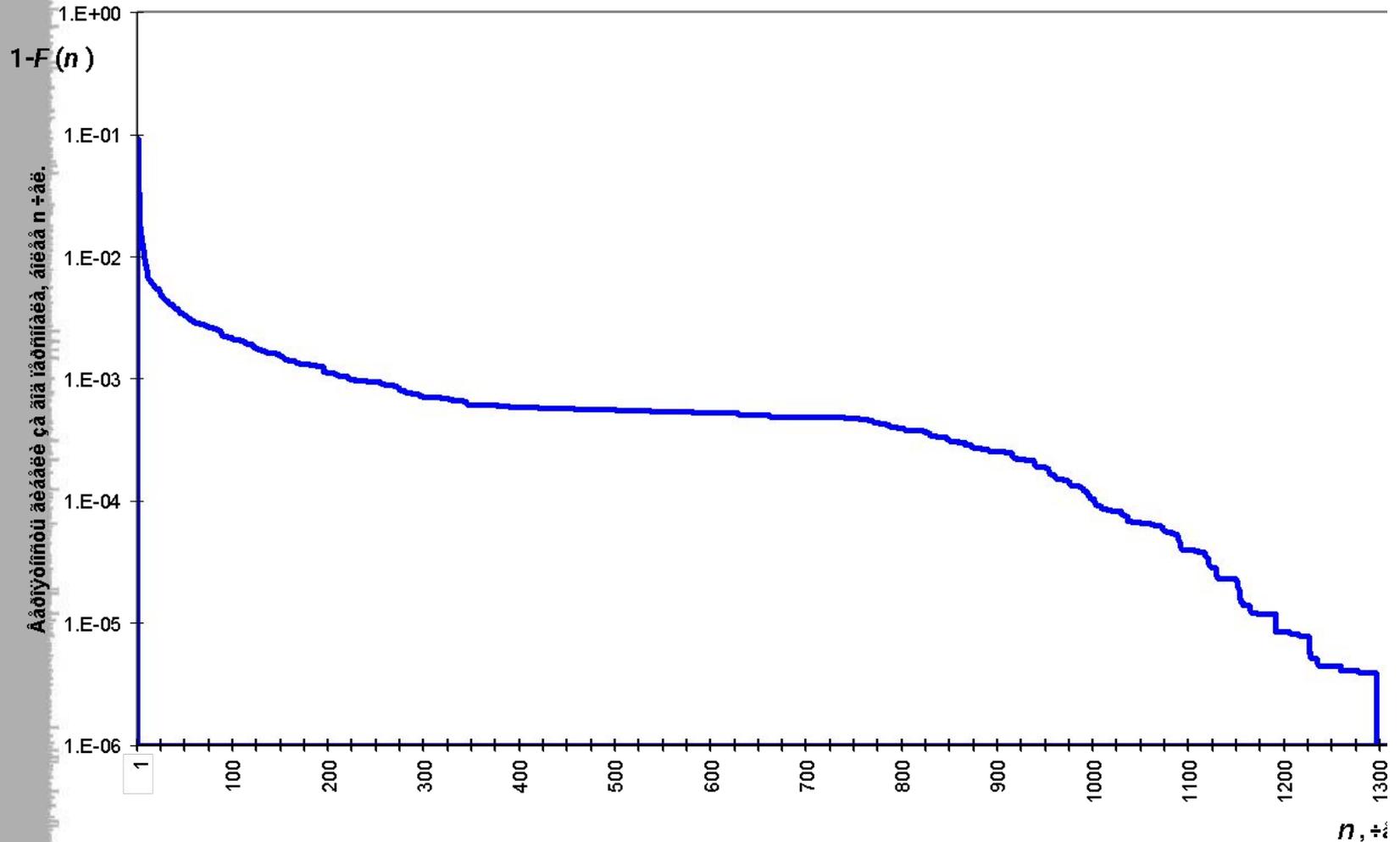


# Кривая социального риска - интегральная функция распределения $F(n)$ гибели персонала при авариях на Певекской нефтебазе





# Кривая социального риска - интегральная функция распределения $F(n)$ гибели персонала при авариях на АО «НОРСИ»





# Вероятностные Показатели риска аварии (РД 03-418-01)

**Ожидаемый ущерб** — математическое ожидание величины ущерба **G** от возможной аварии за определенное время

$$R_{\$} = M[G] = \int_0^{\infty} g f(g) dg$$

$f(g) = F'(g) = -\overline{F}'(g)$  — плотность вероятности материальных потерь

$R_{\Sigma} = H \cdot \sum_i n_i p_i + \int g F'(g) dg$ , где  $H$  — стоимостная оценка человеческой жизни



# Методы анализа опасности и оценки риска

## *Методы качественного анализа опасности*

1. **Методы проверочного листа (Check-List) и “Что будет, если...?” (What - If)** или их комбинация основанны на изучении *соответствия условий эксплуатации объекта или проекта действующим требованиям безопасности.*
2. **Анализ вида и последствий отказов (АВПО, Failure Mode and Effects Analysis - FMEA)** - анализ каждого аппарата (установки, блока) или его составной части на предмет возможной неисправности и последующего воздействия отказа на техническую систему.
3. **Анализ опасности и работоспособности (АОР, Hazard and Operability Study - HAZOP)** исследуется влияния отклонений технологических параметров (температуры, давления и др.) от регламентных значений с точки зрения надежности.



# Методы анализа опасности и оценки риска

## Методы количественной оценки риска

**РИСК** – мера опасности, в самом простом случае - математическое ожидание ущерба  $Y$  при функционировании ОПО

$$R = M[Y] = \sum_{i=1}^n P(B_i) \cdot y_i$$

$P(B_i)$  – вероятность причинения ущерба  $y_i$

$$R = R_{\text{Авар}} + R_{\text{Штат}} = \sum_{i=1}^{n-1} P(B_i) \cdot y_i + [P(B_i) \approx 1] \cdot \sum_{j=1}^k \bar{y}_{nj}$$

$$B_i = A \cap C_i$$

причины

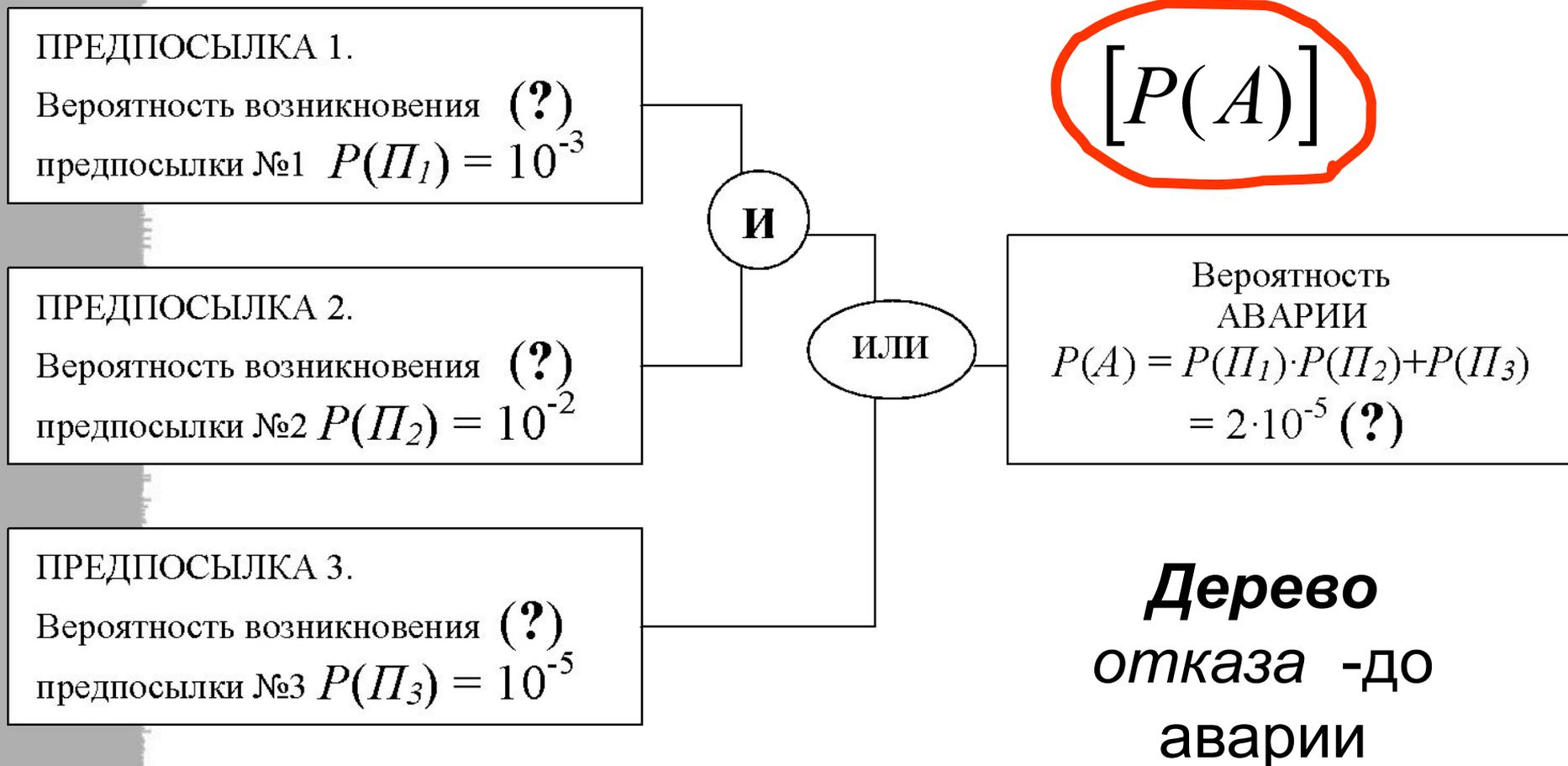
последствия

$$R_{\text{Авар}} = \sum_{i=1}^k P(A) \cdot P(C_i|A) \cdot y_i = [P(A)] \cdot \left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) \cdot y_i \right]$$



# Методы анализа опасности и оценки риска: ПРИЧИНЫ

*графо-аналитические модели*





# Методы анализа опасности и оценки риска: ПОСЛЕДСТВИЯ

*графо-аналитические модели*

$$\left[ \sum_{i=1}^k P(C_i|A) \cdot y_i \right]$$

АВАРИЯ  
произошла  
 $\Sigma P(C_i|A) = 1,0$

СЦЕНАРИЙ 1.

Условная вероятность сценария  $P(C_1|A) = 0,5$   
Ущерб  $y_1 = 100$  ед.

СЦЕНАРИЙ 2.

Условная вероятность сценария  $P(C_2|A) = 0,3$   
Ущерб  $y_2 = 500$  ед.

СЦЕНАРИЙ 3.

Условная вероятность сценария  $P(C_3|A) = 0,2$   
Ущерб  $y_3 = 1000$  ед.

**Дерево  
событий -  
после аварии**



# Методы анализа опасности и оценки риска

## *Методы количественной оценки риска*

### оценка вероятности аварии

- **Статистические** данные по аварийности и надежности
  - «**Дерево отказа**» (Fault Tree)
  - «**Дерево событий**» (Event Tree)
  - **Имитационное** моделирование

### оценка последствий аварии

- «**Дерево событий**»
- **Моделирование** развития аварийных процессов совместно с критериями поражения
- **Модели** поражения («доза-эффект»)



# 3г. Анализ «дерева отказа» Fault Tree Analysis - FTA

**Минимальные пропускные сочетания:**

{12}, {13}, {1·7}, {1·8}, {1·9}, {1·10}, {1·11},  
{2·7}, {2·8}, {2·9}, {2·10}, {2·11}, {3·7}, {3·8},  
{3·9}, {3·10}, {3·11}, {4·7}, {4·8}, {4·9},  
{4·10}, {4·11}, {5·6·7}, {5·6·8}, {5·6·9},  
{5·6·10}, {5·6·11}.

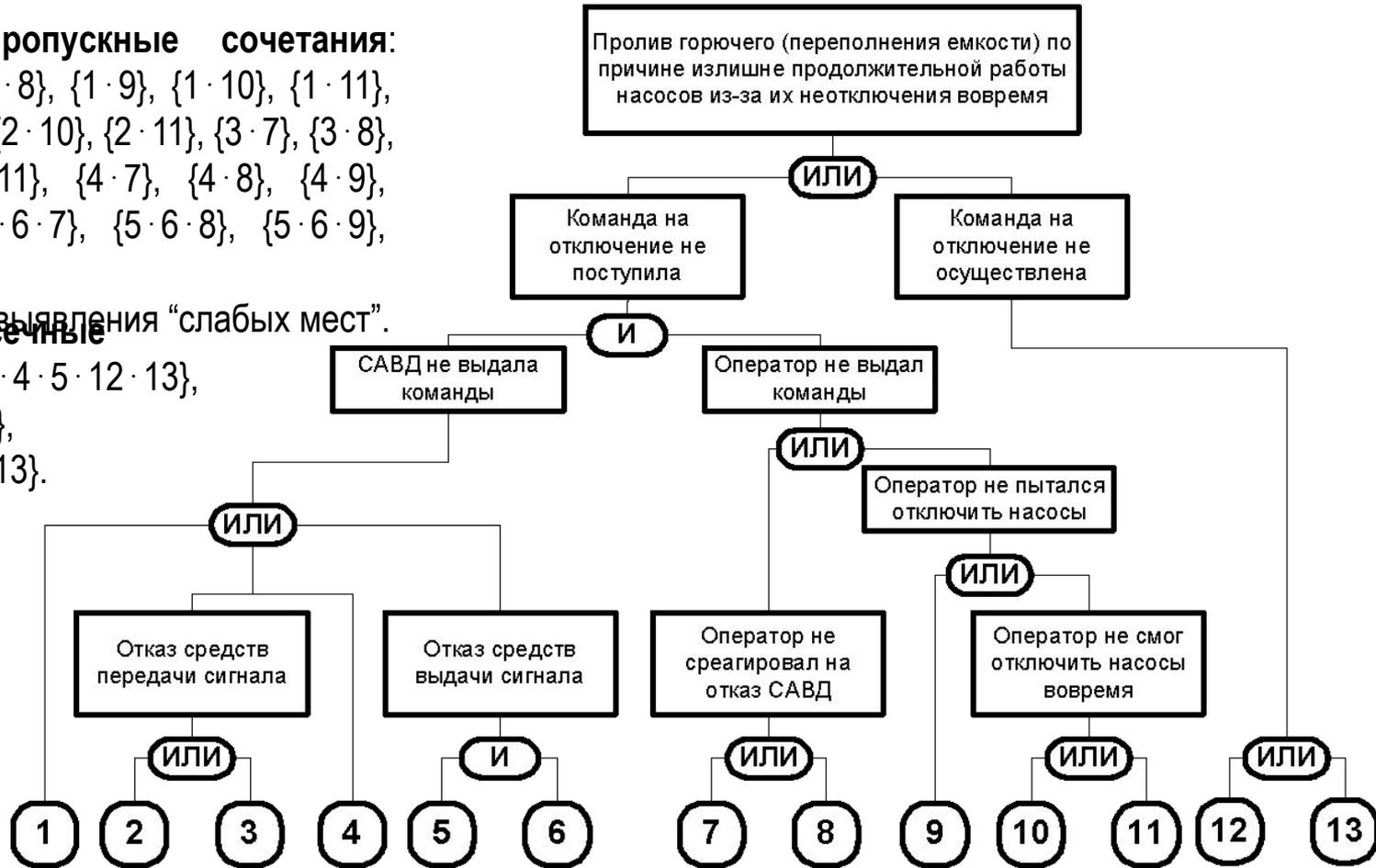
Используются для выявления “слабых мест”.

**Минимальные отсечные сочетания:** {1·2·3·4·5·12·13},

{1·2·3·4·6·12·13},

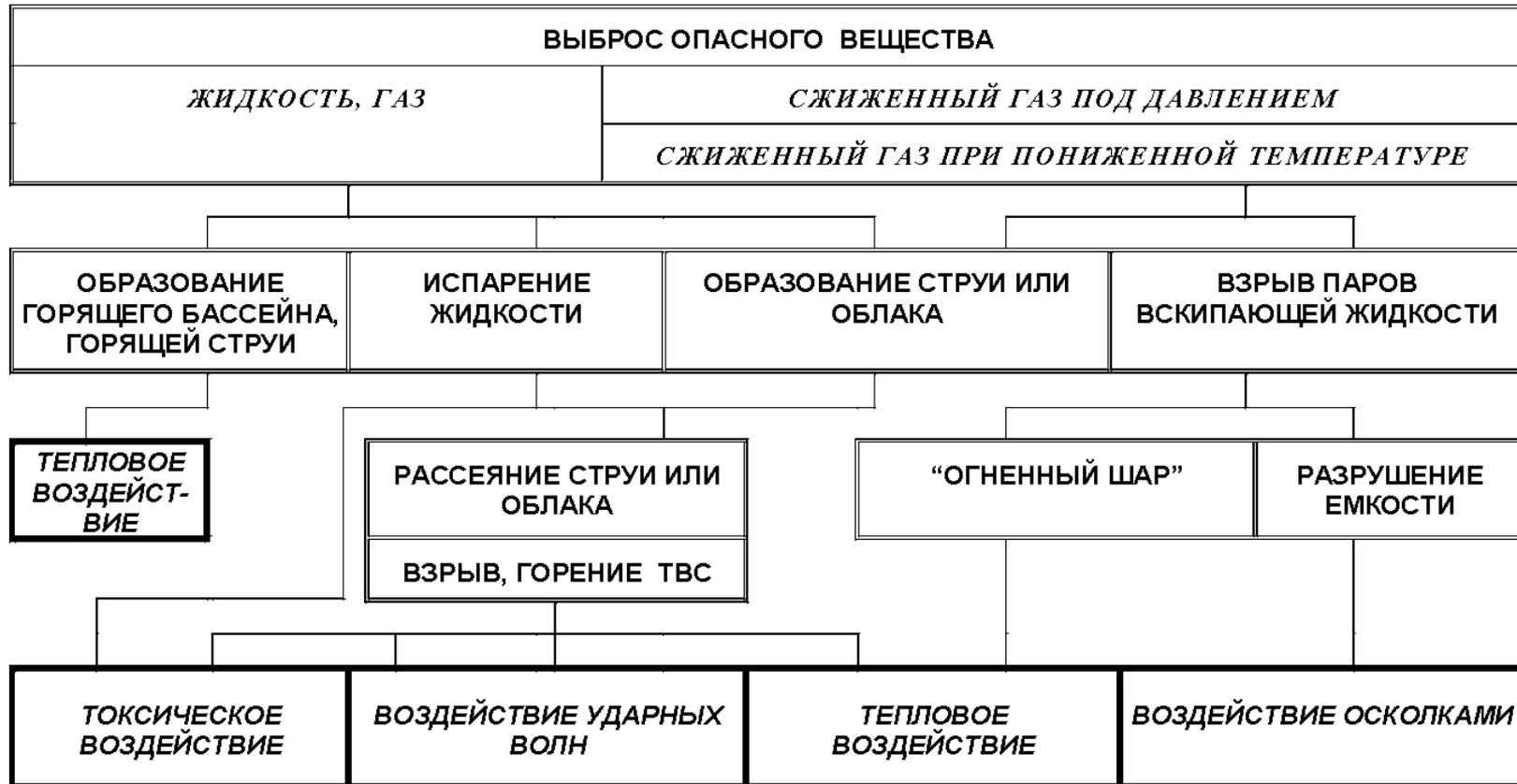
{7·8·9·10·11·12·13}.

Используются для определения наиболее эффективных мер предупреждения аварии.



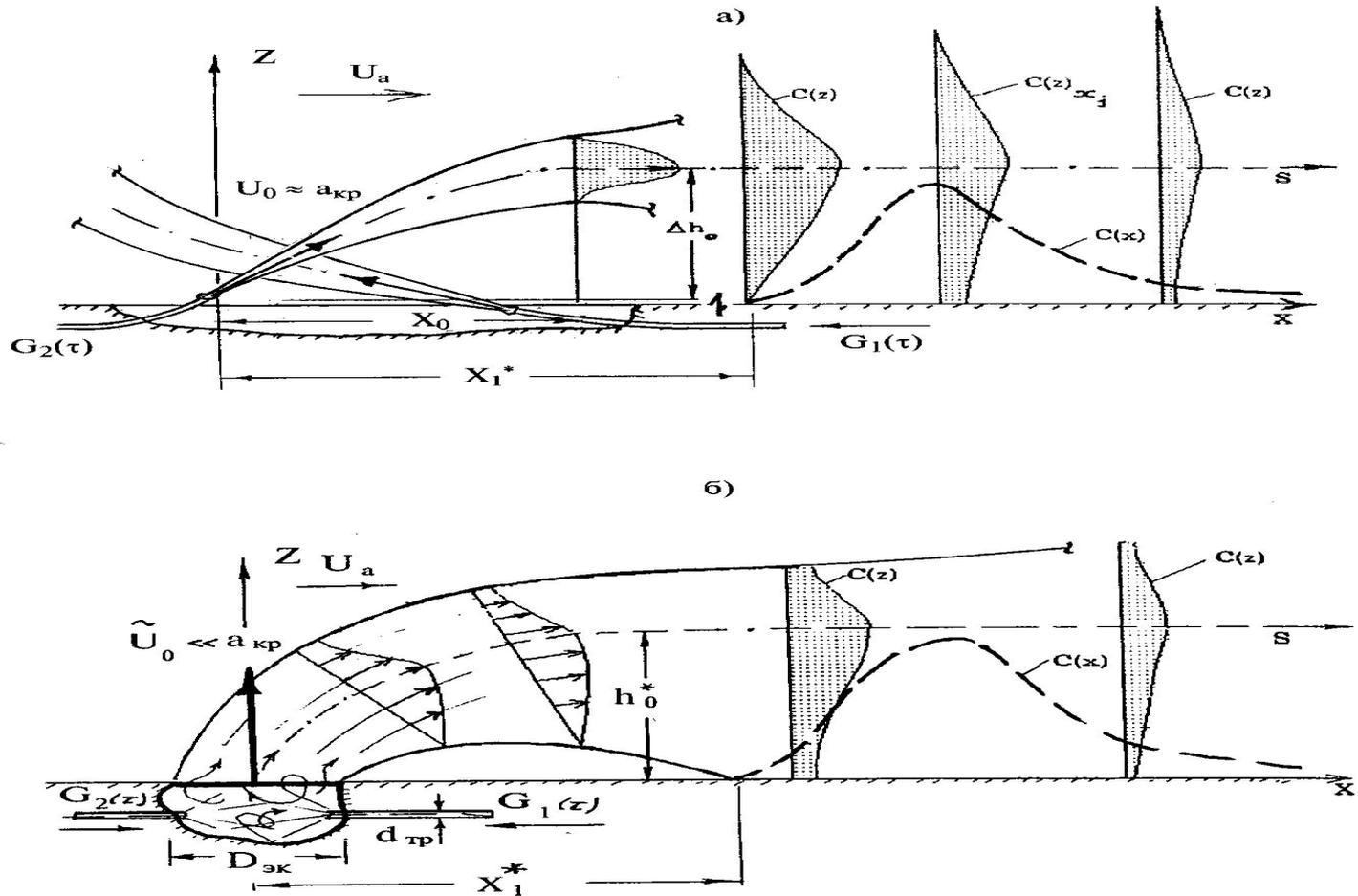


# 3г. Схема развития аварийных ситуаций с проявлением поражающих факторов





# 3г. Варианты выброса газа при разрушении магистрального газопровода



- а) в виде 2-х независимых струй из концов разрушенного трубопровода;  
б) в виде интегрального шлейфа из образовавшегося «котлована».

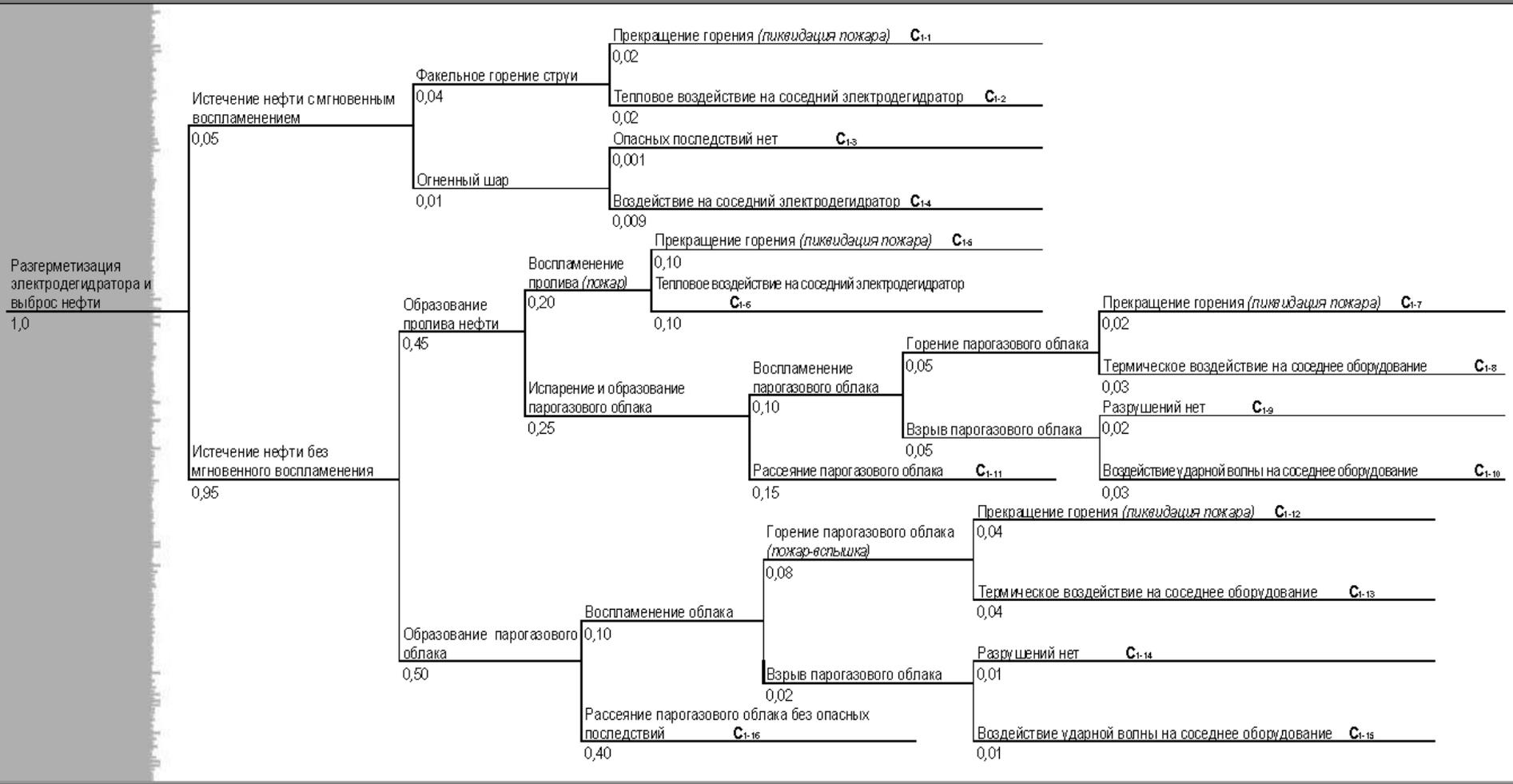


# 3г. Анализ «дерева событий»

Event Tree Analysis – FTA

Установка АТ-6

(разрушение электродегидратора, 26.6 т нефти,  $T=55\div 85$  С,  $P=0,6$  МПа)





# 3г. Горение и взрыв: сгорание облака-блина

Концентрация продуктов сгорания: 80-800 мс



# 4. Нормативно-методическое обеспечение анализа риска

## Основные элементы





# Нормативно-методические документы (1)

- **РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов** (утв. Госгортехнадзором России 10.07.2001 №30);
- **РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах** (утв. Госгортехнадзором России 29.10.2002 №63);
- **ПБ 03-182-98 (Приложение 1). Методика расчета концентраций аммиака в воздухе и распространения газового облака при авариях на складах жидкого аммиака** (утв. Госгортехнадзором России 26.12.1997 №55);
  - **Методика оценки последствий химических аварий (Методика «Токси». Редакция 2.2)** (согл. Госгортехнадзором России 03.07.1998 №10-03/342)



# Нормативно-методические документы (2)

- **РД 03-409-01. Методика оценки последствий аварийных взрывов топливно-воздушных смесей**  
(утв. Госгортехнадзором России 26.06.01 №25)  
*[поражение ударными волнами];*
- **Manual of Industrial Hazard Assessment Techniques**  
(Методика Всемирного банка)  
*[модель рассеяния тяжелого газа];*
- **ГОСТ 12.3.047-98 ССБТ. Пожарная безопасность техно-логических процессов. Общие требования. Методы контроля**  
*[пожар пролива, «огненный шар»];*
- **ПБ 09-170-97 (Приложение 2). Методика расчета участвующей во взрыве массы вещества и радиусов зон разрушений**  
(утв. Госгортехнадзором России 22.12.97 №52)
- .....



# Некоторые ВЫВОДЫ

(количественная оценка риска)

**1.** Промышленная авария - случайное событие.

Поэтому для оценки риска аварии наиболее пригодны **вероятностно-возможностные** показатели.

**2.** Основная исследуемая СВ при оценке риска - размер ущерба  $Y$  (вреда, потерь) от аварии.

Ввиду редкости аварий использование СВ  $T$  – времени наступления аварии – нецелесообразно.

**3.** При **количественной оценке** риска аварии:

а) задача **максимум:**

определить **закон распределения**  $Y$  (ряд, функция распределения  $F/Y$ -кривая, функция плотности вероятности),

б) задача **минимум:**

оценить основные **числовые характеристики** СВ  $Y$  (матожидание, мода,  $y_{max}$  и дисперсия, СКО...).

**4.** Использование более полного набора количественных показателей позволяет более обоснованно оценить риск аварии и предложить соответствующие **меры обеспечения безопасности**, оптимизировать их.



# «риск-теория». некоторые **ВЫВОДЫ**

- 1. ОСНОВНАЯ ЦЕЛЬ** анализа техно-опасностей **выявление «слабых» мест** для последующей оптимизации мер безопасности, ресурсно оправданное снижение риска аварийности и травматизма (так как это отражено в РД 03-418-01, ГОСТ Р 51901-2002, ISO 17776: 2000 и др.)  
**КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ** для этой задачи **НЕ НУЖНЫ**.
- 2. Для прикладных инженерных задач по снижению риска на конкретном ОПО точечные КРИТЕРИИ ПРИЕМЛЕМОСТИ опасности не пригодны** (из-за уникальности и редкости аварий).  
Реальные меры безопасности подменяются виртуальным и онаученным «управлением риском»

