

# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ ОБЛУЧЕНИЯ НА РАЗНЫХ УРОВНЯХ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Гераськин С.А.

*НИЦ «Курчатовский  
институт» - ВНИИРАЭ,  
Обнинск, Россия*

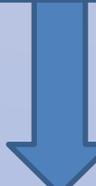


# ВВЕДЕНИЕ

Принципиальная сложность и иерархичность организации живых систем



Нелинейный ответ на слабые, не разрушающие систему воздействия



Ионизирующее излучение как инструмент исследования адаптивных реакций

# Ранний период исследований биологических эффектов ИИ

- 1895 – открытие рентгеновского излучения
- 1899 – показано повреждающее действие ИИ на микроорганизмы и растения
- 1927 – открыта способность ИИ индуцировать мутации
- 1935 – формулировка принципа попадания и теории мишени

# Постулаты, положенные в основу Линейной Беспороговой Концепции (ЛБК)

- Выход мутаций на единицу дозы одинаков для малых и больших доз (линейность)
- Квант энергии излучения, взаимодействуя с носителями наследственной информации, вызывает необратимые изменения (беспороговость)
- 1977 – формулировка ЛБК в 26 Публикации МКРЗ
- Справедливость ЛБК в отношении индукции первичных повреждений на молекулярном уровне

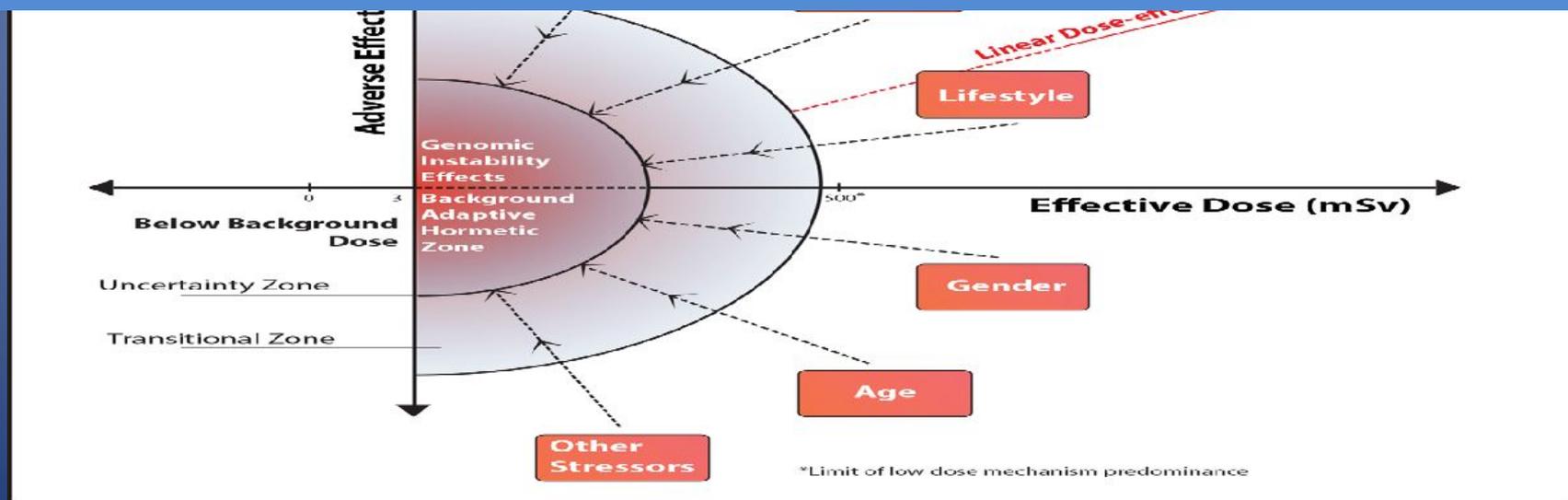
# Явления, не объяснимые с позиций ЛБК

- 1898 –стимулирующее действие ИИ на водоросли
  - 1932 –стимуляция развития растений в зонах повышенной естественной радиоактивности
  - 1950-1960 – аномальная реакция разных
- 6  
0  
1  
(
- Уже к середине прошлого века стало ясно, что при оценке биологического действия низких доз ИИ необходимо отойти от механически перенесенных из области больших доз представлений**
- 1960-1963 –энзиматическая репарация ДНК (Rupert; Setlow & Carrier). Обратимость индуцированных ИИ нарушений ДНК
  - 1960-е –генные мутации, влияющие на РЧ клеток. Описаны основные типы индуцированных ИИ нарушений ДНК и пути их репарации
  - 1970-е – роль ошибочной репарации в формировании генетических нарушений

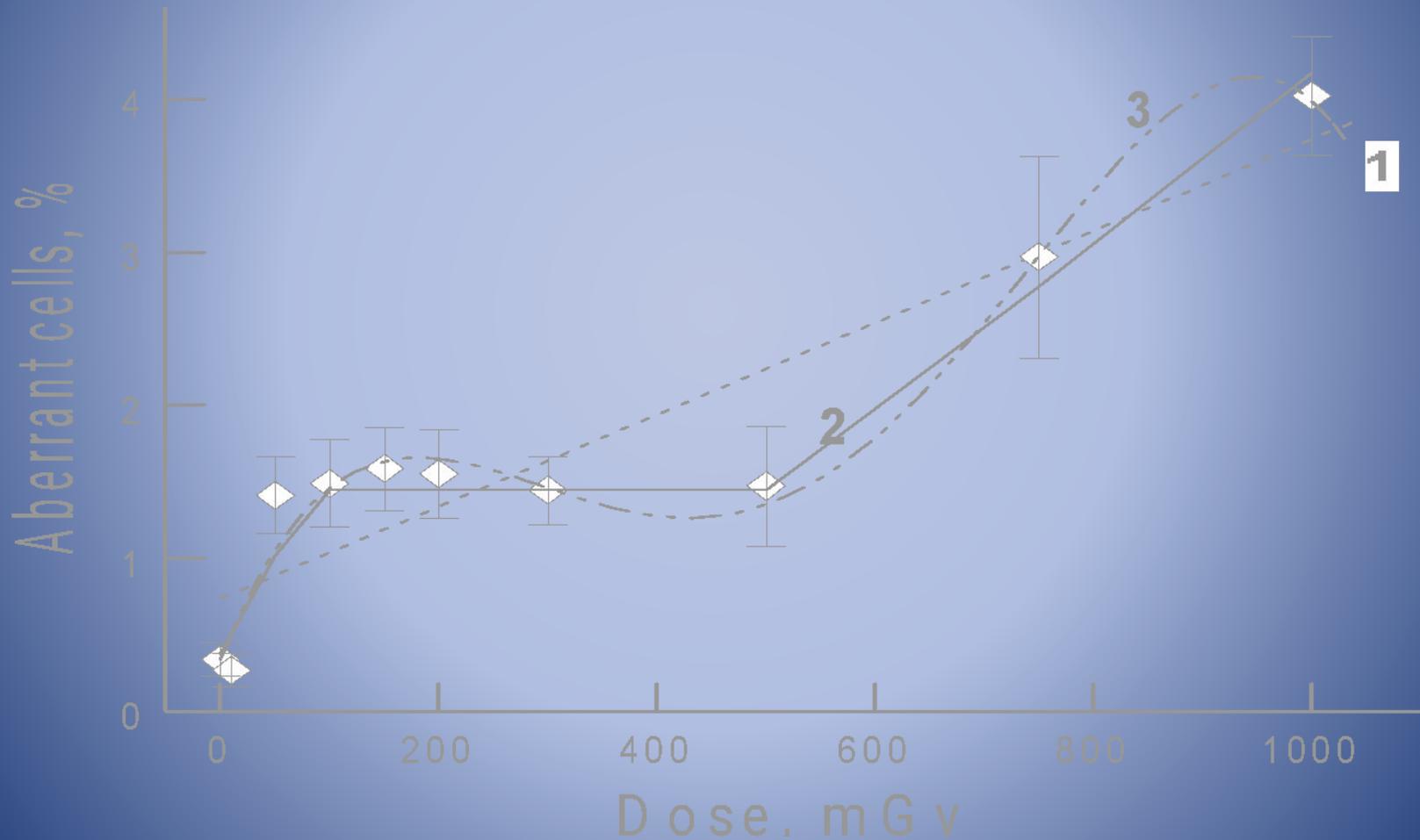
# Увеличение неопределенности ответной реакции на облучение с уменьшением дозы



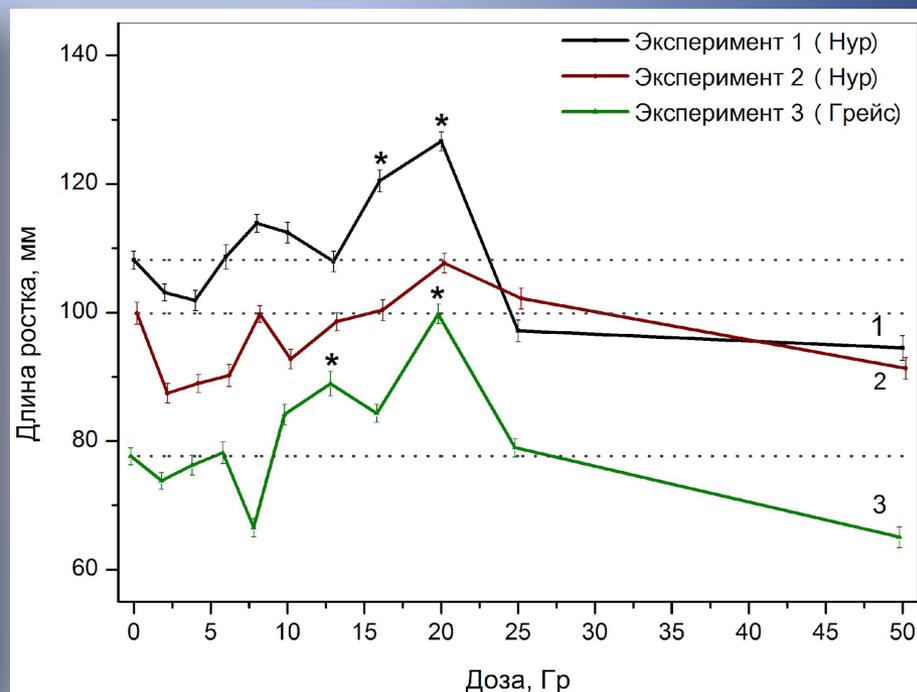
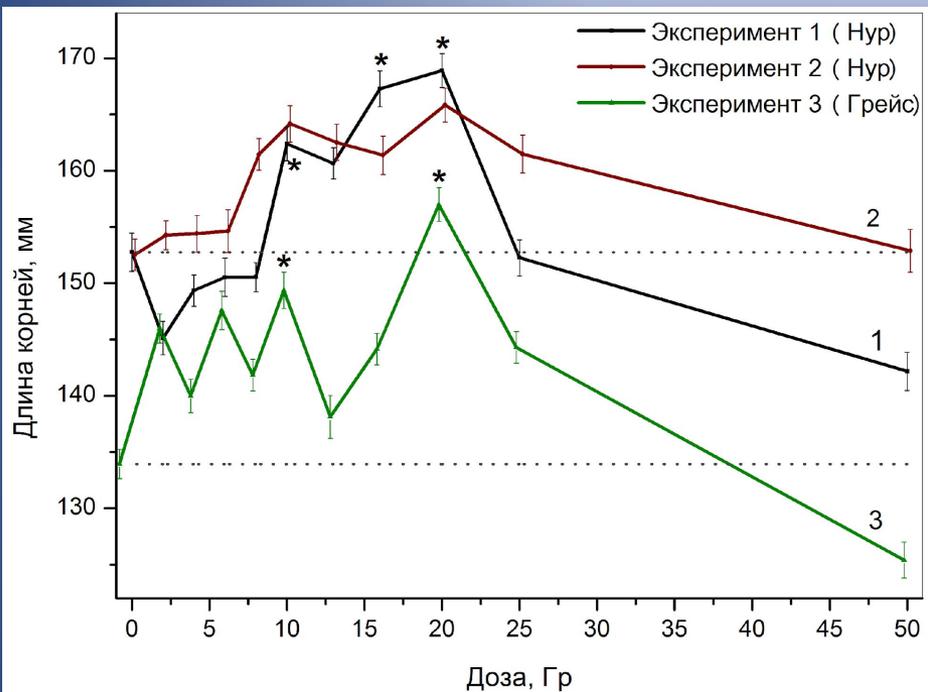
Наблюдаемые в области малых доз биологические эффекты обусловлены не столько повреждающим действием ИИ, сколько особенностями реализации ответной реакции клетки на слабые внешние воздействия



# Частота цитогенетических нарушений в корневой меристеме проростков ячменя нелинейно зависит от дозы



# Облучение семян ячменя дозами 10-20 Гр ведет к стимуляции развития проростков



# Механизмы формирования эффекта гормезиса у сельскохозяйственных растений

- *В диапазоне стимулирующих доз:*

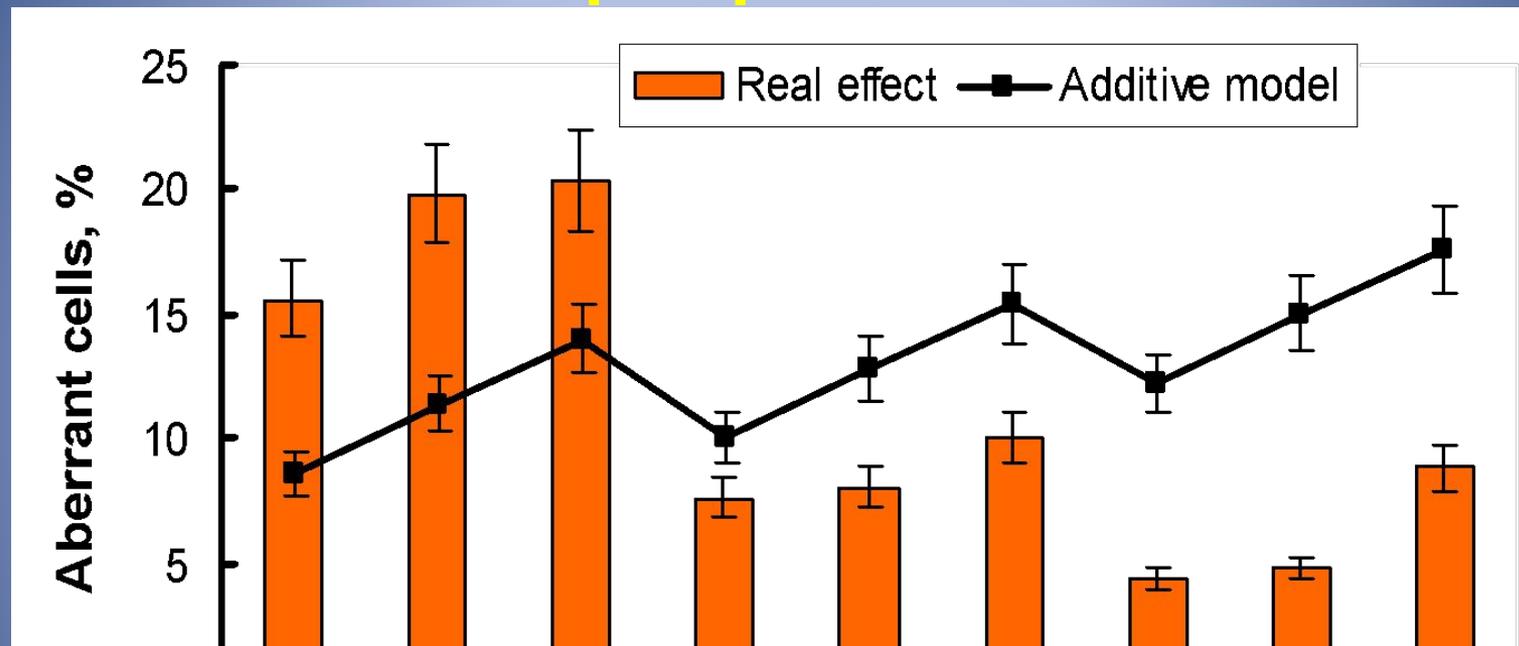
- увеличиваются концентрации активных форм кислорода;

**Облучение в стимулирующих дозах  
воздействует на регуляторные системы  
растений и может ускорять реализацию**

кодирующих метаболитов развития;

- происходит сдвиг фитогормонального баланса: увеличиваются концентрации ускоряющих рост гормонов и уменьшаются концентрации ингибиторов роста;
- происходит перераспределение запасных веществ между органами растений и перестройка метаболических процессов

# Нужно ли учитывать синергические и антагонистические эффекты при оценке техногенного воздействия на экосистемы и его нормировании?



В этих условиях нелинейные эффекты вносят существенный вклад в ответную реакцию растений

**Экосистемы**  
продуктивность ценоза, видовое разнообразие, трофическая структура, выпадение чувствительных видов

**Популяции**  
изменение половозрастной и генетической структуры популяций, репродуктивной способности, радиоадаптация

**Организмы**  
выживаемость, заболеваемость, морфологические аномалии, наследственные эффекты

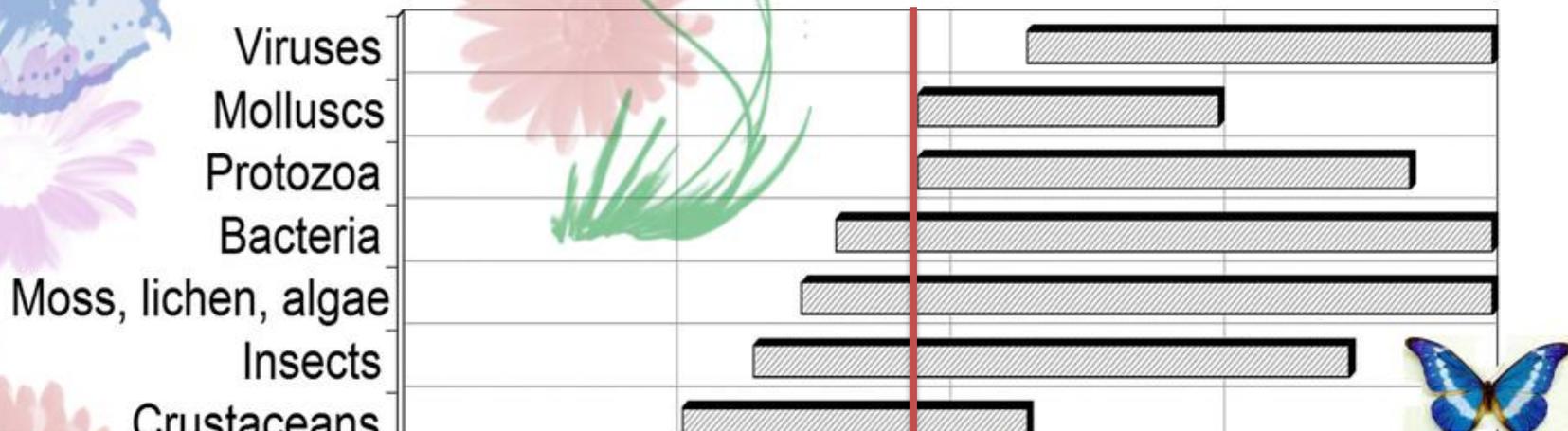


На высших уровнях биологической организации работают механизмы, не сводящиеся к физико-химическим процессам взаимодействия ионизирующего излучения с веществом

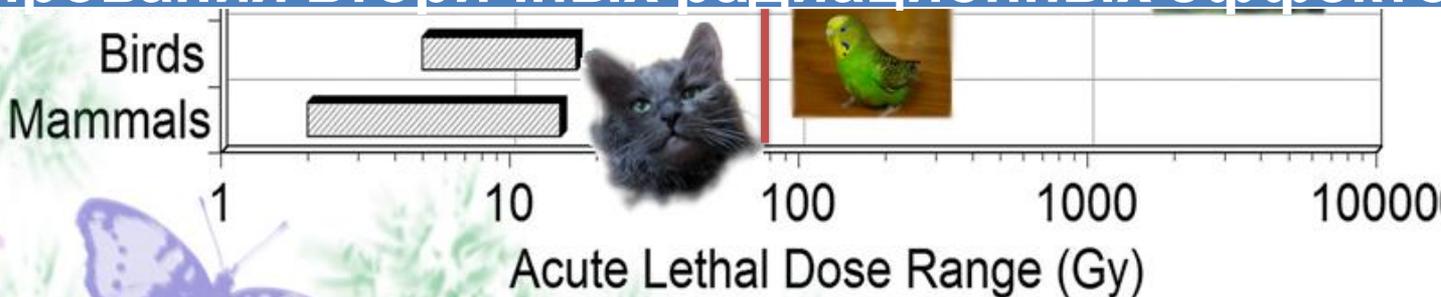
излучение

# Первичные радиационные эффекты в экосистемах зависят от радиочувствительности составляющих их видов

*Whicker, Schultz, 1982*



Различия в радиочувствительности составляющих экосистему организмов создают предпосылки для формирования вторичных радиационных эффектов



# Вторичные радиационные эффекты связаны с рассогласованием функциональных связей в биоценозе

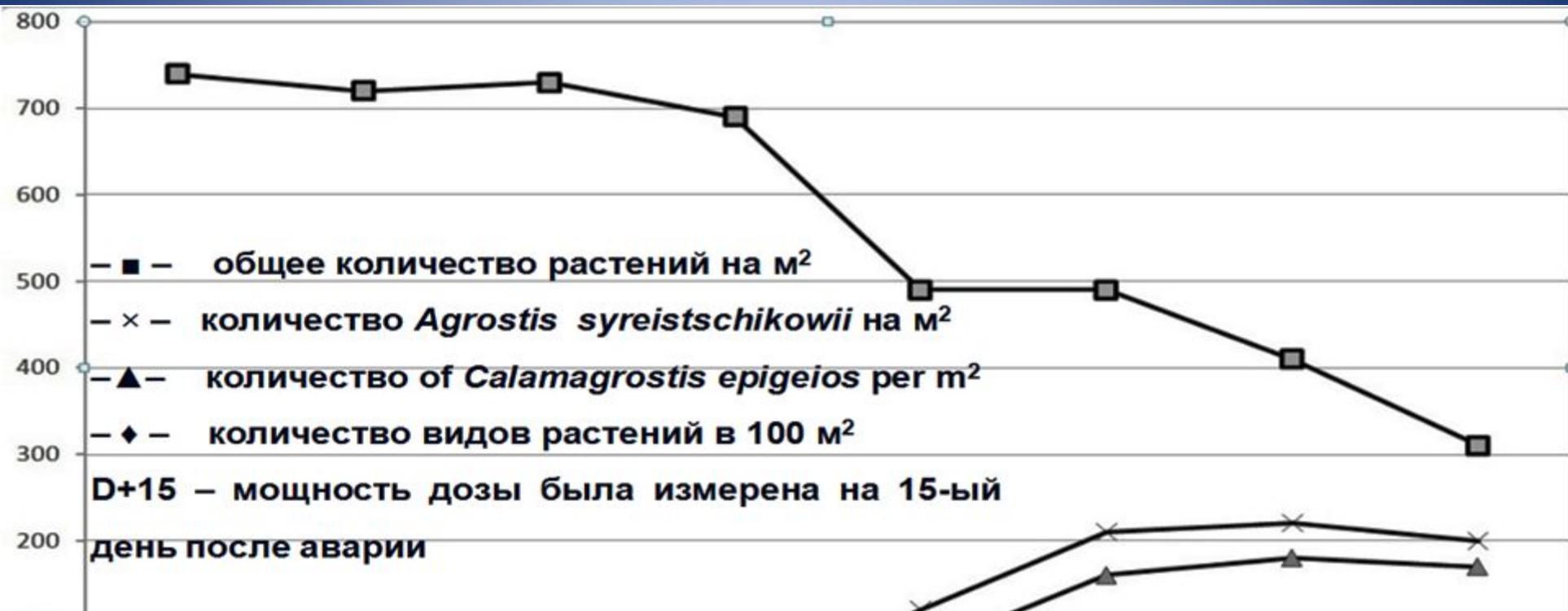


- Угнетение радиочувствительных и интенсивное развитие радиоустойчивых видов
- Нарушение трофических связей из-за гибели входящих в эти цепочки видов
- Массовое размножение

**Последствия вторичных радиационных эффектов могут быть значительнее, чем прямое радиационное воздействие**

органических останков

# Радиационные эффекты в луговых фитоценозах (Янов, район ЧАЭС, 1987) (Смирнов, Суворова, 1996)



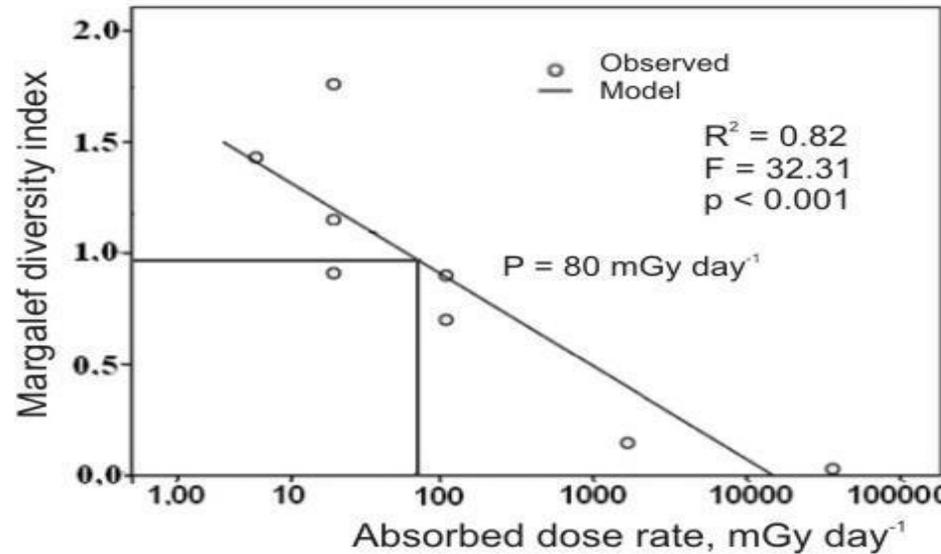
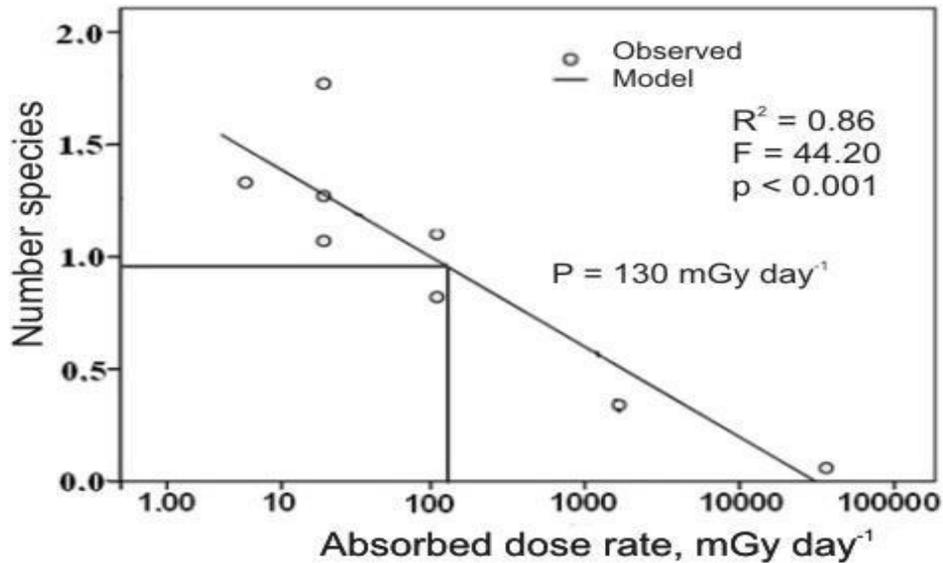
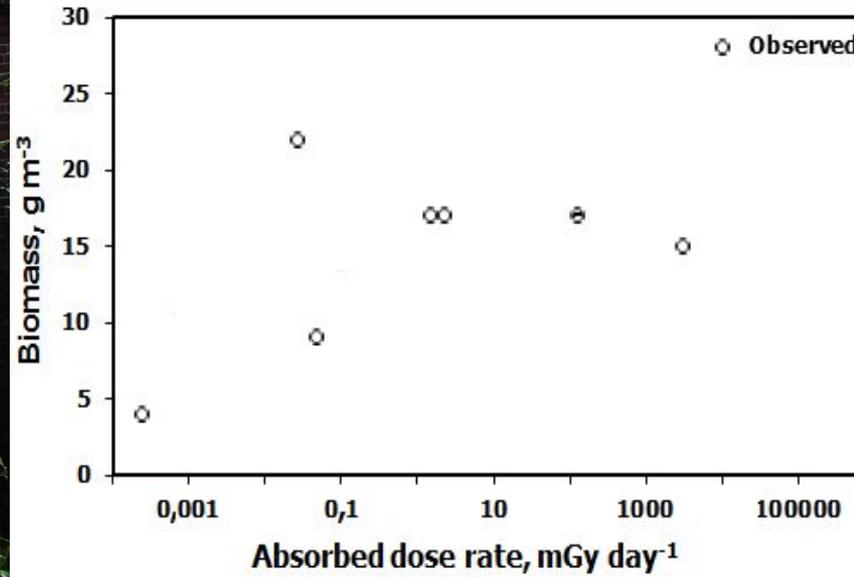
Выпадение из ценоза чувствительных видов ослабляет конкуренцию для оставшихся и создает предпосылки для их интенсивного развития

# Южный Урал, Теченский каскад водоемов, 2007-2015



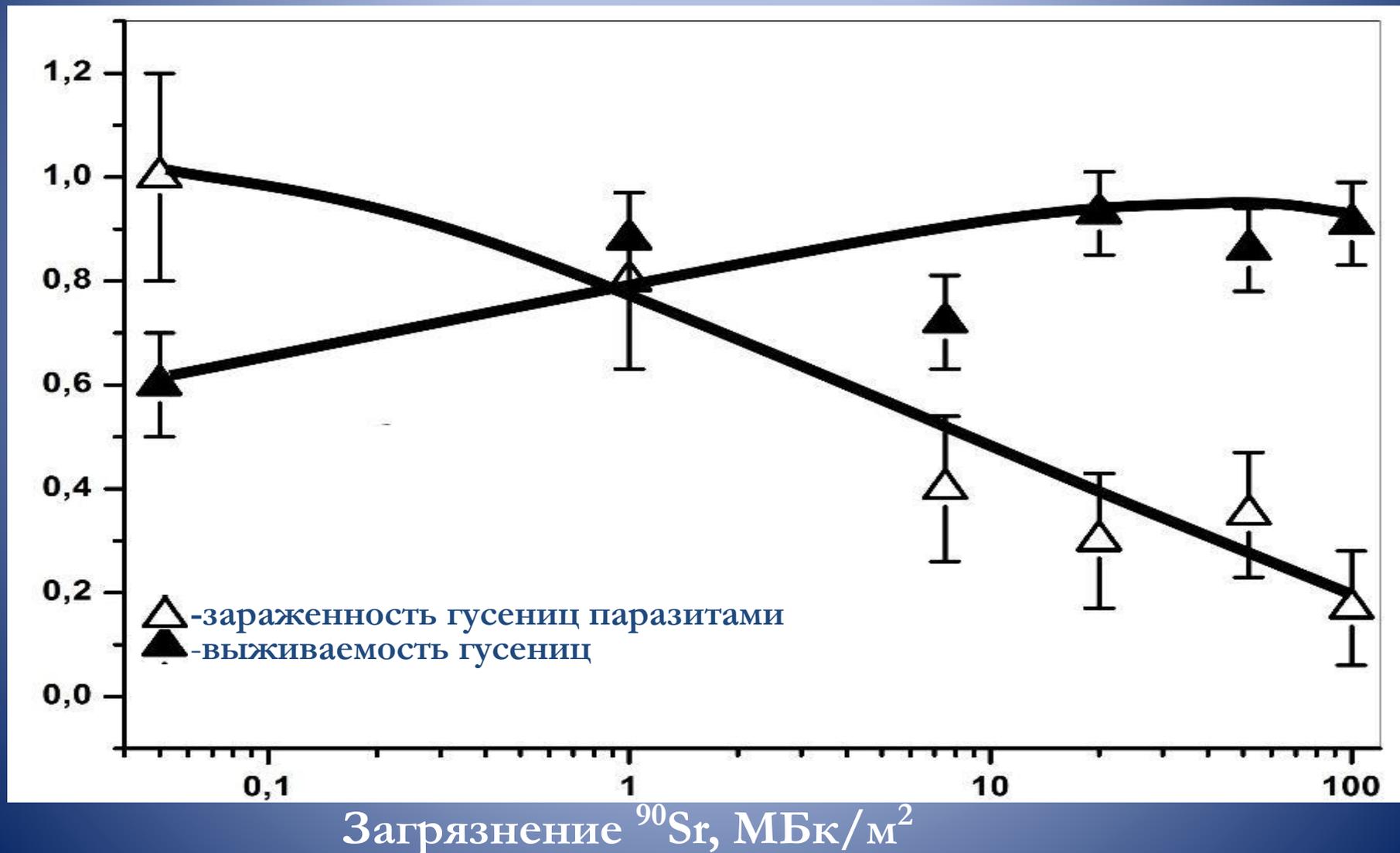
Облучение	Поглощенная фитопланктоном мощность дозы, $\mu\text{Гр}/\text{ч}$						
	Контроль	Н-2	В-11	В-4	В-10	Старое болото	Карачай
Внешнее	0.00015	1.1	1.2	34.9	4.3	249.6	124167
Внутреннее	0.0098	0.02	0.8	27.2	91.3	258.3	2883
<b>Сумма</b>	<b>0.01</b>	<b>1.1</b>	<b>2.0</b>	<b>62.1</b>	<b>95.6</b>	<b>507.9</b>	<b>127050</b>

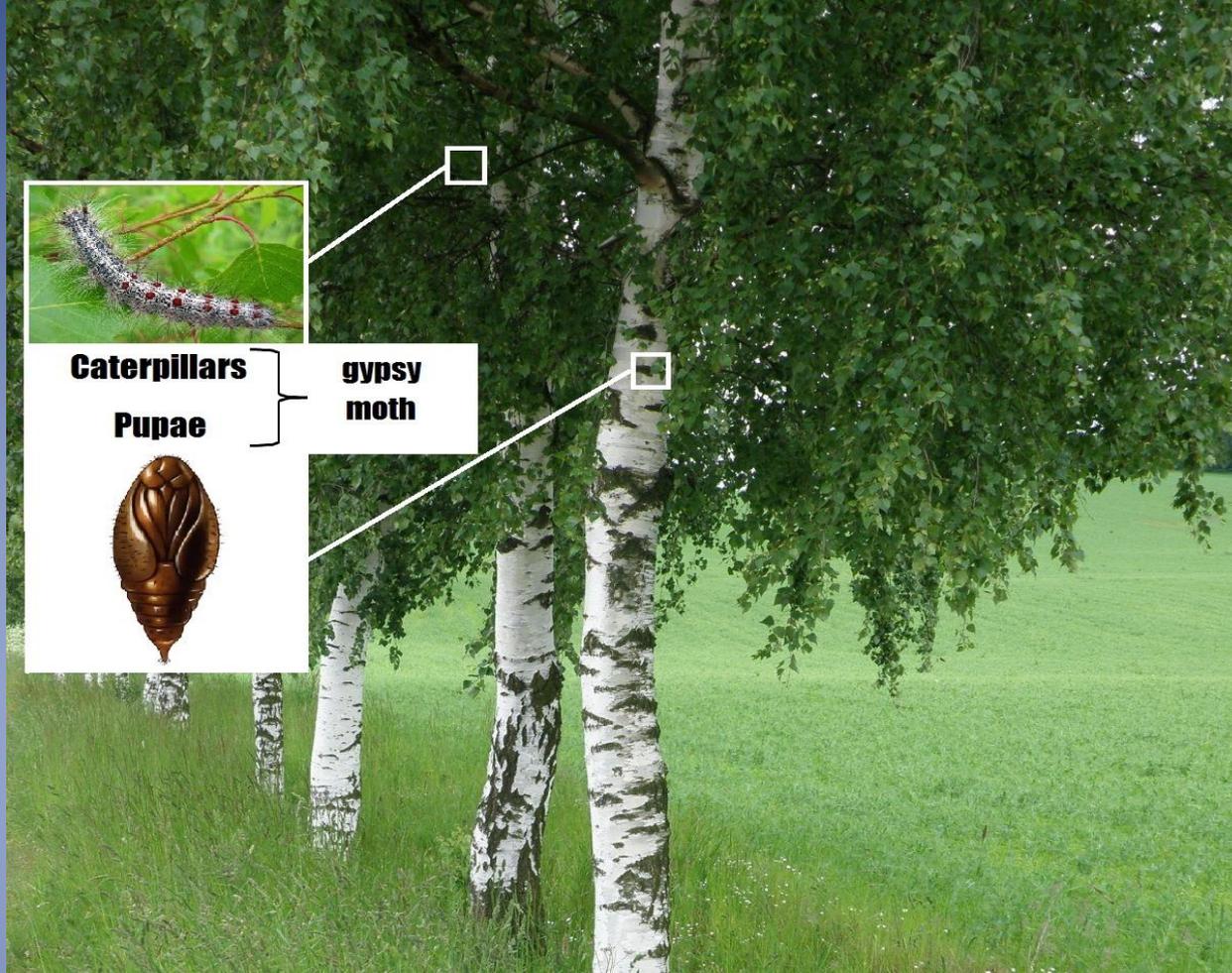
# Южный Урал, Теченский каскад водоемов, 2007-2015 (Pryakhin et al., 2016)



# Влияние радиоактивного загрязнения березового леса ( $^{90}\text{Sr}$ , Южный Урал) на гусениц непарного шелкопряда и паразитирующих на них мух-тахинид

(Криволицкий и др., 1988)

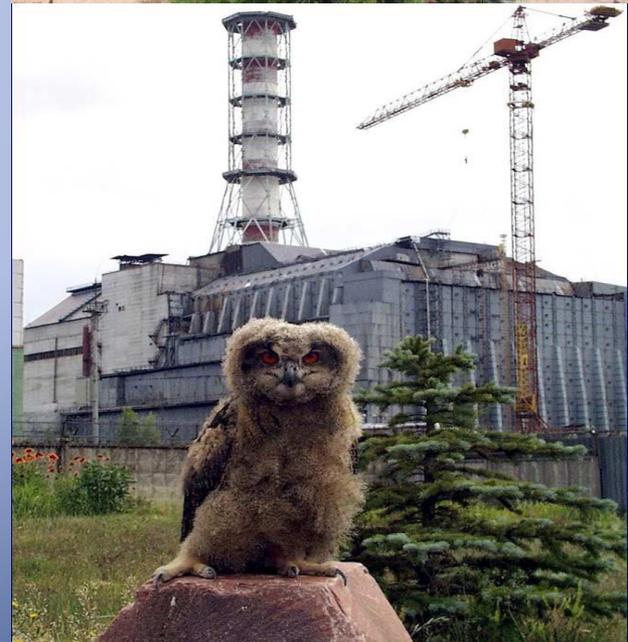




**Во многих ситуациях экологические факторы могут существенным образом модифицировать радиационное воздействие**

# Эффекты хронического радиационного воздействия?

- Отсутствие статистически значимого увеличения частоты мутаций в популяциях мышевидных грызунов даже в самых «грязных» местах 30-км зоны ЧАЭС (Chesser, Baker)
- Уменьшение объема мозга, снижение численности в популяциях насекомых, птиц и млекопитающих в 30-км зоне ЧАЭС (Moller



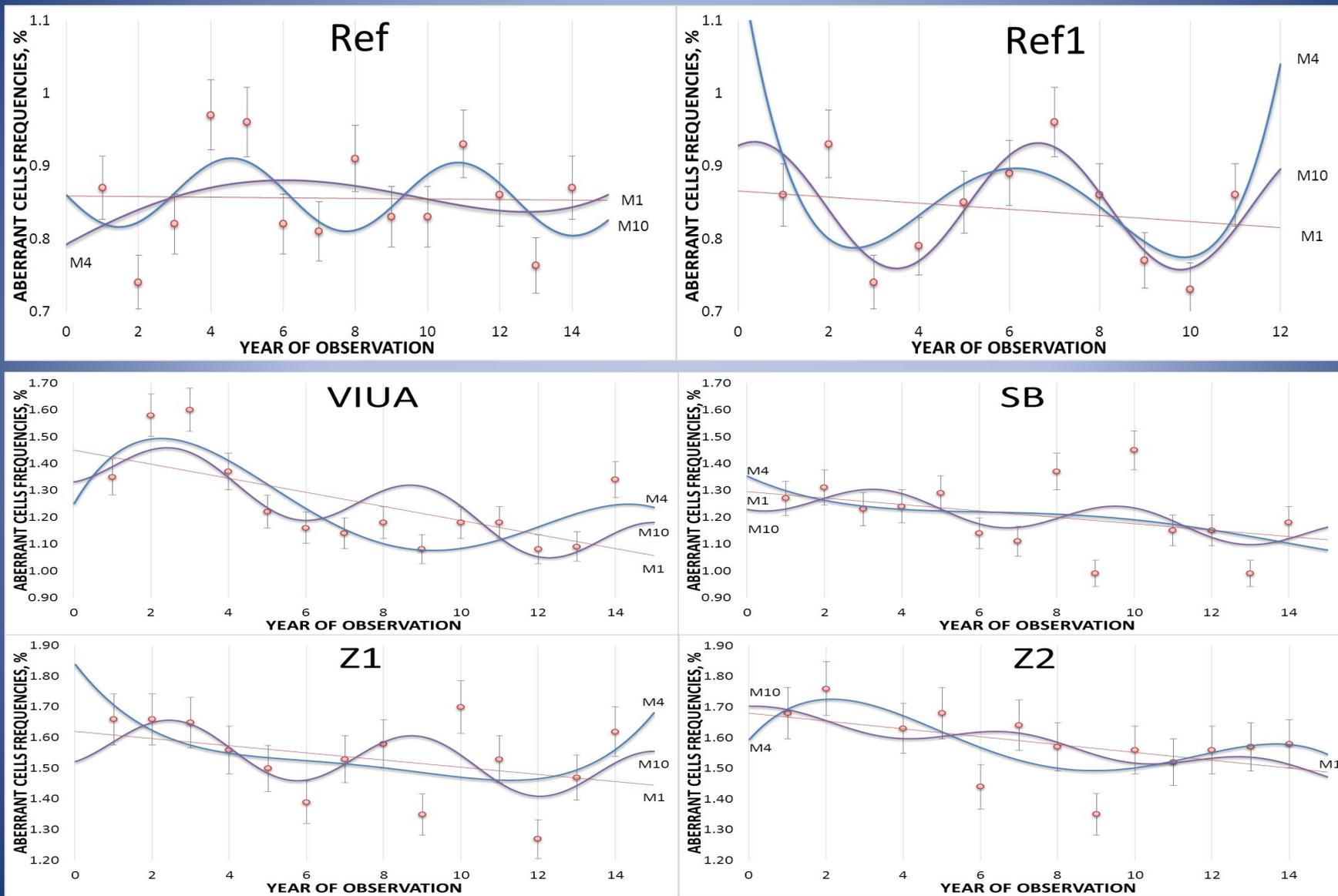
# Оценка адаптивных реакций в популяциях растений, населяющих контрастные по уровню и составу техногенного загрязнения территории разных климатических зон:

- 30-км зона ЧАЭС (Украина) и Полесский государственный радиационно-экологический заповедник (Белоруссия);
- загрязненные в результате аварии на ЧАЭС районы Брянской области России;
- 20-км зона вокруг АЭС Фукусима (Япония);
- Семипалатинский испытательный полигон (Казахстан);
- район расположения комплекса предприятий атомной промышленности в г. Сосновый Бор, Ленинградская обл.;
- хранилище отходов радиевого промысла (пос. Волный, Республика Коми).

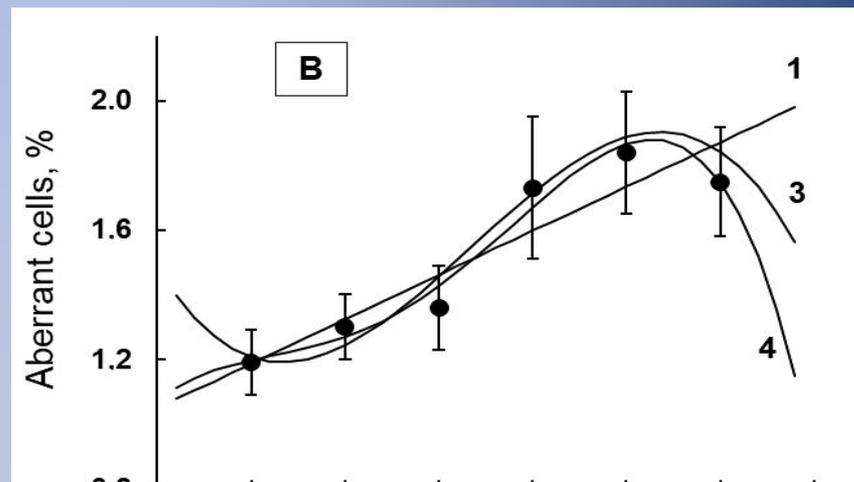
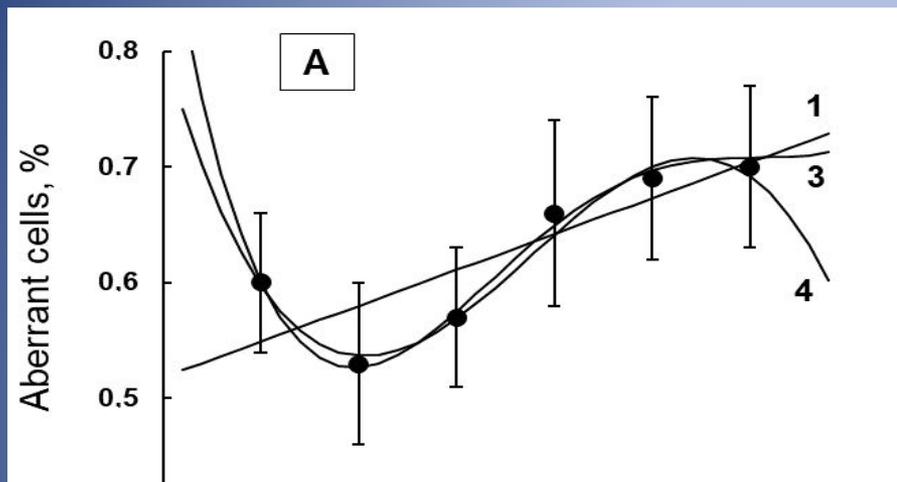
# Расположение экспериментальных участков



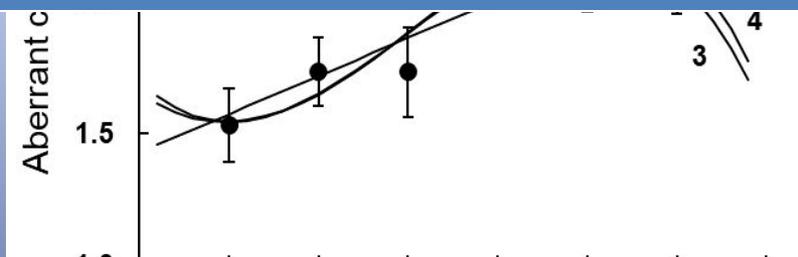
# Временная динамика цитогенетических нарушений в хронически облучаемых популяциях сосны



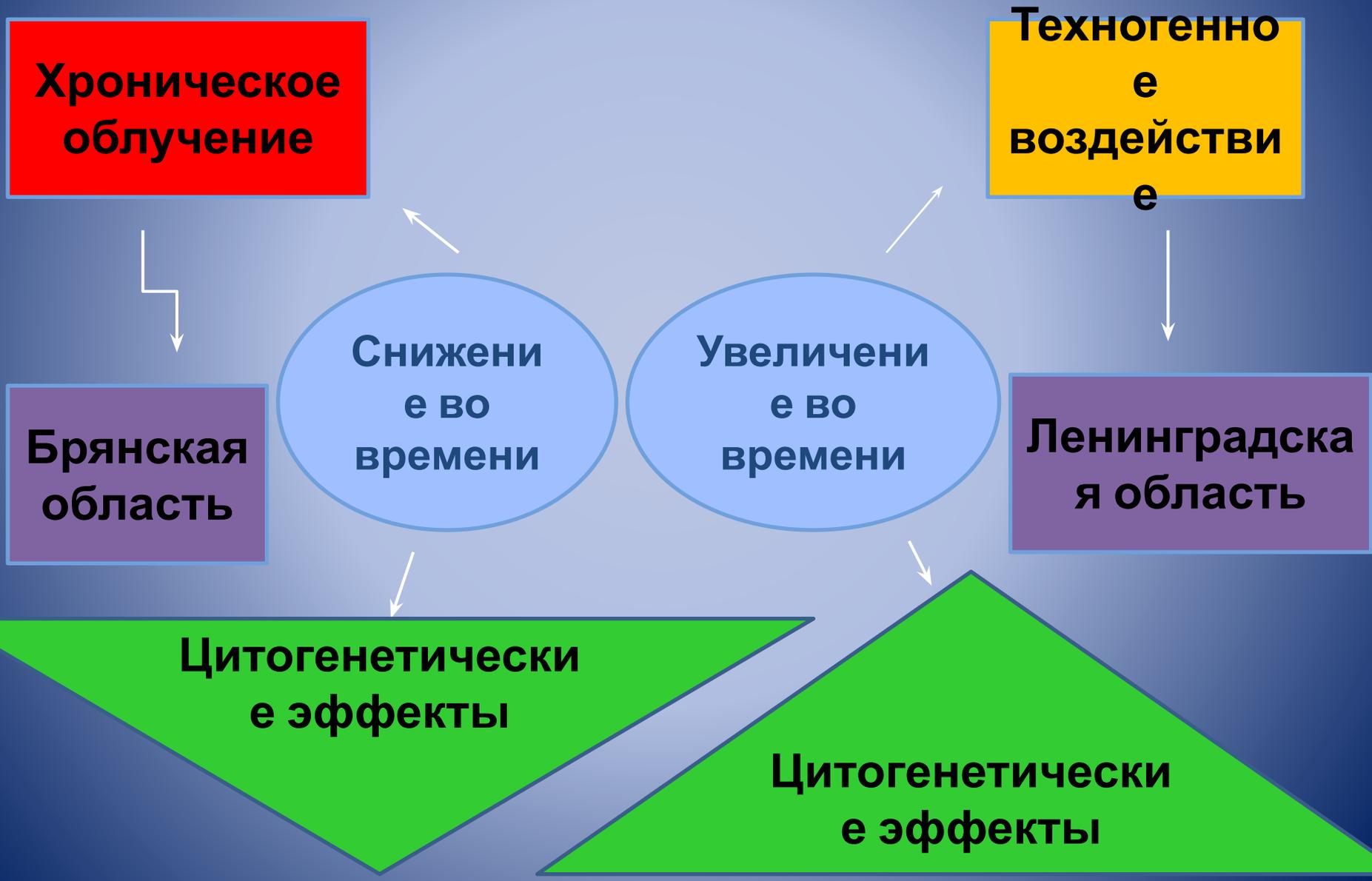
# Временная динамика цитогенетических эффектов в условиях сочетанного химического и радиационного воздействия



Хроническое радиационное воздействие ведет к увеличению диапазона изменчивости и дестабилизации временной динамики популяционных показателей



# Качественное различие экологических условий и их изменения во времени нашло отражение в ответной реакции популяций сосны



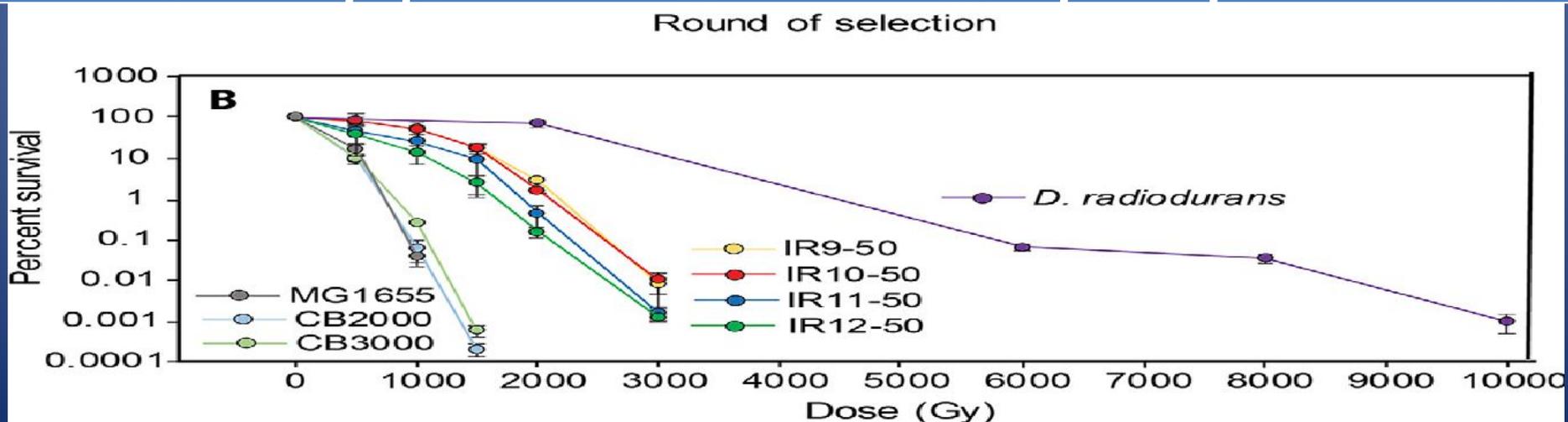
# Феномен радиоадаптации. Исследования на *Chlorella vulgaris* (Шевченко, 1979)

- Частота мутаций у хлореллы (пигментных, морфологических, карликовости) возрастала с увеличением концентрации радионуклидов в почве
- Дополнительное  $\gamma$ -облучение: на участках с повышенным уровнем радиоактивного загрязнения обитают популяции хлореллы в 1.5-2.0 раза более радиоустойчивые, чем контрольные
- Применение ингибиторов репарации, сравнение кривых доза-эффект при действии редко- и плотноионизирующих излучений, прямое определение активности репарации позволили заключить, что обитающие в условиях повышенного радиационного фона популяции хлореллы имеют более эффективные системы

# Секвенирование генома радиорезистентных линий *Escherichia coli* выявило мутации, обеспечившие увеличение эффективности систем репарации



Дивергенция популяций по устойчивости к облучению в высоких дозах связана с отбором на эффективность систем репарации



# Основные этапы динамики мутационного процесса в хронически облучаемых популяциях

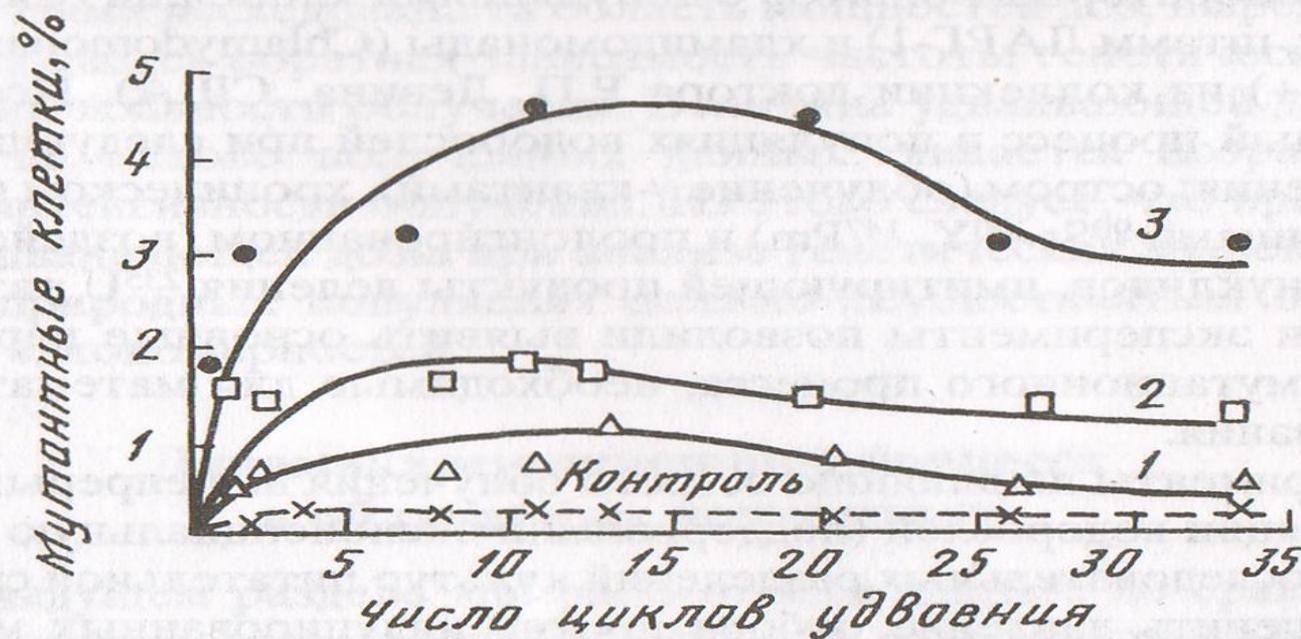
(Шевченко, 1979):

**Увеличение числа мутантных особей.**

**Стабилизация числа мутантных особей.** Установление равновесия между мутационным процессом и отбором, элиминирующим в каждом поколении часть менее приспособленных организмов

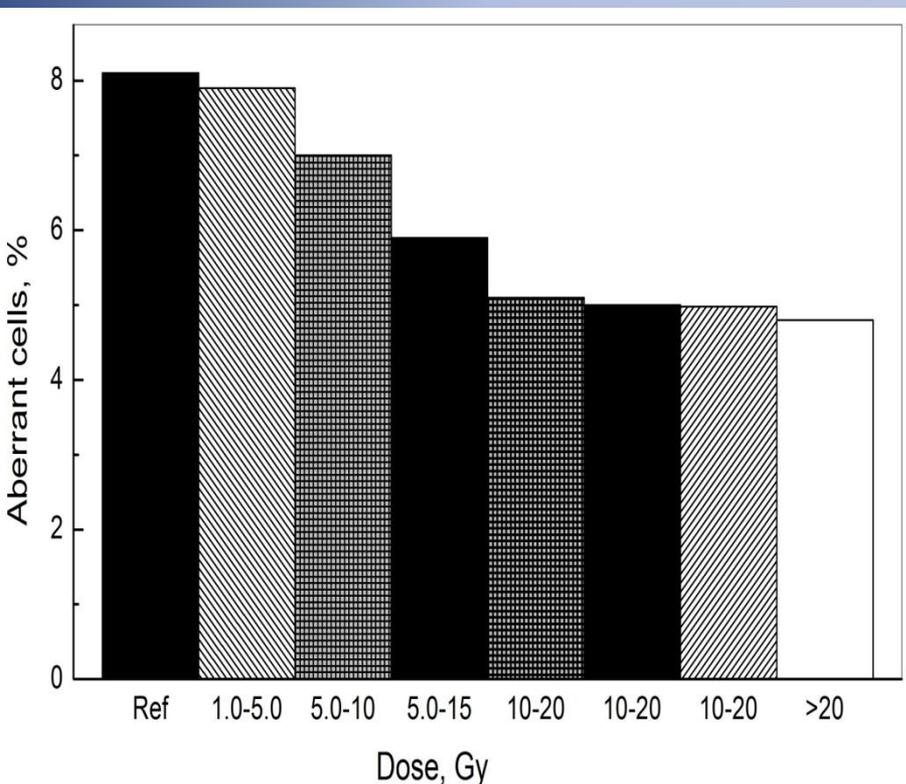
**Адаптивная перестройка генетической структуры популяции.** Радиочувствительные организмы устраняются, общая устойчивость популяции к облучению увеличивается

**Стабилизация популяции на новом уровне радиорезистентности** по сравнению с лю

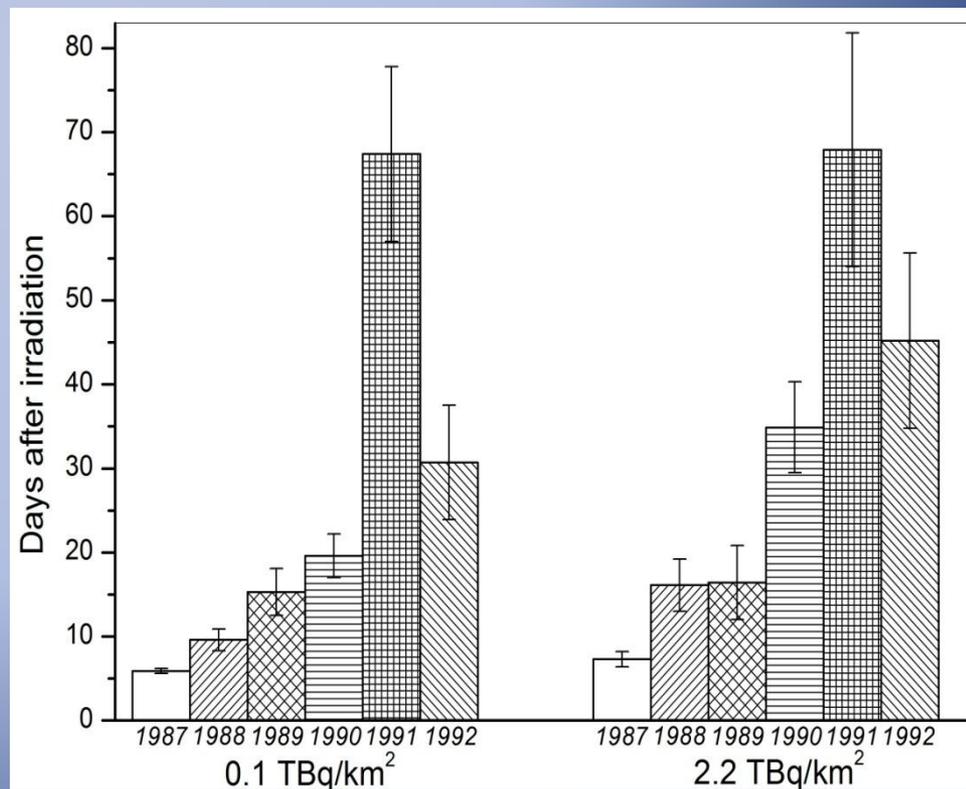


# Проявление эффекта радиоадаптации зависит от интенсивности и продолжительности радиационного воздействия

Радиоустойчивость семян сосны увеличивается с уровнем радиоактивного загрязнения (1997) (Федотов и др., 2006)



Радиоустойчивость рыжих полевок увеличивается вместе с числом поколений, прожитых в условиях радиоактивного загрязнения (Ильенко, Крапивко, 1998)



# Реакция растений на хроническое облучение с низкой мощностью дозы



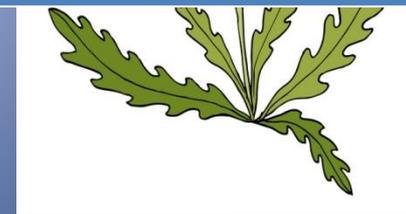
Регуляция накопления  
АФК за счет баланса  
АФК-генерирующих и  
антиоксидантных  
процессов



Высокие мощности дозы хронического облучения ведут к отбору на эффективность систем репарации (хлорелла, *E. coli*), а низкие – к поддержанию оксидативного баланса, экспрессии шаперонов и контролю транспозиции МГЭ (сосна и пастушья сумка)



Мобильных  
генетических  
элементов



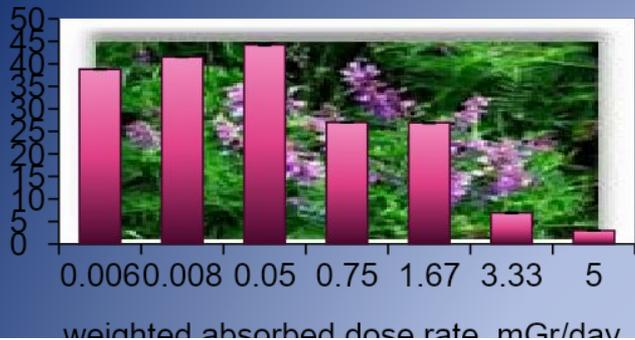
# Свалка отходов радиевого промысла, Республика Коми, 2003-2010



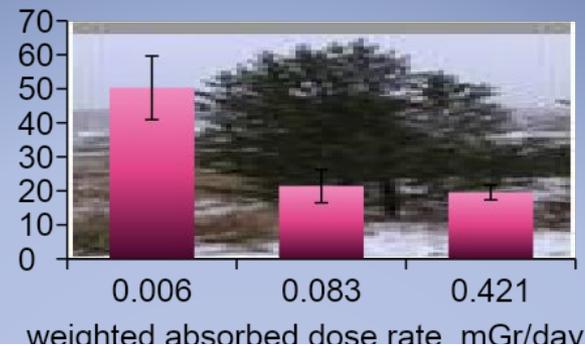
3300 мкР/ч

Черные отвалы

Survival rate of sprouts of seeds, %



Survival rate of sprouts of seeds, %

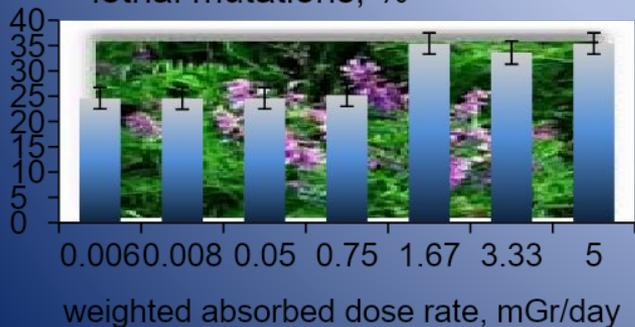


**Сопоставление экспериментов 1980 и 2003: в исследуемых популяциях сохраняется высокий уровень генетической и морфологической изменчивости**

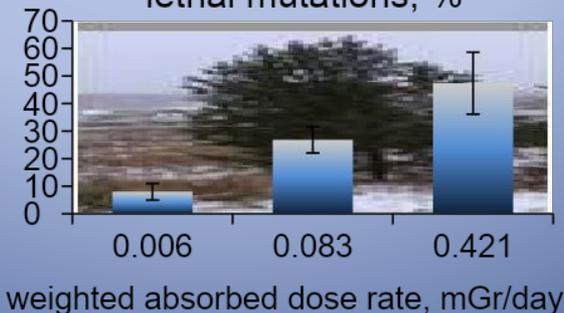


**Семена из экспериментальных популяций обладают повышенной чувствительностью к дополнительному облучению. Продемонстрирован наследуемый характер этого феномена**

Frequency of embryonic lethal mutations, %



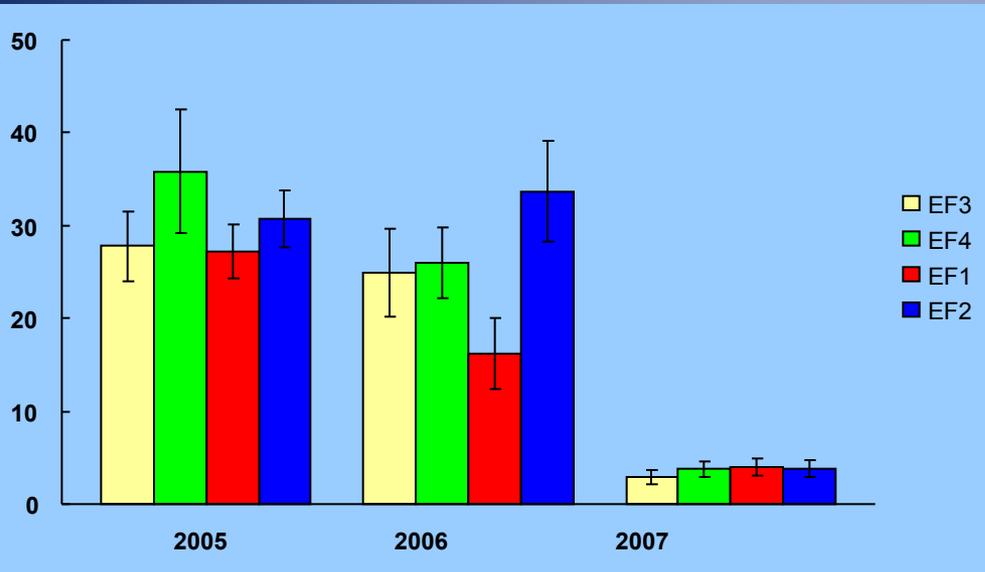
Frequency of embryonic lethal mutations, %



Evseeva, Majstrenko, Geras'kin et al. *Sci. Total Environment*. 2009. V. 407. p. 5335-5343.

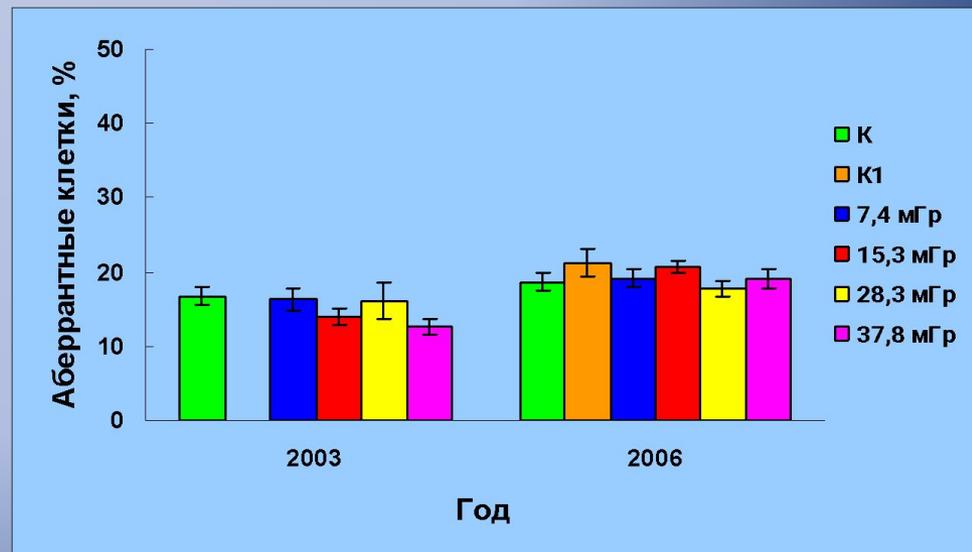
Евсеева, Гераськин и др. *Экология*. 2011. № 5. С. 355-360.

# Острое облучение семян тонконога, СИП



Острое облучение семян сосны, Брянская обл.

Geras'kin et al. // J. Environmental Radioactivity. 2012. V. 104. P. 55-63.

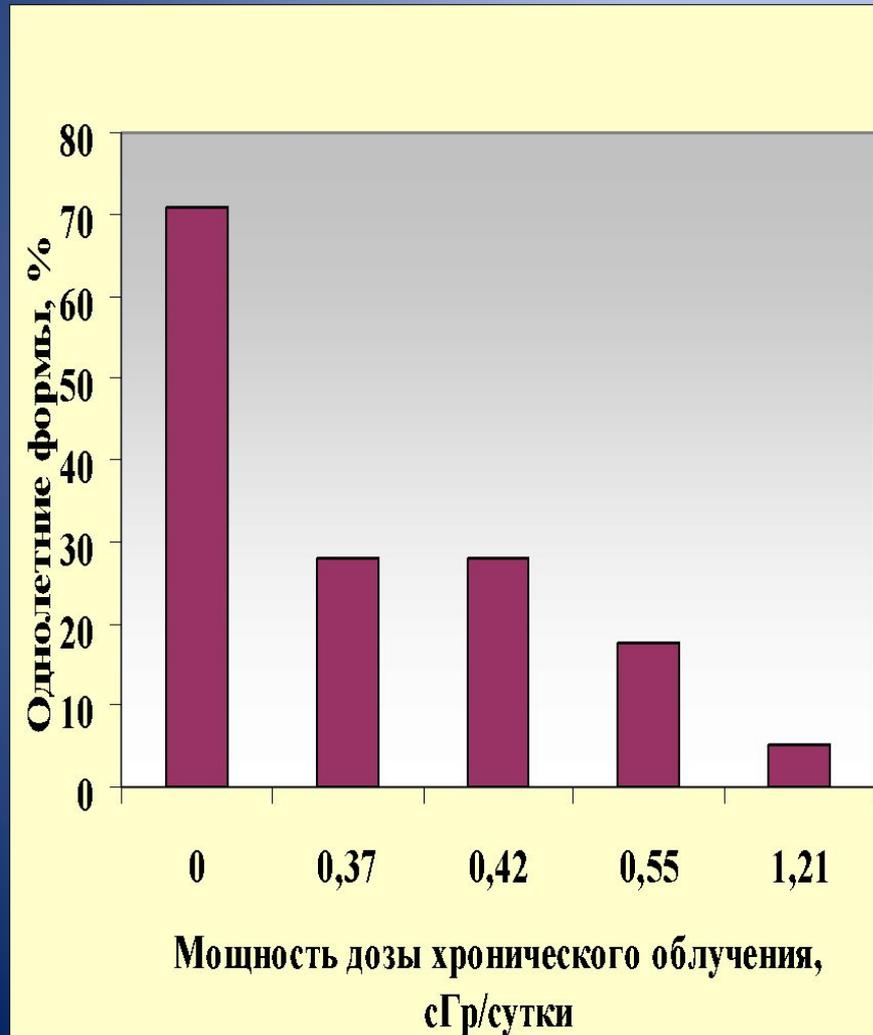


Geras'kin et al. // Ecotoxicology. 2011. V. 20. P. 1195-1208.

## Почему эффект радиоадаптации не всегда обнаруживается в природных популяциях?

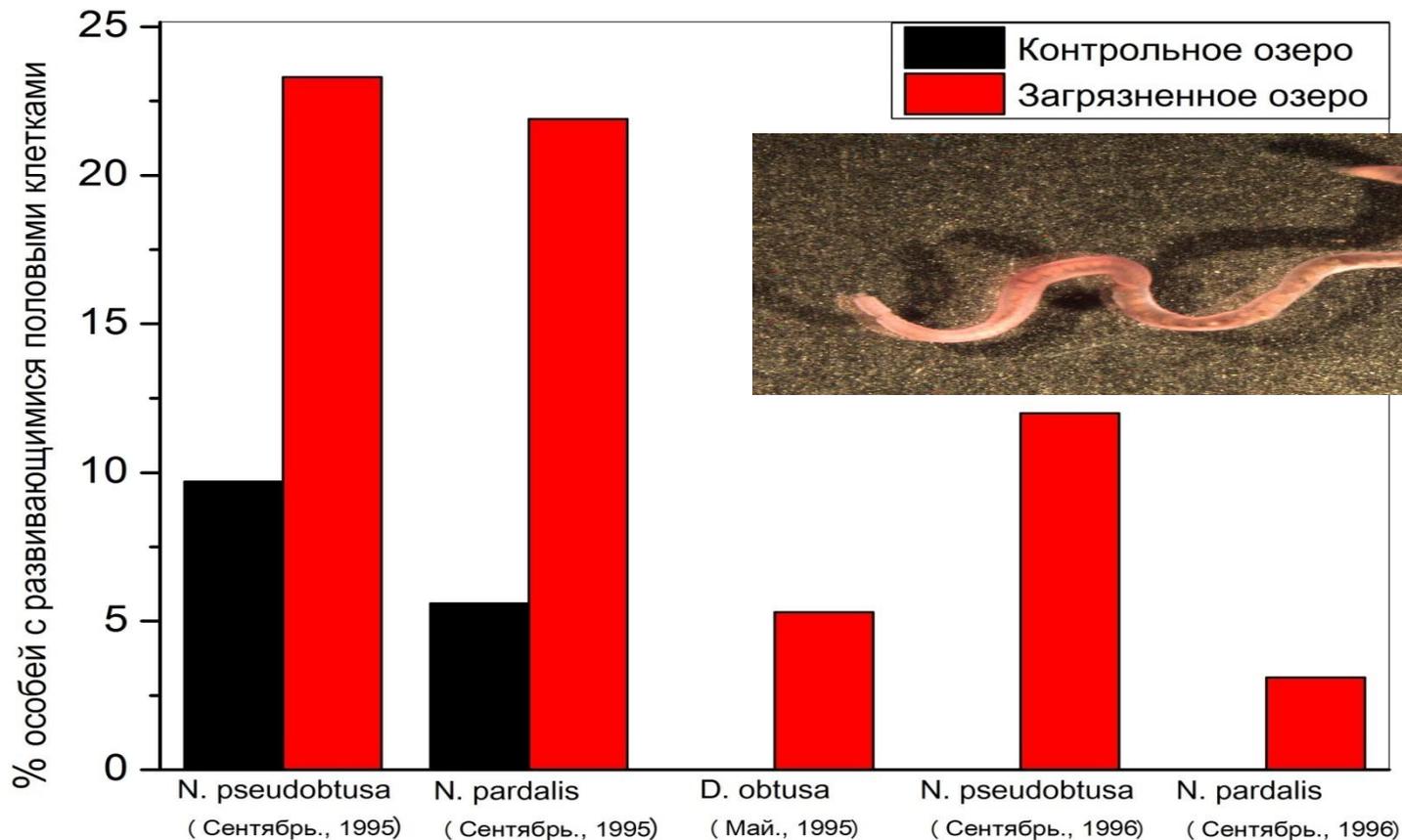
- Приспособленность к неблагоприятной среде ассоциирована с пониженной конкурентоспособностью в благоприятных условиях. Поэтому повышенная радиоустойчивость часто не возникает, а возникнув, не сохраняется в поколениях.
- Радиоадаптация регистрируется только у части видов, населяющих загрязненную территорию и не обнаруживается у других, несмотря на одинаковые условия существования.
- Ответная реакция популяции на радиационное воздействие зависит не только от вида организма, но и от биофизических характеристик излучения.

Зависимость частоты однолетних форм от мощности дозы  
хронического облучения в популяциях проломника северного  
(*Androsace septentrionalis* L.) (Шевченко и др., 1993)

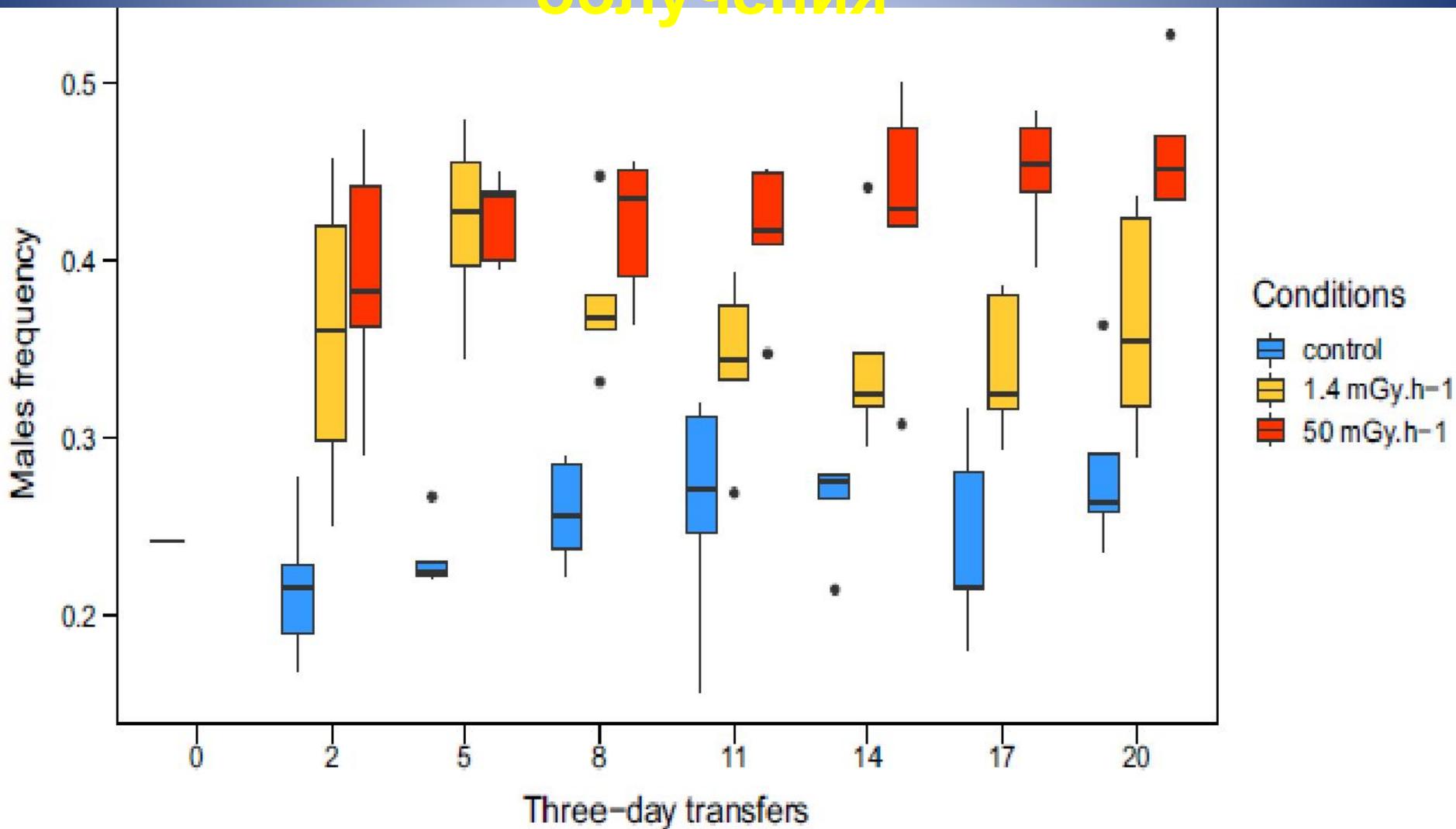


# Высокие уровни радиоактивного загрязнения стимулируют переход к половому размножению

(Tsytsugina, Polikarpov, 2003; Quevarec et al., 2022)



# Увеличение доли самцов *Caenorhabditis elegans* с мощностью дозы хронического облучения



- Quevarec et al. Evolutionary Applications. 2022. V. 15. P. 1331-1343.

# ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Нелинейные ответные реакции на радиационное воздействие – скорее правило, чем исключение.
- Наблюдаемые в области малых доз эффекты обусловлены не столько повреждающим действием ИИ, сколько особенностями реализации ответной реакции клетки на слабые внешние воздействия.
- Во многих ситуациях экологические факторы могут оказывать большее влияние, чем прямое радиационное воздействие.
- В адаптивных реакциях на радиационное воздействие задействованы разные биологические и экологические механизмы, действуют они на разных уровнях биологической организации, причем на результат оказывает влияние множество как внутренних, так и

That's all!

