

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ  
РАСТЕНИЙ  
И ЖИВОТНЫХ  
БИОГЕОЦЕНОЗОВ  
С ПОВЫШЕННЫМ  
ЕСТЕСТВЕННЫМ  
ФОНОМ РАДИАЦИИ

17-151  
Академия наук СССР  
Уральское отделение  
Коми научный центр

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ  
РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ  
С ПОВЫШЕННЫМ ЕСТЕСТВЕННЫМ ФОНОМ РАДИАЦИИ

(Труды Коми научного центра УрО АН СССР, № 97)

Сыктывкар 1988

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ БИОГЕОЦЕНОЗОВ С ПОВЫШЕННЫМ ЕСТЕСТВЕННЫМ ФОНОМ РАДИАЦИИ. - Сыктывкар, 1988. - 128 с.  
(Труды Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Представленные в сборнике работы освещают результаты полевых и экспериментально-теоретических исследований природной радиочувствительности живых организмов и ее изменчивости под влиянием радиоэкологических условий обитания.

Сборник представляет интерес для специалистов в области наземной радиоэкологии, гигиенистов.

Редакционная коллегия

М.В.Гецен (отв. редактор), О.Н.Попова (отв. секретарь),  
А.И.Таскаев, В.И.Шершунова

Л 110264



© Коми научный центр УрО АН СССР, 1988

## ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальные исследования в областях с повышенным (естественным или искусственным) фоном ионизирующих излучений позволяют получить ответ на одну из узловых проблем современной радиобиологии и радиоэкологии - о действии малых доз облучения на природные популяции растений и животных в среде их обитания. Такие регионы с относительно высокой радиоактивностью не без оснований рассматриваются как своеобразные модели сферы обитания человека и живых организмов в недалеком будущем, учитывая рост темпов техногенеза и увеличения радиационного фона. Авария на Чернобыльской АЭС еще раз убедительно подчеркнула, что ионизирующие излучения являются одним из самых значимых факторов, неразрывно связанных с интенсификацией техногенного стресса на природу.

Подчеркивая большой научный потенциал экспериментальных исследований в областях с повышенным содержанием радионуклидов, нужно отметить и очень серьезные методические трудности в оценке и интерпретации данных и в радиоэкологических реакциях на этих территориях. Это в первую очередь обусловлено комплексным влиянием на популяцию живых организмов большого числа модифицированных, относительно некоторых средних величин, других (кроме ионизирующих излучений) факторов, - в первую очередь, своеобразной биогеохимической обстановки в этих районах - увеличением количества разных микро- и макроэлементов. Указанные обстоятельства требуют от экспериментатора выполнения комплексных многофакторных опытов с хорошо подобранным контролем.

В областях с повышенным фоном ионизирующих излучений особое место занимают исследования тех биогенезов, где этот фон связан с нахождением в среде тяжелых естественных радионуклидов ( $^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и продуктов их распада). В этих областях популяции подвергаются повышенному облучению в течение очень многих поколений (де-

сятки, тысячи лет и более). Можно предполагать, что в данных условиях сформировались сообщества, устойчивые к воздействию ионизирующих излучений в относительно малых дозах. Не исключена радиоадаптация живых организмов. Исследуя жизнь популяций и организмов на разных уровнях организации биологических явлений, можно, по-видимому, дать оценку значимости происходящих в этих сообществах изменений.

В представленном сборнике охвачен широкий круг биологических объектов, находящихся в поле повышенного облучения, — растения, животные, микроорганизмы. Широкий охват изучаемых явлений — это и морфологические, и физиолого-биохимические, и цитогенетические изменения. Обсуждаются некоторые теоретические вопросы действия ионизирующих излучений на популяции живых организмов в среде повышенной концентрацией тяжелых естественных радионуклидов. Такой большой диапазон исследований, соединенных единой методологической линией с целью оценки экологической роли повышенного фона радиации, несомненно, делает сборник интересным для круга читателей, интересующихся проблемами роста радиационного фона в биосфере Земли.

Профессор Р. М. Алексахин

О РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТИ  
ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ  
МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ

К. И. Маслова

С проблемой радиочувствительности связаны вопросы изучения не только поражаемости клеточных органов, клеточных структур и отдельных систем организма, но и вопросы плодовитости и выживаемости популяций, а также поиск оптимальных условий, обеспечивающих повышение радиорезистентности животных к воздействию острых доз. Для радиоэкологов решение этой проблемы приобретает особое значение, так как понятия радиочувствительности и радиорезистентности имеют прямое отношение к вопросу адаптации видов в связи с неуклонно возрастающим радиационным фоном Земли.

Считается, что понятия радиочувствительности и радиорезистентности организма — звенья единой биологической цепи, две стороны единого процесса эволюционно выработанной сопротивляемости организма действию неблагоприятных факторов среды и патогенных факторов [1, 6].

Но как нередко бывает, данное понятие радиочувствительности не получило широкого звучания в литературе. Сегодня более распространена другая формулировка, на основании которой о радиочувствительности судят как о неодинаковой устойчивости организма к поражающему действию радиации. Эта формулировка не дает четкого представления о радиочувствительности как биологическом статусе организма. Более того, если исходить из представления, что процессы лучевого поражения развиваются на фоне поражения клеток, то радиочувствительность или радиорезистентность становится, по существу, клеточной проблемой. Несомненно, что сдвиги, возникающие в интегрированных кле-

точных системах, могут определять жизнедеятельность дальнейшие дозы ионизирующей радиации, будучи даже подпороговой системы, а следовательно, и предопределять ход лучей, могут изменять реактивные способности организма, вой реакции в целостном организме. Однако многочисленными экспериментами на крысах и собаках [1, 26] доказано, что при воздействии ионизирующей радиации степень активности восстановительных процессов в организме оказывается прямо пропорциональной дозе облучения, пока доза не превысит определенной величины. На основании проведенной количественной оценки внутриклеточной репарации и процессов восстановления клеточной популяции поврежденной ткани установлено, что "реальные тканевые системы не могут одновременно удовлетворять требования высокой надежности, точности и устойчивости" [2]. Отсюда следует, что радиочувствительность и радиорезистентность организма обязаны не только клеточным и тканевым системам.

В настоящее время накоплен достаточно обширный экспериментальный материал, свидетельствующий о том, что радиационную поражаемость организма и его систем влияют "образование цепных реакций окисления ненасыщенных жирных кислот, липидные продукты окисления, кислородное напряжение в радиочувствительных органах, содержание эндогенных сульфгидрильных соединений, активность физиологической регенерации тканей, репопуляционная способность стволовых клеток костного мозга и ряд других факторов" [2]. Встречаются указания на определенную корреляцию между интенсивностью основного обмена и отдельными физиологических показателей и их устойчивостью к действию ионизирующей радиации [23, 25].

Подводя итог сказанному, можно заключить, что при определении радиочувствительности как интегральной функции организма можно использовать разные пути в морфологическом, биохимическом и физиологическом изучении состояния отдельных органов и систем, но каждый из них в отдельности не будет полностью раскрывать общей картины радиочувствительности организма к лучевому воздействию. В лучшем случае эти исследования будут приближать к пониманию радиочувствительности как свойства организма, в основе которого лежит слаженное взаимодействие многих биологических процессов.

В последнее время внимание исследователей привлекает изучение радиочувствительности с помощью предварительного облучения организма малыми дозами [5, 10]. О том,

далее дозы ионизирующей радиации, будучи даже подпороговой, могут изменять реактивные способности организма, известна давно [9]. Одним из суждений о том, влияет ли предварительное облучение организма дозами малых мощностей на усиление его радиорезистентности к последующим острым лучевым нагрузкам, до сих пор носят весьма противоречивый характер.

Разноречивость мнений обнаруживается даже при постановке лабораторных экспериментов с предварительным облучением животных дозами малых мощностей, не говоря уже об использовании в этих целях природных популяций, обитающих на территориях с повышенным фоном гамма-радиации.

Несогласованность данных вызвана видовыми особенностями животных в устойчивости к действию ионизирующей радиации.

Немаловажную роль играют при этом и различные уровни тех же доз, с которыми имеет дело исследователь. В природной среде эти уровни вполне могут оказаться не действующими, слабо действующими и, наконец, биологически неэффективными.

Эффективность хронической экспозиции на уровне популяций проявляется прежде всего в сокращении продолжительности жизни и изменении структуры [28], а также в редукции плодовитости [18, 29].

Что касается видовых различий в радиочувствительности мелких млекопитающих, то они варьируют в очень широких пределах. Но до сих пор остается спорным вопрос о радиочувствительности лабораторных и близких им диких видов животных.

Б.М. Гравевская, например, полагает, что лабораторные животные более радиочувствительны, чем близкие им виды диких животных [8].

Есть мнение, что большая радиорезистентность популяций диких видов грызунов к острым дозам радиационных излучений есть не что иное, как благоприятное преимущество, дарованное самой природой [29].

Изменение чувствительности организма животных в зависимости от дозы и сроков хронической экспозиции в эксперименте — факт общеизвестный. Однако до сих пор нет четкого представления о том, повышается ли радиорезистентность мелких млекопитающих к дополнительным лучевым нагрузкам в случае обитания популяций в условиях повышенного фона гамма-радиации.

Данные Раушенбаха и Монастырского [24] показывают, что узкочерепные полевки, обитающие в условиях повышенного в 5-6 раз естественного радиационного фона, обладают большей радиорезистентностью, чем популяции того же вида из мест с нормальным гамма-фоном. Более



ных популяций к повторным лучевым нагрузкам. Как известно, объективность оценки зависит прежде всего от представительности наших выборок. Поэтому обратимся к ним, оставив на время детальное рассмотрение материалов таблицы. Конкретных указаний относительно комплектации выборок для оценки радиочувствительности млекопитающих методом пробит-анализа в литературе нет, а между тем это одно из основных условий в оценке выживаемости популяций. На наш взгляд, представительность выборки зависит не столько от количественного, сколько от ее качественного состава, поскольку количество определяется условиями самого пробит-анализа. Качественная же сторона заключается в том, чтобы попавшие в выборку особи достаточно четко отражали состояние популяции, ее половые и возрастные особенности, которые, как известно, играют весьма существенную роль в радиочувствительности организма. Так, по мнению Поспишил и Ваха [22], различия в значении  $LD_{50/30}$  для мышей в зависимости от их возраста составляют 3 Гр. Половые же различия в радиочувствительности белых мышей, по данным Лисенковой [15], могут достигать 40%.

Наш опыт показал, что для полевок-экономок наиболее удобны выборки из самцов сеголеток в возрасте трех-четырех месяцев. Мы исходили из того, что самцы чувствительнее самок к действию ионизирующей радиации вообще и к хроническому действию малых доз в частности [15, 18]. Немаловажно и то, что в природе самцы отлавливаются чаще, чем самки, в силу меньшей их привязанности к норе. При выборе возраста животных мы ориентировались на указание о том, что на более ранних стадиях онтогенеза видовые различия сглаживаются, а на более поздних проявляются сильнее [2]. Из этого следует, что анализ взрослого населения любой популяции мелких млекопитающих будет приближать нас к соотносительной оценке радиочувствительности у разных видов. В данном случае акцент на взрослое население обязан тому, что вся жизнедеятельность популяции полевок зависит прежде всего от взрослого населения, тогда как молодняк представляет собой лишь резерв популяции.

Возвращаясь к рассмотрению данных таблицы, мы хотели бы обратить внимание на величину доверительного интервала для каждой из четырех выборок. Доверительный интервал

показатель размаха радиорезистентности внутривидовой (в данном случае групповой) различий, обусловленных индивидуальными особенностями особей, попавших в выборку. Оказалось, что значения этой величины для природных популяций полевок контроля и опыта достаточно близки и складываются в 1,2-1,36 Гр. Почти те же значения индивидуальной чувствительности к радиации (от 1,36 до 1,57 Гр) отмечены у полевок, содержащихся в условиях вивария. Как известно, популяция - это хорошо скоррелированная система по ряду соматических и генетических признаков, но одновременно это и высокогетерогенная система в отношении морфофизиологических и биохимических характеристик, являющихся основой ее радиостойчивости. Именно поэтому при оценке радиостойчивости популяций пользоваться только средними значениями  $LD_{50/30}$  совершенно недостаточно. Здесь необходим поправочный коэффициент на природную вариабельность каждой особи, попавшей в выборку. Судя по нашим данным, показатели радиочувствительности популяции полевок-экономок с контрольного и опытного участков близки друг другу и характеризуются величиной  $7,3 \pm 1,2$  Гр и  $7,23 \pm 1,36$  Гр. Те же показатели для полевок, содержащихся в условиях вивария, соответственно выглядят:  $7,95 \pm 1,36$  Гр и  $7,75 \pm 1,57$  Гр.

Подводя итог, приходим к следующему заключению.

При хроническом (внешнем и внутреннем) облучении природных популяций полевок-экономок дозами малых мощностей в биогеоценозах, загрязненных естественными радионуклидами, у них не наблюдается повышения радиорезистентности к дополнительным острым лучевым нагрузкам. Как показано ранее [20], на исследуемых участках ионизирующая радиация выступает как постоянно действующий радиэкологический фактор среды, который оказывает сильное стрессовое воздействие на организм. Это выражается в комплексе патоморфологических изменений органов системы крови [21], половой системы и дискоординации многих биохимических процессов [4, 14, 17]. Совершенно очевидно, что в данных условиях для усиления сопротивляемости популяций к повторным лучевым нагрузкам им необходимы какие-то дополнительные энергетические резервы. Не исключено, что одним из таких резервов может оказаться длительный "отдых" от воздействия радиэкологического фактора. На такую возможность, в частности, указывают результаты наших

исследований популяций полевок, содержащихся в условиях вивария. В природной среде таким "отдыхом" от воздействия радиации служат постоянные миграции зверьков за пределы участка. Анализ собственных и литературных данных убедительно показывает, что радиочувствительность популяций зависит от радиоустойчивости особей, ее составляющих, а радиоустойчивость особей - от слаженности работы внутренней среды организма. Но как известно [7], гомеостатическое равновесие среды организма в свою очередь зависит от ряда генетически запрограммированных функциональных систем. Отсюда следует, что радиочувствительность - явление многофакторное, обусловленное как фенотипическим, так и генотипическим особенностям организма. Наследственно обусловленная реактивность каждой особи - это проявление ее природного неспецифического средства защиты против неблагоприятных факторов среды, в том числе и от проникающей радиации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Акоев И.Г. Проблемы постлучевого восстановления. - М.: Атомиздат, 1970. - 368 с.
2. Акоев И.Г. Некоторые итоги теоретического анализа радиационного поражения организма // Изв. АН СССР. С. биол. - 1976. - №1. - С.41-51.
3. Акоев И.Г., Тяжелова В.Г. Закономерности формирования радиационного поражения организма // Биофизика сложных систем и радиационных поражений. - М.: Наука, 1977. - С.202-205.
4. Алиев А.Т. Белки плазмы крови и гемоглобин полевок-экономок (*Microtus oeconomus* P.), обитающих в различных радиоэкологических условиях: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Л., 1974. - 24 с.
5. Биккулов Р.И., Кудрицкий Ю.К. Влияние предварительного облучения мышей рентгеновскими лучами в дозе 25 Р на частоту хромосомных перестроек при повторном облучении в дозе 300 Р // Вестник АМН СССР. - 1966. - №8. - С.27-31.
6. Общие проблемы радиочувствительности организма // И.Д. Горизонтов, И.Г. Даренская, Н.П. Домшляк, А.Б. Ципин // Вопросы общей радиобиологии. - М.: Атомиздат, 1966. - С.63-89.

7. Граевская Б.М., Золотарева Н.Н., Нечаев Н. О роли гомеостаза в радиочувствительности животных // Журн. общ. биол., 1975. - Т.36. - №1. - С.135-141.
8. Граевская Б.М. О природе радиочувствительности биологических объектов // Проблемы природной и модифицированной радиочувствительности. - М.: Наука, 1983. - С.67-77.
9. Дурмишьян М.Г. О реакциях организма на действие малых доз ионизирующей радиации // Известия АН СССР. С. биол. - 1961. - №3. - С.386-410.
10. Зверева Л.Н., Роничевская Г.М. Защитное действие малых доз предварительного рентгеновского облучения на соматические клетки мышей // Изв. СО АН СССР. С. биол. - 1977. - Вып. №1. - №5. - С. 107-112.
11. Радиочувствительность популяций мелких млекопитающих на участках, загрязненных стронцием-90. Теоретич. и практич. аспекты действия малых доз ионизирующих излучений / А.И. Ильенко, С.И. Исаев, И.А. Рябцев, С.П. Мунин. - Сыктывкар, 1973. - С.13-14.
12. Ильенко А.И. Концентрирование животными радионуклидов и их влияние на популяцию. - М.: Наука, 1974. - 165 с.
13. Ильенко А.И., Исаев С.И., Рябцев И.А. Радиочувствительность некоторых видов мелких млекопитающих: возможность адаптации популяций грызунов к искусственному загрязнению биосферы  $Sr^{90}$  // Радиобиология. - 1974. - Т.14. - Вып.4. - С.572-575.
14. Кудяшева А.Г. Активность сукцинат-, пируват- и лактатдегидрогеназ в тканях *Microtus oeconomus* Pall., обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. - Киев, 1986. - 24 с.
15. Лисенкова Л.Н. Влияние хронического облучения малых дозах на половые различия в радиоустойчивости мышей // Радиобиология. - 1974. - Т.14. - Вып.5. - С.720-725.
16. Маслов В.И. Аккумуляция урана, радия и тория животными радиоэкологической группы тесного контакта с радиоактивными веществами в среде обитания // Теоретические и практические аспекты действия малых доз ионизирующих излучений. - Сыктывкар, 1973. - С.100-101.

17. Маслова К.И. Радиочувствительность таежных грызунов и возможность их приспособления к действию ионизирующей радиации как радиэкологическому фактору среды. - Сыктывкар, 1978. - 23 с. (Сер.препринтов "Науч. докл." / АН СССР. Коми фил., Вып.51).
18. Маслова К.И., Верховская И.Н. Биологическое действие повышенной радиоактивности на организм животных в природной среде // Проблемы радиэкологии и биологического действия малых доз ионизирующей радиации. Сыктывкар, 1976. - С.127-139.
19. Маслова К.И. Влияние экологического фактора повышенной естественной радиоактивности на организм мшечевидных грызунов // Радиэкология позвоночных животных - М.: Наука, 1978. - С.33-59.
20. Маслова К.И. Повышенная естественная радиоактивность как радиэкологический фактор среды обитания. Радиэкологические исследования почв, растений и животных в биогеоценозах Севера. - Сыктывкар, 1983. - С.21
21. Материй Л.Д. Цитоморфологическое изучение системы крови у полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях действия повышенных уровней естественной радиоактивности: Автореф. дисс. ... канд биол. наук. - Сыктывкар, 1979. - 25 с.
22. Поспишил М., Ваха И. Индивидуальная радиочувствительность, ее механизмы и проявления. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 107 с.
23. Поспишил М., Новак Л., Гашек Б. Энергетический баланс и предсказание радиочувствительности кролика // Радиобиология. - 1964. - Т.4. - Вып.3. - С.396-401.
24. Раушенбах Ю.О., Монастырский О.А. Исследование адаптации животных к повышенному естественному фону радиации // Влияние ионизирующих излучений на наследственность. - М.: Наука, 1966. - С.165-176.
25. Рязанов В.М. Изучение содержания и некоторых свойств продуктов липидного обмена у организмов с различной устойчивостью к действию ионизирующей радиации. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. - М.: Изд-во МГУ, 1972. - 36 с.
26. Тяжелова В.Г., Акоев И.Г. Репарация радиационного поражения млекопитающих во время и после облучения // Радиобиология. - 1974. - Т.14. Вып.5. - С.70-704.
27. Шведов В.Л., Голощапов П.В. Радиочувствительность организма и возможность адаптации популяций в хроническом воздействии стронция-90 // Радиобиология. - 1977. - Т.17. - Вып.3. - С.404-408.
28. French N.R. Chronic low-level gamma irradiation of a desert ecosystem for five years: Symposium international de radioecologie. Centre d'etudes Nucleaires Cadarache du 8 au 12 septembre. - 1969. - P.1151-1169.
29. French N.R. Radiation sensitivity of rodent species // Nature. - 1969. - V. 222. - N. 5197. - P. 1003-1004.

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ  
К ИЗУЧЕНИЮ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
MICROTUS OESONOMUS PALL.,  
ОТЛОВЛЕННЫХ НА УЧАСТКАХ  
С РАЗЛИЧНЫМ ГАММА-ФОНОМ

Л. Д. Материй

В современной радиоэкологии большое внимание уделяется изучению природной радиочувствительности животных диких видов. Проблема эта актуальна как в теоретическом так и в практическом отношении для прогнозирования возможностей естественного отбора и адаптации животных неуклонно повышающемуся радиационному фону Земли [7, 11].

Являясь генетически обусловленным свойством организма, радиочувствительность, как известно, варьирует в широких пределах. Установлено, что различная чувствительность к радиационному воздействию как у животных разных видов, так и у индивидов одного вида, определяется особенностями химизма тканей и обмена веществ [2, 12]. Интегральным показателем радиочувствительности является полулетальная доза - LD<sub>50/30</sub>. Однако этот показатель весьма неудобен для радиоэкологических исследований. В настоящее время радиобиологами разработан ряд биохимических тестов, позволяющих косвенно определять радиочувствительность организма без непосредственного его облучения [1, 2, 12]. В своих исследованиях мы использовали два таких критерия. Это - уровень сахара в крови и содержание гликогена в лейкоцитах. По литературным данным первый показатель имеет прямую, а второй - обратную корреляционную взаимосвязь с радиочувствительностью животного организма [2, 7]. Цель данной работы - с помощью этих критериев определить радиочувствительность у *Microtus oesonomus* Pall. и проследить за ее изменениями в зависимости от пола, возраста, фазы популяционного цикла и уровня радиоактивности среды обитания.

Материал и методика

Объектом исследования служили полевки-экономки (*Microtus oesonomus* Pall.), отлавливаемые в течение трех лет в периоды депрессии, подъема и высокой численности) в зоне средней тайги на природных участках с нормальным (0,72-1,08 пА/кг) и повышенным (3,6-144 пА/кг) гамма-фоном. Ранее было показано, что животные на радиоактивных участках испытывали не только внешнее, но и внутреннее облучение от инкорпорированных радионуклидов. Основную массу среди них составляет <sup>226</sup>Ra. Установлено, что в организме полевок с радиоактивных участков уровень радиации был на один-два порядка выше, чем у животных с контрольного участка. Кроме того, организм полевки испытывает воздействие газообразных эманаций (радона и торона), которые заполняют убежища зверьков и являются  $\alpha$ -излучателями. Доза от радиоактивных эманаций составляет до 350 мкР/сутки [8, 9].

Показателями радиочувствительности организма полевок служили содержание гликогена в лейкоцитах и сахара в крови, которые определяли общепринятыми цитохимическим [14] и биохимическим [13] методами. Для анализа отбирали здоровых животных в состоянии средней упитанности, хорошей двигательной активности и по возможности лишенных экто- и эндопаразитов. Через 24 ч после отлова таких животных подвергали декапитации, кровь брали из тушки. Полученные результаты обработаны методом вариационной статистики с учетом малого объема выборок. Коэффициент достоверности различий между крайними вариантами определяли методом Стьюдента. Достоверными считали различия при  $P \geq 0,05$  [6].

Результаты и обсуждение

Как видно из табл. 1 и 2, где представлены данные о содержании и распределении гликогена в лейкоцитах контрольной группы животных, в фазу низкой численности полевков уровень его оценивался 4,99 баллами. На долю кле-ток с наибольшим количеством полисахарида приходится 13,8% общего числа исследованных лейкоцитов. В период подъема численности высокий уровень гликогена отмечен в клетках белой крови как у самцов, так и у самок. В зависимости от возраста у первых этот показатель изменялся от



Содержание и распределение гликогена  
в лейкоцитах контрольных самцов  
в разные фазы популяционного цикла

Фаза популяционного цикла	n	Кол-во проанализированных клеток	Распределение клеток по группам, % к общему числу клеток				Содержание гликогена, усл.ед. "К"
			P1	P2	P3	P4	
			$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	
Неполовозрелые							
Пик	12	1200	6,5 ± 0,4	43,7 ± 0,6	38,3 ± 0,5	11,5 ± 0,2	4,12
Половозрелые сеголетки							
Подъем	5	500	9,9 ± 0,2	50,7 ± 0,7	34,2 ± 0,6	5,2 ± 0,2	5,05
Пик	12	1200	7,2 ± 0,3	48,4 ± 0,7	39,5 ± 0,8	4,9 ± 0,6	4,81
Перезимовавшие							
Депрессия	3	300	13,8 ± 0,8	41,3 ± 0,5	37,9 ± 0,2	7,3 ± 0,7	4,99
Подъем	6	600	9,3 ± 0,2	46,4 ± 0,6	34,4 ± 0,6	9,2 ± 0,6	4,75
Пик	3	300	9,3 ± 0,4	41,3 ± 0,4	42,0 ± 0,4	7,4 ± 1,0	4,67

Примечание. n - количество особей; P1 - процент лейкоцитов с высоким содержанием гликогена; P2 - со средним содержанием гликогена; P3 - с низким содержанием гликогена; P4 - с очень низким содержанием гликогена.

Содержание и распределение гликогена  
в лейкоцитах контрольных самок  
в разные фазы популяционного цикла

Фаза популяционного цикла	n	Кол-во проанализированных клеток	Распределение клеток по группам, % к общему числу клеток				Содержание гликогена, усл.ед. "К"
			P1	P2	P3	P4	
			$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	$\bar{x} \pm m_x$	
Неполовозрелые							
Подъем	7	700	10,2 ± 0,2	49,5 ± 0,4	34,6 ± 0,5	5,7 ± 0,3	5,03
Пик	6	600	8,9 ± 0,4	41,9 ± 0,4	38,9 ± 0,7	10,3 ± 1,1	4,57
Половозрелые сеголетки							
Подъем	6	600	9,3 ± 0,3	50,1 ± 0,6	36,0 ± 0,6	4,6 ± 0,3	5,02
Пик	11	1100	6,8 ± 0,5	46,5 ± 0,4	41,3 ± 0,6	5,4 ± 0,4	4,70
Перезимовавшие							
Подъем	3	300	9,5 ± 0,4	49,8 ± 0,6	33,4 ± 1,5	7,3 ± 0,6	4,94
Пик	12	1200	7,3 ± 0,3	40,0 ± 0,8	42,5 ± 0,8	10,1 ± 0,6	4,41

Примечание. Обозначение см. в табл. 1

4,75 до 5,06, а у вторых от 4,94 до 5,03 балла. Доля клеток с максимальным насыщением гликогена было несколько ниже, чем в предыдущую фазу популяционного цикла, составляла у самцов 9,3-9,9%, а у самок 9,5-10,2%. Показатели в пик численности таковы: "К" - 4,41-4,81 балла, "Р<sub>1</sub>" - 6,5-9,3%.

Анализ показал, что у контрольных полевок независимо от пола, возраста и фазы популяционного цикла лейкоциты характеризуются сравнительно высоким содержанием гликогена. Это возможно, если клетки работают в ограниченном режиме. В данном случае их биоэнергетика обеспечивается простым окислением глюкозы, поступающей извне, что характерно для этих клеток в норме. Содержание гликогена в лейкоцитах в таких случаях почти не изменяется [4, 5]. Полученные данные свидетельствуют о том, что контрольных полевок углеводный обмен в целом протекает спокойно и находится в состоянии определенного оптимального свойства данному виду в разные фазы популяционного цикла.

В отношении другого показателя - концентрации сахара в плазме крови - можно сказать следующее. У перезимовших самцов контрольного участка самое низкое значение уровня сахара 5,5 мм/л приходится на период депрессии численности (см. рис., А). Годы подъема и максимума их сопровождаются повышением этого показателя до 6,1-6,7 мм/л. У самок содержание сахара в крови (независимо от возраста животных) в период нарастания численности достигает примерно тех же величин. Умеренная гипергликемия (6,3 мм/л) характерна и для перезимовавших самок в пик численности полевок. У неполовозрелых и половозрелых сеголеток отмечено снижение концентрации сахара до 5,9 мм/л и 5,1 мм/л соответственно.

Половозрастная динамика полисахаридных накоплений в клетках белой крови у животных с радиоактивных участков представлена в табл. 3 и 4. Следует сразу отметить, что общее содержание гликогена в клетках белой крови этих животных было ниже, чем в контроле. Так, самые высокие его концентрации отмечены у половозрелых сеголеток-самцов - 4,61 балла в пик численности и у половозрелых сеголеток-самок - 4,45 балла.

Данные по содержанию сахара в крови полевок с опытного участка (рис., Б) показывают, что динамика его колебаний в зависимости от пола, возраста и фазы численности аналогична таковой в контроле. Минимальные его концен-

Содержание и распределение гликогена в лейкоцитах опытных самцов в разные фазы популяционного цикла

Фаза популяционного цикла	п	Кол-во проанализированных клеток	Распределение клеток по группам, % к общему числу клеток			Содержание гликогена, усл.ед. "К"	
			Р <sub>1</sub> $\bar{x} \pm m_x$	Р <sub>2</sub> $\bar{x} \pm m_x$	Р <sub>3</sub> $\bar{x} \pm m_x$		Р <sub>4</sub> $\bar{x} \pm m_x$
Депрессия	6	600	6,4 ± 0,4	40,2 ± 0,4	42,1 ± 0,4	11,3 ± 0,3	4,31
	3	300	10,8 ± 0,3	37,5 ± 0,5	41,5 ± 0,2	10,2 ± 0,3	4,57
	30	3000	6,6 ± 0,2	40,3 ± 0,2	41,7 ± 0,4	11,4 ± 0,2	4,33
Подъем	6	600	9,7 ± 0,4	37,7 ± 0,4	42,0 ± 0,6	10,7 ± 0,2	4,49
	4	400	6,8 ± 0,5	39,7 ± 0,4	42,6 ± 0,1	10,9 ± 0,6	4,61
Пик	11	1100	7,8 ± 0,3	41,4 ± 0,4	40,7 ± 0,3	10,1 ± 0,2	4,43
	5	500	8,9 ± 0,9	38,9 ± 0,4	41,6 ± 0,3	10,6 ± 0,3	4,47
Пик	4	400	5,8 ± 0,5	40,2 ± 0,6	43,7 ± 0,6	10,3 ± 0,4	4,30
Неполовозрелые							
Половозрелые сеголетки							
Перезимовавшие							

Примечание. Обозначения см. в табл. 1.

Содержание и распределение гликогена в лейкоцитах опытных самок в разные фазы популяционного цикла

Фаза популяционного цикла	n	Кол-во проана-лизиро-ванных клеток	Распределение клеток по группам, % к общему числу клеток				Содержание гликогена, усл.ед. "К"
			P1 $\bar{x} \pm m_x$	P2 $\bar{x} \pm m_x$	P3 $\bar{x} \pm m_x$	P4 $\bar{x} \pm m_x$	

Неполовозрелые сеголетки

Депрессия	4	400	6,0 ± 0,4	39,9 ± 0,5	42,3 ± 0,7	11,8 ± 0,6	4,26
Пик	17	1700	5,3 ± 0,2	40,0 ± 0,3	43,0 ± 0,3	11,7 ± 0,3	4,29

Половозрелые сеголетки

Подъем	2	200	9,0 ± 1,2	37,9 ± 0,7	42,6 ± 0,6	10,5 ± 0,4	4,45
Пик	7	700	7,0 ± 0,2	40,7 ± 0,5	41,3 ± 0,4	11,0 ± 0,4	4,38

Перезимовавшие

Депрессия	3	300	6,3 ± 0,3	40,9 ± 0,7	42,9 ± 0,2	9,8 ± 0,5	4,37
Подъем	2	200	8,3 ± 0,7	38,5 ± 0,7	42,8 ± 0,2	10,4 ± 0,2	4,42
Пик	8	800	5,2 ± 0,3	40,4 ± 0,4	43,4 ± 0,4	11,0 ± 0,5	4,25

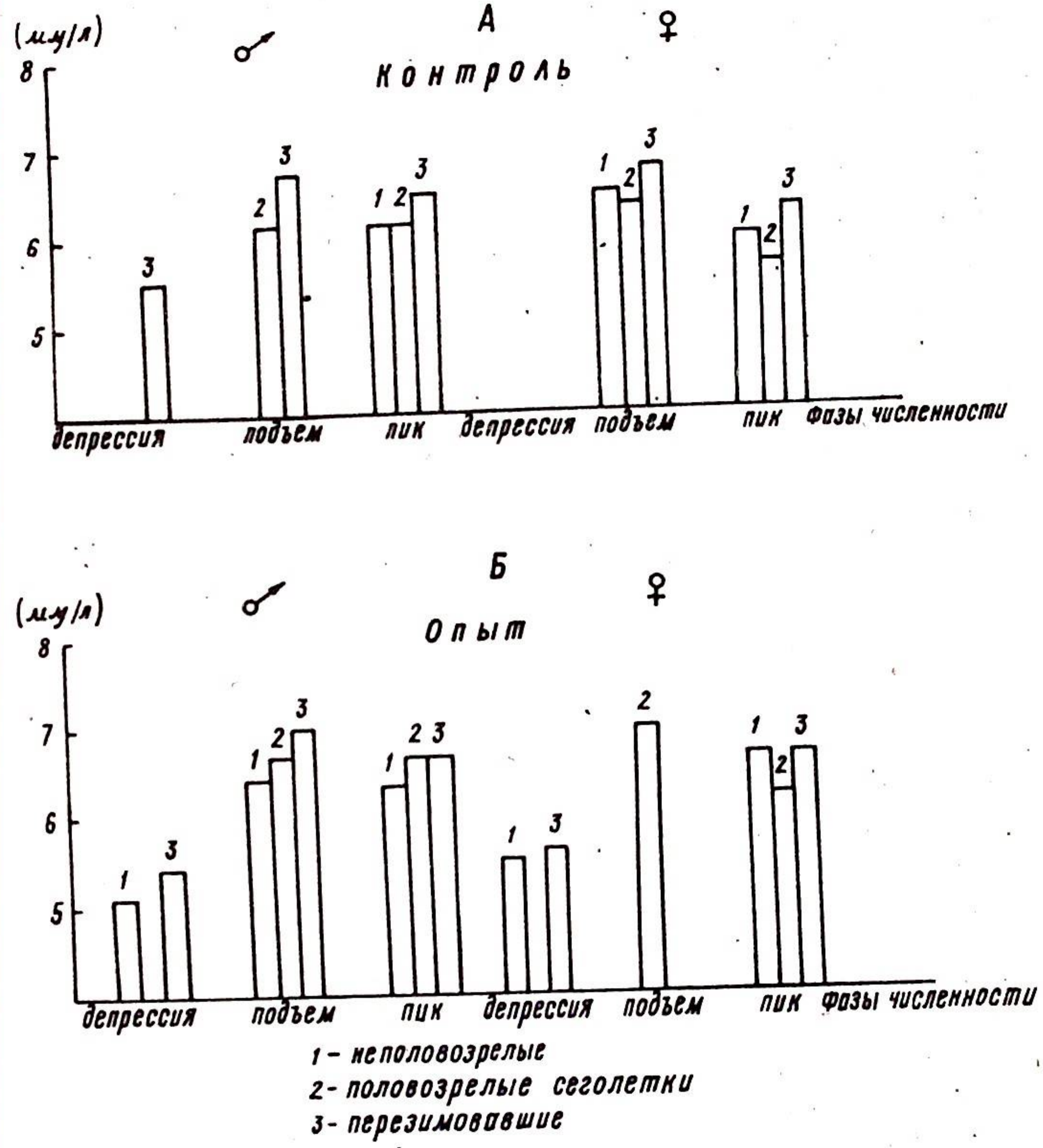


Рис. Динамика изменений концентрации сахара в крови у полевок-экономок в разные фазы популяционного цикла. А - животные с контрольного, Б - с опытного участков.

трации - 5,1-5,6 (мг/л) - свойственны животным в период низкой численности. В другие фазы популяционного цикла отмечена умеренная гипергликемия, когда уровень углеводов возрастал до 6,8-6,9 (мг/л).

Сопоставление групп полевок с контрольного и опытно-го участков по содержанию у них гликогена в лейкоцитах

и сахара в плазме крови показало, что между животными этих групп существуют различия в углеводном метаболизме. Учитывая имеющиеся в литературе данные [2, 7, 12] о наличии связи между исследованными биохимическими показателями, с одной стороны, и уровнем радиочувствительности животных, с другой, представляется возможным использовать эти показатели для прогнозирования радиочувствительности полевок-экономок.

Как видно из материалов табл. 1 и 2, для контрольных полевок характерно более высокое содержание гликогена в клетках белой крови, чем для животных с радиоактивным участком. Это дает основание предполагать их более высокую устойчивость к радиационному воздействию. Однако устойчивость, по-видимому, будет меняться в зависимости от фаз популяционного цикла. Наибольшую радиорезистентность организма полевок следует ожидать в период подъема численности, совпадающего с максимальным уровнем гликогена в клетках крови. Среди самцов будут половозрелые сеголетки, у которых "К" = 5,06 баллам, а среди самок — еще и неполовозрелые особи, уровень гликогена у которых составил 5,03 балла. Несмотря на то, что организм животных с радиоактивных участков в целом более радиочувствителен по сравнению с контролем, их устойчивость к облучению будет также наибольшей в период подъема численности, о чем можно судить по возрастанию уровня гликогена в лейкоцитах (табл. 3 и 4).

Следует отметить, что ранее проведенные гистоморфологические исследования органов и тканей полевок с этих участков свидетельствуют также в пользу более высокой радиочувствительности организма животных с радиоактивных территорий [8, 9].

Подводя итог проведенным исследованиям, можно сделать заключение, что использованный в нашей работе показатель — уровень содержания гликогена в клетках белой крови — может служить критерием оценки природной радиочувствительности диких видов мышевидных грызунов. Показатель уровня содержания сахара в плазме крови — оказался менее информативным для этой цели.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Граевская Б.М. О природе действия ионизирующей радиации на некоторые метаболические процессы млекопитающих // Экспериментальные работы по влиянию ионизирующих излучений на организм. — М.: Наука, 1967. — С.102-108.
2. Граевская Б.М. Биохимические особенности и их связь с радиочувствительностью млекопитающих // Радиоэкология позвоночных животных. — М.: Наука, 1978. — С.200-212.
3. Иваненко Г.Ф., Граевская Б.М. Связь содержания гликогена в лейкоцитах периферической крови мышьяковых линий с их радиочувствительностью // Радиобиология. — 1977. — Т.ХУП. — Вып.5. — С.780-783.
4. Обмен веществ при лучевой болезни / И.И.Иванов, С.Балабуха, Е.Ф.Романцев, Т.А.Федорова. — М.: Медгиз, 1956. — 251 с.
5. Истаманова Т.С., Алмазов В.А., Канаев С.В. Функциональная гематология. — Л.: Медицина, 1973. — 311 с.
6. Лакин Г.Ф. Биометрия. — М.: Высшая школа, 1980, — 290 с.
7. Мажейките Р.Б. Результаты изучения радиочувствительности животных // Радиоэкология позвоночных животных. — М.: Наука, 1978. — С.171-182.
8. Маслова К.И. Влияние экологического фактора повышенной естественной радиоактивности на организм мышевидных грызунов // Радиоэкология позвоночных животных. — М.: Наука, 1978. — С.33-59.
9. Материй Л.Д., Маслова К.И. Состояние организма и популяции полевок-экономок, обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности // Информационный бюллетень / Науч. совет АН СССР по проблемам радиобиологии. — М., 1983. — С.41-44.
10. Маянский А.Н., Галлиулин А.Н. Реактивность нейтрофилов. — Казань: Изд-во Казанского ун-та, 1984. — 158 с.
11. Исследование радиочувствительности популяций диких видов мелких грызунов, обитающих на участках с повышенным уровнем ионизирующей радиации / Г.В.Нижник, Р.Б. Мажейките, А.И.Ильенко, И.А.Рябцев // Радиоэкология позвоночных животных. — М.: Наука, 1978. — С.183-194.

12. Нуждин Н.И., Граевская Б.М. Биохимические особенности и радиочувствительность разных видов и классов млекопитающих // Действие ионизирующих излучений на растительный и животный организм. - М.:Наука, 1965. - С. 135. (Тр./АН СССР, Ин-т генетики, вып.32).

13. Определение сахара в биологических жидкостях по цветной реакции с Орто-толлуидином. Методические указания / Под. ред. В.В.Меньшикова. - М., 1983. - 7 с.

14. Шабадаш А.Л. Рациональная методика гистохимического обнаружения гликогена и ее теоретическое обоснование // Изв. АН СССР. Сер. биол. наук. 1947. - №6. С.745-765.

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ  
НА ОСТРОЕ ОБЛУЧЕНИЕ  
В РАЗЛИЧНЫХ ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННЫХ ГРУППАХ  
КРАСНОЙ ПОЛЕВКИ

А.И.Кичигин

Радиобиологические эксперименты на лабораторных животных имеют большую историю. В них изучено модифицирующее действие на радиочувствительность огромного количества как внешних, так и внутренних по отношению к организму факторов. Естественно, что этот материал следует использовать в радиозоологических исследованиях. Но прямой перенос на животных природных популяций закономерностей развития постлучевых процессов, выявленных на лабораторных животных, по-видимому, невозможен. Это связано с тем, что в естественных условиях на радиочувствительность может действовать ряд внутрипопуляционных факторов, которые не воспроизводятся при клеточном или вольерном содержании. К таким факторам следует отнести сложность возрастной структуры природных популяций.

В любой популяции мышевидных грызунов можно выделить две группы особей: короткоживущих, отличающихся ранним вступлением в размножение, и долгоживущих, половое созревание которых сильно отсрочено. Если рассматривать популяцию в какой-либо отрезок периода размножения, то в ней можно выделить три группы, которые несут различную функциональную нагрузку. Г.В.Оленев [5] предложил назвать их физиологическими функциональными группами (ФФГ): I ФФГ - перезимовавшие, активно размножающиеся животные (к появлению снежного покрова они погибают); II ФФГ - неполовозрелые сеголетки, которым предстоит зимовка и участие в размножении в следующем году (при этом они превращаются в I ФФГ), и III ФФГ - активно раз-

множающиеся сеголетки (осенью, как I ФФГ, они исчезают из популяции). В дальнейшем полевок II ФФГ для удобства мы будем называть просто неполовозрелыми сеголетками, хотя такое определение не совсем точно.

Физиологически эти группы разнокачественны. Действительно: возраст особей II и III ФФГ примерно одинаков, полевки III ФФГ половозрелы, тогда как II ФФГ еще нет. II и III ФФГ одинаково активны в размножении, однако до вступления в половую зрелость прошло много месяцев, тогда как животные III ФФГ вступают в размножение в возрасте 1,5-2 мес. Поэтому есть основание полагать, что животные разных физиологических функциональных групп различаются по радиочувствительности.

Проверка этого предположения была целью настоящей работы.

### Материал и методика

Исследования проведены на красной полевке (*Clethrionomys rutilus* Pall.), отловленной в Коми АССР в зоне средней тайги. Отлов проводили в мае, июле и сентябре 1985 г. Через 2-3 недели после отлова полевок подвергли гамма-облучению в дозе 5 Гр при мощности дозы 0,087 Гр/с. Часть полевок использовали в качестве контроля.

У каждой полевки до облучения и на 5-е, 10-е и 15-е сутки после лучевого воздействия из кончика хвоста брали примерно 0,1 мл крови. Камерно-меланжерным методом определяли количество лейкоцитов и эритроцитов. В мазках периферической крови подсчитывали количество ретикулоцитов. Такая схема эксперимента позволила проанализировать пострadiационную динамику количества лейкоцитов, эритроцитов и ретикулоцитов каждой полевки. Гематологические показатели в сообщении представлены без учета пола, так как статистический анализ не выявил различий по полу в реакции периферической крови на облучение.

На 15-е сутки животных забивали, определяли относительный вес некоторых органов (сердца, легких, печени, селезенки, тимуса, надпочечников, почек и семенников) и возраст (по форме нижней коренной поверхности второго верхнего коренного зуба - M<sup>2</sup>). По этим данным определяли принадлежность каждой особи к той или иной физиологической функциональной группе.

Эксперименты на лабораторных животных показали, что одним из характерных симптомов лучевой болезни является снижение количества лейкоцитов в периферической крови [3, 4]. При облучении в сублетальных дозах динамика этого показателя такова: начавшееся в первые сутки пострadiационного периода снижение числа лейкоцитов достигает максимума примерно на четвертые-шестые сутки, после чего количество клеток белой крови постепенно увеличивается и приходит в норму примерно к 30-м суткам. В начале восстановления обычно наблюдают абортный подъем - кратковременное увеличение числа лейкоцитов.

В настоящем исследовании, несмотря на значительные интервалы между взятием крови, мы наблюдали все эти проявления лучевой болезни (таблица). Нам удалось обнаружить некоторые различия в реакции на облучение полевок различных физиологических функциональных групп. Так, у неполовозрелых сеголеток (II ФФГ) число лейкоцитов на пятые сутки достигло 31,8% первоначального уровня, тогда как у половозрелых (I и III ФФГ) - 44,2%.

Динамика числа лейкоцитов в пострadiационный период у полевок различных физиологических функциональных групп (ФФГ)

ФФГ	Исследовано особей, шт	Количество лейкоцитов, тыс/МКЛ			
		До облучения	После облучения		
			через 5 сут.	через 10 сут.	через 15 сут.
I ФФГ	14	4,3±0,40	1,9±0,19	1,8±0,18	2,0±0,24
II ФФГ	12	4,4±0,61	1,4±0,17	2,1±0,33	2,0±0,45
III ФФГ	5	5,2±1,47	2,3±0,32	3,9±0,58	2,3±0,75

Так как количество лейкоцитов до облучения у полевок всех трех ФФГ не различалось, мы сочли целесообразным сравнить эти показатели выраженными в абсолютных величинах. У неполовозрелых полевок число лейкоцитов на

пятые сутки после облучения было достоверно ниже, чем полевок других ФФГ (табл.). У половозрелых сеголеток 10-е сутки наблюдали abortивный подъем. Возможно, он был и у полевок других физиологических функциональных групп, но продолжительность подъема мала, и при пятисуточном интервале между взятиями крови его можно не заметить. На 15-е сутки уровень лейкоцитов у полевок всех ФФГ был практически одинаков.

Степень лейкопении, наблюдаемой при остром облучении отражает сложное взаимодействие деструктивных и восстановительных процессов в облученном организме и поэтому часто используется как интегральный показатель радиочувствительности. Если принять за показатель тяжести лучевого поражения число лейкоцитов, то можно предположить, что неполовозрелые сеголетки красной полевки наиболее радиочувствительны.

В настоящее время общепризнано, что в кроветворной ткани наиболее поражаемым является эритроидный росток. Но при облучении в сублетальных дозах снижения количества эритроцитов в периферической крови не происходит, так как восстановление эритроидной ткани начинается на ранних стадиях постлучевого синдрома [3]. Действительно, неполовозрелых полевок число эритроцитов в наблюдаемый период было практически неизменным и не отличалось от контроля (см. рисунок). Однако у половозрелых полевок обнаружили два типа реакции. У части животных не было обнаружено значительных сдвигов в количестве эритроцитов (рис., а), а у других зверьков на пятые сутки этот показатель снижался почти наполовину (рис., б). Следует отметить, что до облучения эти полевки внешне были совершенно здоровы, после забоя не найдено корреляции между типом реакции красной полевки и относительным весом органов. В поисках причин наблюдаемой анемии мы изучили динамику количества ретикулоцитов в периферической крови, которая отражает динамику эритропоэза. Обнаружено, что у полевок с неизменным количеством эритроцитов в пострadiационный период имела место ретикулопения. Такая реакция крови хорошо согласуется с данными литературы [3] и укладывается в общепринятую схему: радиационное угнетение эритроидного ростка ведет к прекращению поступления в кровь ретикулоцитов, а созревание циркулирующих ретикулоцитов, в свою очередь, — к снижению количества ретикулоцитов в крови. Однако у полевок с пострadiационным периодом у полевок различных физиологических функциональных групп (ФФГ).  
Сплошная линия — 5Гр, пунктирная — без облучения.

число эритроцитов  
млн/мкл)

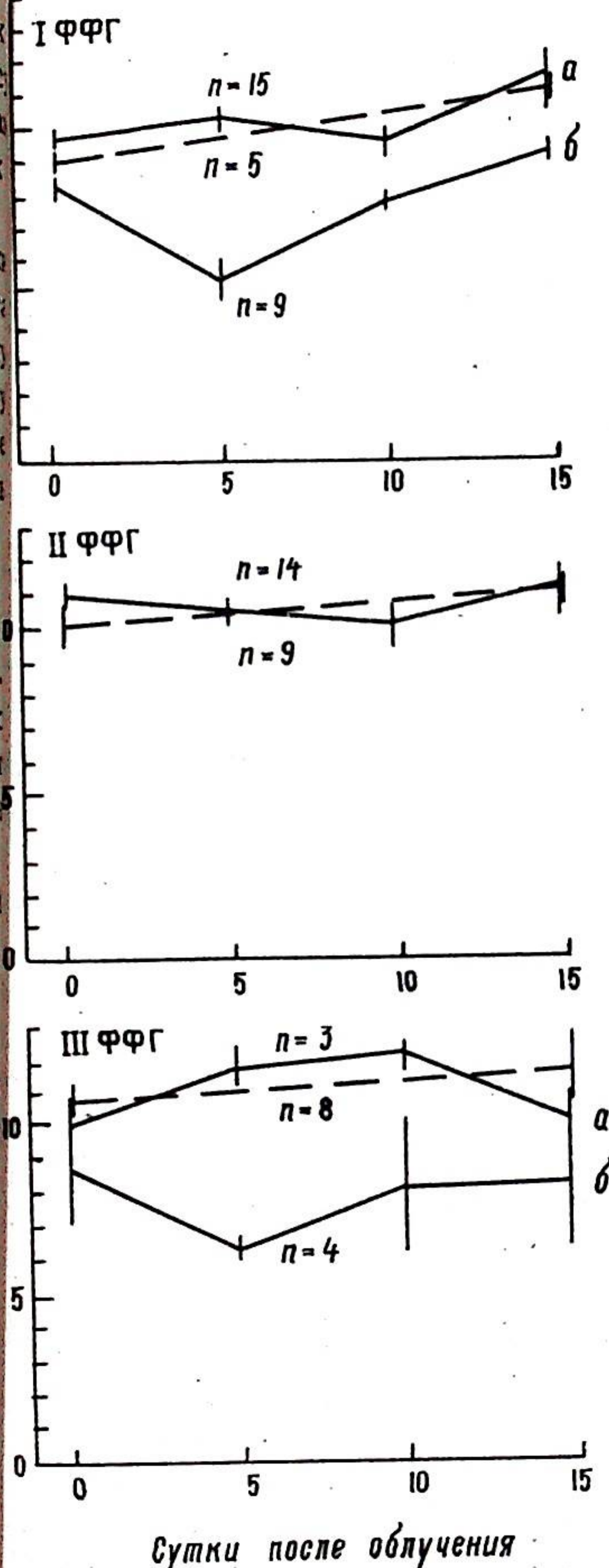


Рис. Динамика числа эритроцитов в пострadiационный период у полевок различных физиологических функциональных групп (ФФГ). Сплошная линия — 5Гр, пунктирная — без облучения.

диационной анемией в большинстве случаев наблюдали увеличение количества ретикулоцитов, т.е. в ответ на дефицит клеток красной крови имела место активация эритропоэза. По-видимому, при дозе 5 Гр у красной полевки стимуляция анемией эритроидного ростка кроветворных тканей "перекрывает" угнетающее действие радиации. Поэтому причиной наблюдаемой анемии может быть не угнетение эритропоэза, а потеря эритроцитов в циркулирующей крови. Это может произойти вследствие внутренних кровоизлияний и гемолиза [2, 7]. Проверить эти предположения мы, однако, не имели возможности.

#### Выводы

Анализ динамики количества лейкоцитов периферической крови красной полевки после острого облучения в сублетальной дозе (5 Гр) позволяет предположить, что в природных популяциях этого вида неполовозрелые сеголетки наиболее радиочувствительны.

У половозрелых полевок, как перезимовавших, так и сеголеток, обнаружена разнокачественность реакции красной крови на острое облучение дозой 5 Гр. У

части особей наблюдали угнетение эритроидного ростка кроветворных тканей, не повлиявшее на количество циркулирующих эритроцитов. У другой части особей развилась пострadiационная анемия, вызвавшая стимуляцию эритропоэза.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Белоусова О.И., Горизонтов П.Д., Федорова М.И. Радиация и система крови (к проблеме радиочувствительности в условиях внешнего облучения). - М.: Атомиздат, 1979. - 128 с.
2. Воробьев Е.И., Степанов Р.П. Ионизирующее излучение и кровеносные сосуды. - М.: Энергоатомиздат, 1985. - 296 с.
3. Груздев Г.П. Проблема поражения кроветворной ткани при острой лучевой патологии. - М.: Медицина, 1969. - 139 с.
4. Егоров А.П., Бочкарев В.В. Кроветворение и ионизирующая радиация. - М.: Гос.изд-во мед. лит-ры, 1955. - 256 с.
5. Оленев Г.В. Особенности возрастной структуры ее изменения и их роль в динамике численности некоторых видов грызунов (на примере рыжей полевки) // Динамика популяционной структуры млекопитающих и амфибий. - Свердловск: Изд-во УНЦ АН СССР, 1982. - С.9-22.
6. Чередование поколений и продолжительность жизни грызунов / С.С.Шварц, В.Г.Ищенко, Н.А.Овчинникова и др. // Журн. общ. биологии. - 1964. - Т.25. - №6. - С.417-424.
7. Шитикова М.Г. К вопросу о гемолизе эритроцитов при лучевой болезни // Медицинская радиология. - 1964. - Т.8. - №10. - С.20-25.

#### РОЛЬ ТИОЛОВ И ДЕГИДРОГЕНАЗ В РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ MICROTUS OECONOMUS PALL.

А.Г.Кудяшева

Исследования природных популяций полевки-экономки в догеоценозах с повышенной естественной радиоактивностью показали, что эти популяции подвергаются воздействию радиации не только от внешних, но и от внутренних источников, в основном являющихся  $\alpha$ -излучателями естественного происхождения. Несмотря на то, что испытываемые ими дозовые нагрузки сравнительно невелики, они в состоянии вызывать у этого вида мышевидных грызунов стресс-реакцию [10], которая проявляется как на гистоморфологическом [11], так и на биохимическом уровнях [6]. Сегодня нет возможности ответить на вопрос, каковы последствия этого стресса, вызванного лучевым воздействием: способствует ли он повышению радиорезистентности популяции или, напротив, ведет к возрастанию радиочувствительности составляющих ее особей.

Радиочувствительность организма складывается из многих параметров. В последнее время оценку радиочувствительности природных популяций животных ведут, используя прием дополнительного облучения животных и расчета средней дозы D50/30. Однако такой подход к определению радиочувствительности более приемлем для экспериментальных животных, чем для природных популяций. На основании гистоморфологического и цитоморфологического анализов отдельных органов и систем у полевок-экономок разного возраста, обитающих на участках с естественной радиоактивностью, рядом авторов [9, 12] показано, что радиопоражаемость выражена сильнее у полевок в возрасте от одного до двух месяцев, т.е. в период роста зверьков. В период зрелости (три месяца) и в момент старения деструктивный характер

изменений сменяется защитной реакцией организма. Авторы приходят к заключению, что более радиочувствительной оказывается растущая часть популяции [9]. Выявленные возрастные различия в радиопоражаемости полевок наводят на мысль, что средние значения LD<sub>50/30</sub> не будут полностью отражать истинной картины радиочувствительности сравниваемых популяций. Следует отметить, что роль возраста в радиочувствительности различных видов млекопитающих слабо отражена в литературе, хотя в медицинской практике хорошо известно, что молодой, растущий организм более радиочувствителен, чем взрослый.

Настоящая работа предпринята с целью определения радиочувствительности различных возрастных групп полевок природных популяций. Были использованы такие биохимические критерии оценки радиочувствительности, как уровень содержания в отдельных органах тиолов и активность гидрогеназ.

О том, что SH-группы, которым принадлежит существенная роль в самых различных сторонах жизнедеятельности организма и клетки, имеют прямое отношение к радиочувствительности организма, известно давно [1, 2]. Что касается роли дегидрогеназ, то есть сведения, что сложные полиферментные комплексы пируват- и сукцинатдегидрогеназы относятся к наиболее чувствительным к излучению системам клетки [16]. Это позволяет использовать их в качестве одного из биохимических критериев при оценке радиочувствительности организма.

#### Материал и методы

Исследовали 250 полевок-экономок, обитающих в естественных условиях на участках с повышенным в 50-100 раз нормальным гамма-фоном. Зверьки отлавливались в июле-агусте с 1978 по 1984 гг. Характеристика радиационной обстановки в местах отлова дана в работе [6]. Полевок отлавливали живоловушками, выдерживали в течение суток в изоляторе, после чего декапитировали. На основании комплексной оценки возраста и половозрелости были выделены три группы полевок: 1) сеголетки неполовозрелые, 2) половозрелые, 3) перезимовавшие. Одновременно для сравнения исследовалась группа белых беспородных мышей того же возраста.

Животные подвергались острому гамма-облучению с помощью облучательной установки "Исследователь" в дозах 2,5 (белые мыши) и 6 Гр (полевки-экономки) при мощности дозы 2,5 Гр/мин.

Содержание сульфгидрильных групп определяли в гомогенатах печени спектрофотометрическим методом Элмана [17] с модификацией Седлока [18] с применением реактива 5,5-дитиобис (2-нитробензойная кислота) (ДТНБ). Количество тиолов, белковых и небелковых SH-групп выражали в микромолях на 1 мг сырой ткани.

Активность сукцинатдегидрогеназы (СДГ),  $\alpha$ -кетоглутаратдегидрогеназы ( $\alpha$ -КДГ), пируватдегидрогеназы (ПДГ) и лактатдегидрогеназы (ЛДГ) определяли в гомогенатах тканей (головной мозг, печень, сердечная мышца). Методы определения удельной активности дегидрогеназ приведены в работе [4]. Активность СДГ,  $\alpha$ -КДГ, ПДГ выражали в мкг образовавшегося трифенилформазана на 1 мг белка, активность ЛДГ - мкг пировиноградной кислоты на 1 мг белка. Достоверность анализов двухкратная. Полученные данные обработаны методами вариационной статистики.

#### Результаты и обсуждение

Как показали эксперименты на белых беспородных мышях одного возраста (половозрелые, возраст три месяца), после разового действия гамма-облучения в дозе 2,5 Гр в печени зверьков снижается содержание не только тиолов, но и активность  $\alpha$ -кетоглутаратдегидрогеназы и сукцинатдегидрогеназы (табл.1). Сходную картину изменений обнаружили в головном мозге половозрелых полевок-экономок после гамма-облучения дозой в 6 Гр. Установлено, что с увеличением дозы облучения процесс снижения активности дегидрогеназ протекал у полевок значительно сильнее ( $\alpha$ -КДГ на 85%, СДГ - на 57%, ПДГ - на 40%). Снижение активности SH-групп как у белых мышей, так и у полевок-экономок проходило с одинаковой скоростью, что свидетельствует о неслучайности этого явления. Наблюдаемое уменьшение количества тиолов в печени белых мышей и головном мозге полевок-экономок после острого  $\gamma$ -облучения, судя по высказыванию некоторых авторов, связано с угнетением тиоловых ферментов [14, 15].

Результаты анализа содержания сульфгидрильных групп в печени полевок-экономок контрольного и опытного участков

Таблица

Активность дегидрогеназ (мкг формазана/1мг белка)  
и содержание тиолов ( $n \cdot 10^{-6}$  моль/мг ткани)  
в тканях половозрелых белых мышей  
и полевок-экономок  
после действия острого гамма-облучения  
(анализ на 10-11 сутки)

Исследуемые показатели	Белые мыши* 8 экз.		Полевки-экономки 10 экз.	
	$\bar{X} \pm m$	% к конт-ролю	$\bar{X} \pm m$	% к конт-ролю
	Печень		Головной мозг	
$\alpha$ -КДГ	12,3 $\pm$ 3,83	82	17,5 $\pm$ 1,19	100
СДГ	30,9 $\pm$ 5,47	80	54,6 $\pm$ 1,61	40
ПДГ	50,1 $\pm$ 5,39	100	71,1 $\pm$ 3,70	60
Общие SH-группы	2,72 $\pm$ 0,13	83	2,09 $\pm$ 0,20	70
Небелковые SH-группы	1,07 $\pm$ 0,06	90	1,60 $\pm$ 0,16	90
Белковые S-группы	1,64 $\pm$ 0,09	78	0,68 $\pm$ 0,43	60

\*доза облучения 2,5 Гр; \*\*доза облучения 6 Гр.

природных популяций представлены в табл.2. Из них следует, что в печени полевок опытного участка, как у половозрелых, так и перезимовавших, количество общих сульфгидрильных групп несколько ниже, чем у контрольных животных ( $P \leq 0,01$ ). Одновременно установлено, что содержание общих сульфгидрильных групп в печени полевок контрольного и опытного участков как у молодых, так и у старых животных находится на одном уровне. Необходимо отметить, что содержание небелковых сульфгидрильных групп значительно ниже в печени у неполовозрелых полевок опытного участка, чем у перезимовавших зверьков (1,0 $\pm$ 0,10 у молодых, 1,50 $\pm$ 0,10 у старых животных). Эти данные частично согласуются с литературными в том, что наименьший уровень тиолов лабораторные линейные мыши имеют в месячном возрасте [3]. У животных более старшего возраста

Содержание тиолов в печени полевок-экономок контрольного и опытного участков,  $n \cdot 10^{-6}$  моль/1 мг ткани

Возраст животных	Статистический показатель	Контрольный участок				Опытный участок			
		Общие SH-группы	Небелковые SH-группы	Белковые SH-группы	Общие SH-группы	Небелковые SH-группы	Белковые SH-группы	Общие SH-группы	
Неполовозрелые (1 - 2 мес.)	$\bar{X}$	3,22(14)	1,43	1,80	3,02(9)	1,03	1,99	3,02(9)	
	m	0,03	0,02	0,08	0,48	0,10	0,27	0,48	
Перезимовавшие старше года	$\bar{X}$	3,11(11)	1,47	1,64	2,89(9)	1,50	1,39	2,89(9)	
	m	0,13	0,13	0,11	0,07	0,10	0,25	0,07	
Неполовозрелые (1 поколение, виварий, 1-2мес.)	$\bar{X}$				3,27(14)	1,48	1,79	3,27(14)	
	m				0,14	0,19	0,17	0,14	
Половозрелые (1 поколение, виварий, 3-4 мес.)	$\bar{X}$				3,84(9)	1,55	2,07	3,84(9)	
	m				0,52	0,03	0,39	0,52	

Примечание.  $\bar{X}$  - среднее арифметическое, m - ошибка среднего, в скобках - количество исследованных животных.

та (40-60 дней) авторы наблюдали повышенный уровень белковых и небелковых тиолов. Высокий уровень тиолов они связывают с появлением в печени клеток с более высоким содержанием тиолов, отсутствующих у животных месячного возраста.

Данные литературы о природе тиолов, ответственных за уровень естественной радиочувствительности клетки и всего организма, разноречивы. Существуют различные точки зрения по поводу того, уровень каких SH-групп (общих, белковых и небелковых) определяет радиочувствительность организма. Результаты наших экспериментов совпадают с мнением о том, что естественная радиочувствительность животных связана с количеством низкомолекулярных небелковых тиолов [7, 8] в гомогенатах тканей. В их составе находятся отличающиеся по радиочувствительности клеточные элементы. Особенно это хорошо прослеживается на примере у неполовозрелых полевок (табл.2). Так, в печени молодых зверьков опытного участка содержание небелковых тиолов было ниже, чем у полевок этой же возрастной группы контрольного участка ( $P < 0,001$ ). Как известно, отношение уровней небелковых тиоловых соединений к белковым в тканях животных, более устойчивых к действию радиации, выше, чем у менее устойчивых [7]. Вычисленные отношения уровней небелковых SH-групп к белковым SH-группам подтвердили полученные ранее данные о том, что молодые полевки с диетового участка более радиочувствительны, чем животные того же возраста контрольного участка (0,52 у опытных и 0,79 у контрольных).

На основании биохимического анализа установлено, что у полевок, отловленных на участке с повышенным фоном радиоактивности и длительно содержащихся в условиях вивария (первое поколение животных), отмечена тенденция к увеличению в печени уровня общих и небелковых SH-групп по сравнению с контролем (табл.2).

Инактивацию тиоловых ферментов вследствие окисления SH-групп, вызванную действием ионизирующей радиации, можно отнести к важным процессам, ответственным за повреждение и гибель облученной клетки [14, 15]. Наши исследования активности тиоловых ферментов в тканях полевок-экономок, к которым можно отнести дегидрогеназы цикла Кребса и гликолиза, в какой-то мере подтверждают эти данные [5, 6]. Установлено (табл.3), что в печени

Активность сукцинат-, пируватдегидрогеназ (мкг формазана на 1 мг белка) и лактатдегидрогеназы (мкг пировиноградной кислоты на 1 мг белка) в печени неполовозрелых полевок-экономок контрольного и опытного участков

Статистический показатель	Пол животного	Контрольный участок			Опытный участок		
		СДГ	ПДГ	ЛДГ	СДГ	ПДГ	ЛДГ
$\bar{X}$	самки	53,7(7)	100,5	24,2	31,5(9)	72,8	14,8
m		6,61	6,27	3,17	1,81	9,83	0,49
tк - о					11,66***	2,38*	2,92*
$\bar{X}$	самцы	63,0(6)	88,2	16,6	44,1(14)	69,0	14,8
m		8,54	8,62	2,34	1,93	3,87	1,47
tк - о					2,16*	2,04	0,66
$\bar{X}$	самки	50,3	69,5	14,2	36,8(10)	58,3	12,1
m		3,43	5,64	1,04	2,59	2,42	0,37
tк - о					3,15**	1,83	1,95

Примечание.  $\bar{X}$  - среднее арифметическое, m - ошибка среднего,  $t_k$  - критерий Стьюдента. Различия достоверны: \* - при  $P \leq 0,05$ , \*\* - при  $P \leq 0,01$ , \*\*\* - при  $P \leq 0,001$ ; в скобках количество исследованных животных.

неполовозрелых полевок радиового участка происходит снижение активности сукцинат- и пируватдегидрогеназ, что указывает на угнетение процессов дегидрирования. Наблюдается ингибирование процессов дегидрирования, как известно, может происходить за счет снижения содержания тиолов в тканях, что мы и наблюдаем в тканях полевок-экономок [13, 14]. Вероятно, сульфгидрильные группы, принадлежащие дегидрогеназам цикла Кребса, активно участвуют в процессах переноса электронов по дыхательной цепи и тем самым ингибируют реакции дегидрирования в клетках тканей животных.

Полученные данные подтверждают сложившуюся точку зрения на то, что радиочувствительность организма находится в определенной зависимости от соответствующих изменений количества эндогенных тиолов и активности дегидрогеназ, отражающих разные стороны клеточного метаболизма. Обнаружено у молодых полевок-экономок, обитающих на участках повышенной естественной радиоактивности, снижение процессов дегидрирования и содержания низкомолекулярных тиолов свидетельствует об их более высокой радиочувствительности по сравнению с особями зрелого возраста.

Изложенные материалы позволяют считать целесообразным использование показателей уровня тиолов и активности дегидрогеназ цикла Кребса и гликолиза для оценки радиочувствительности природных популяций животных.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Граевская Б.М., Золотарева Н.Н. Некоторые биохимические характеристики метаболизма грызунов, обитающих в разных экологических условиях и их связь с радиочувствительностью // Проблемы и задачи радиэкологии животных. - М.: Наука, 1980. - С.201-211.
2. Граевский Э.Я. Сульфгидрильные группы и радиочувствительность. - М.: Атомиздат, 1969. - 114 с.
3. Донцова Г.В., Смирнова И.Б., Соколова Л.И. Исследование влияния аминоэтилизотиурония и 2-аминоэтилизотиурония на уровень SH-небелковых в клетках костного мозга мшей // Радиобиология. - 1974. - Т.14. - Вып.2. - С.285-289.
4. Кудяшева А.Г., Таскаев А.И. Уровень активности дегидрогеназ в норме и при хроническом действии внешнего  $\gamma$ -облучения у бурундуков // Радиобиология.

84. - Вып.2. - С.230-233.

5. Кудяшева А.Г. Активность дегидрогеназ в тканях полевок-экономок, обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности // Радиэкология биогенеза в условиях повышенной естественной радиоактивности. - Сыктывкар, 1987. - С.37-45. (Тр./АН СССР, Коми фил., вып. 31).

6. Кудяшева А.Г. Активность сукцинат-пируват- и актатдегидрогеназ в тканях (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. - Киев, 1986. - 24 с.

7. Ле Суан Ту, Граевский Э.Я. О корреляции содержания сульфгидрильных групп в кроветворной ткани с радиочувствительностью мшей различных линий в постнатальном развитии // Докл. АН СССР. - 1968. - Т.8. - Вып.2. - С.218-219.

8. Ле Суан Ту. О влиянии цистеамина на радиочувствительность мшей разных линий и содержание небелковых SH-групп в их кроветворной ткани // Радиобиология. - 1969. - Т.9. - Вып.4. - С.630.

9. Маслова К.И. Радиочувствительность таежных грызунов и возможность их приспособления к действию ионизирующей радиации как радиэкологического фактора среды. - Сыктывкар, 1978. - 24 с. (Сер. препринтов "Научн. докл." /АН СССР, Коми фил., Вып.40).

10. Маслова К.И. Повышенная естественная радиоактивность как радиэкологический фактор среды обитания // Радиэкологические исследования почв, растений и животных в биогенезах Севера. - Сыктывкар, 1983. - С.21-30. (Тр./АН СССР, Коми фил., №60).

11. Материй Л.Д., Маслова К.И. Морфологические изменения в кроветворной системе животных, длительно обитающих в условиях повышенной естественной радиоактивности // Радиобиология. Информ. бюлл. - 1977. - Вып.20. - С.107.

12. Материй Л.Д. Цитоморфологическое изучение системы крови у полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях действия повышенных уровней естественной радиоактивности: Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. - Сыктывкар, 1979. - 25 с.

13. Озрина Р.Д., Кондрашова М.Н. Отношение SH-групп к реакциям окисления в дыхательной цепи // Мито-

хондрии. Ферментативные процессы и их регуляция. - М. Наука, 1968. - С.85-89.

14. Пегель В.А., Докшина Г.А., Дементьев Т.А. Изменение содержания сульфгидрильных групп в митохондриях и гиалоплазме печени и сердечной мышцы крысы в результате воздействия излучений высоких энергий // Изв. СО АН Сер.биол.наук. - 1971. - №5. Вып.1. - С.108-112.

15. Савицкий И.В., Мардашко А.А. Состояние лактатдегидрогеназной реакции в мышечной ткани облученных животных // Радиобиология. - 1981. - Т.22 - Вып. - С.390-392.

16. Черкасова Л.С., Пикулев А.Т., Тайц М. Метаболические сдвиги в митохондриях облученного организма, связанные с циклом трикарбоновых кислот. - М. Наука и техника, 1977. - 152 с.

17. Elmán G.L. // Arch. Biochem. and Biophys. 1959. - V.82. - P.70.

18. Sedlak J.R., Lindsay R.H. // Analit. Biochem. - 1968. - V.25. - P.192.

РОЛЬ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЛИПИДОВ  
И ЭНДОГЕННЫХ ТИОЛОВ  
В ОБЕСПЕЧЕНИИ РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТИ ОРГАНИЗМА

Л.Н.Шишкина, Е.Б.Бурлакова

Проблема устойчивости биологических объектов к действию ионизирующей радиации, несмотря на множество исследований, посвященных выявлению факторов, обеспечивающих эту резистентность, все еще остается актуальной. Важное значение приобретает предсказание не только видовой, но и индивидуальной радиочувствительности, поскольку биохимические показатели метаболизма у индивидуумов, даже в пределах одного вида или линии животных, сильно варьируют. Единое же представление о биохимических особенностях клеток и тканей, с различиями которых связаны вариации радиочувствительности, пока отсутствует. В литературе широко обсуждается вопрос о природе биохимического фона повышенной радиорезистентности [14, 28, 33]. Установлено, что радиочувствительность различных биологических объектов коррелирует с такими показателями, как объем хромосом и ядра клетки [40], протеиназная активность периферической крови [17], уровень эндогенных катехоламинов в тканях [18] и биогенных аминов [15], количество фосфолипидов и др. [25]. Весьма обширна литература о роли сульфгидрильных групп в естественной и модифицированной радиочувствительности [9, 11, 16, 19, 20, 21, 24, 27], хотя существуют различные точки зрения по поводу того, уровень каких сульфгидрильных групп (общих, белковых или небелковых) определяет радиочувствительность биологических объектов. Обнаружено, что вариации в радиочувствительности могут быть связаны и с различиями физико-химических свойств липидов клеточных мембран. Важность изучения этого параметра определяется, с одной

	КРЫСЫ	ЗОЛОТЫСТЫЕ ХОМЯКИ	МОРСКИЕ СВИНКИ
СЕЛЕЗЕНКА	●	▲	■
ПЕЧЕНЬ	○	△	□

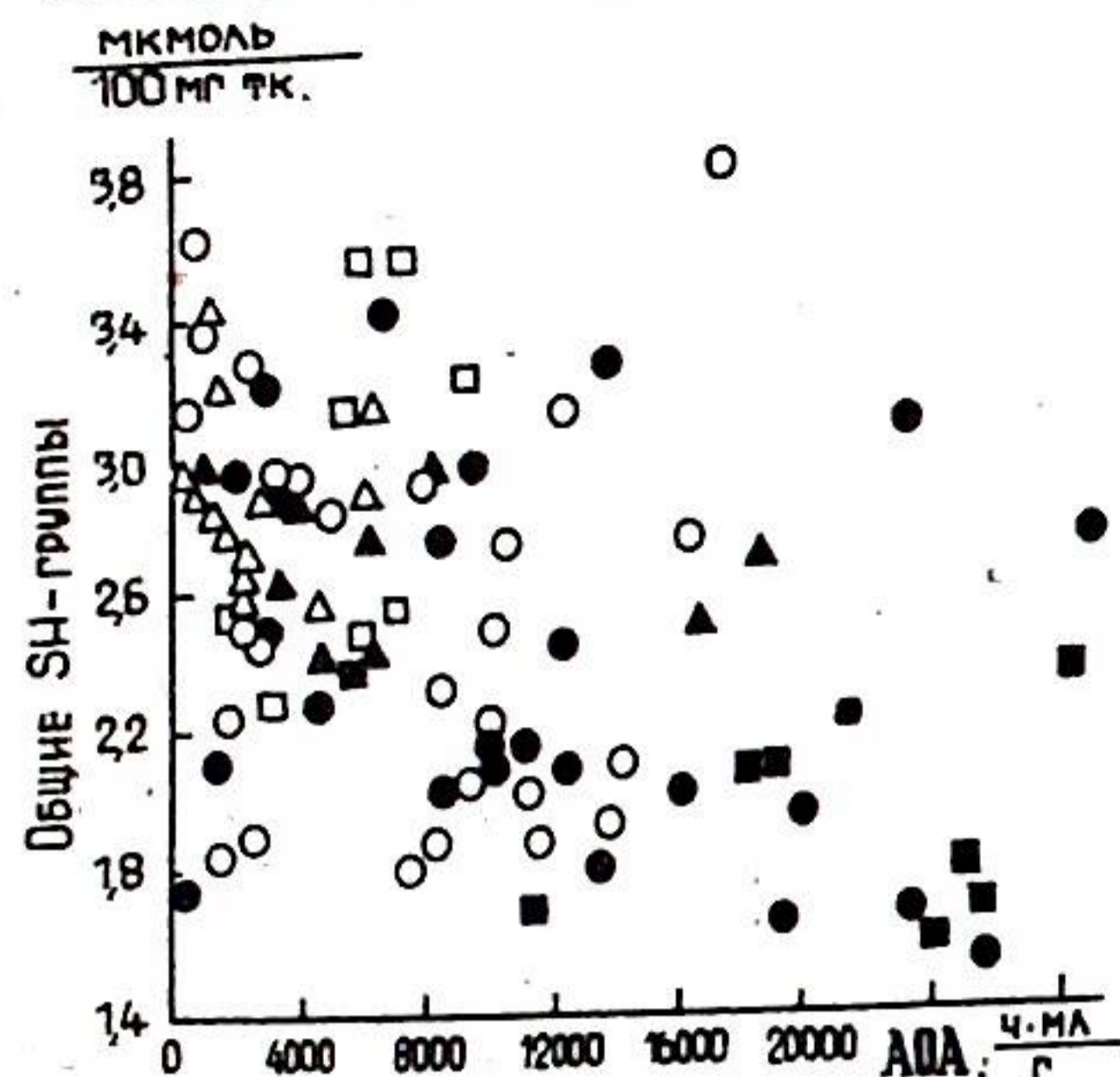


Рис.1

	КРЫСЫ	ЗОЛОТЫСТЫЕ ХОМЯКИ	МОРСКИЕ СВИНКИ
СЕЛЕЗЕНКА	●	▲	■
ПЕЧЕНЬ	○	△	□

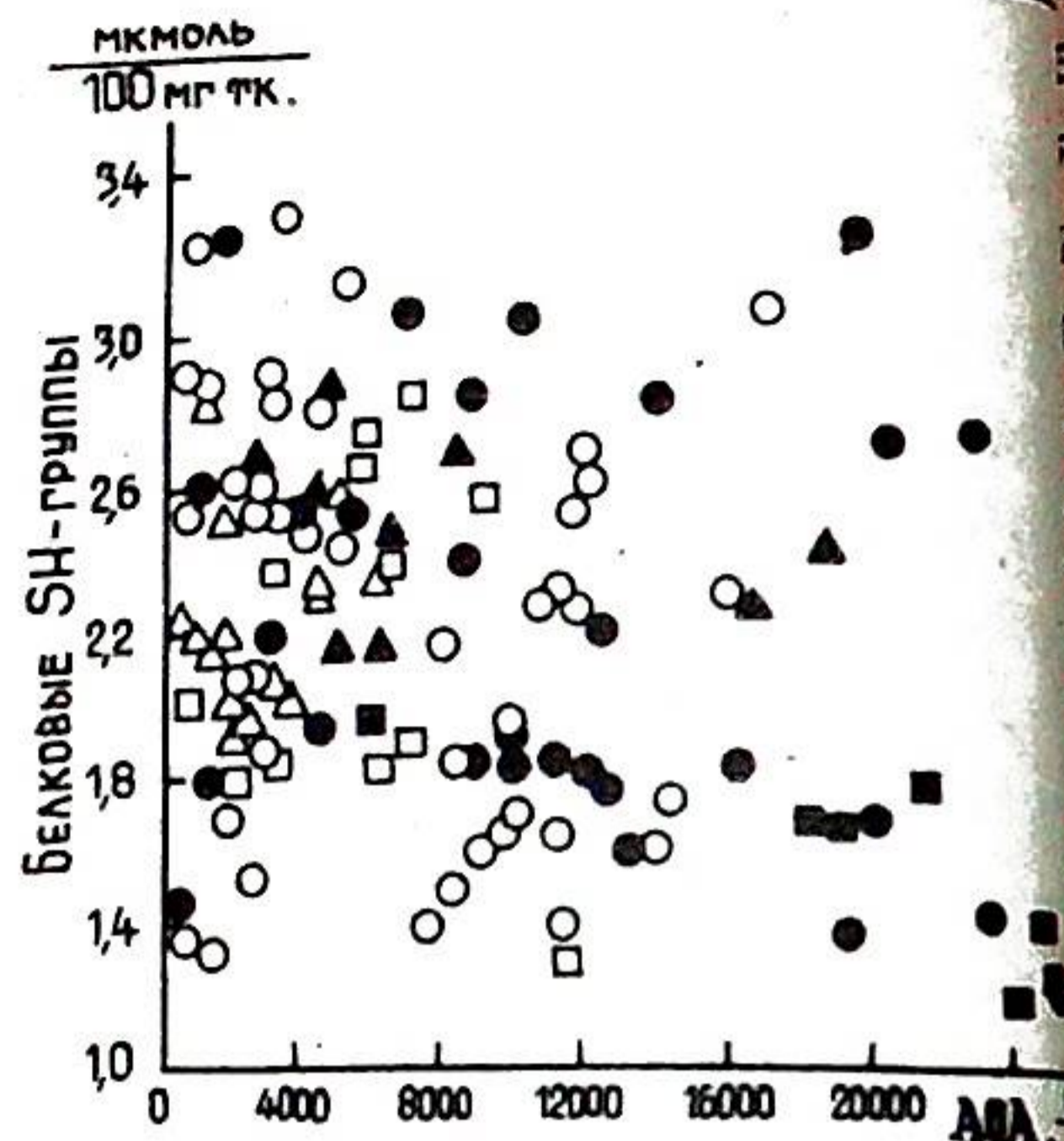


Рис.2

	КРЫСЫ	ЗОЛОТЫСТЫЕ ХОМЯКИ	МОРСКИЕ СВИНКИ
СЕЛЕЗЕНКА	●	▲	■
ПЕЧЕНЬ	○	△	□

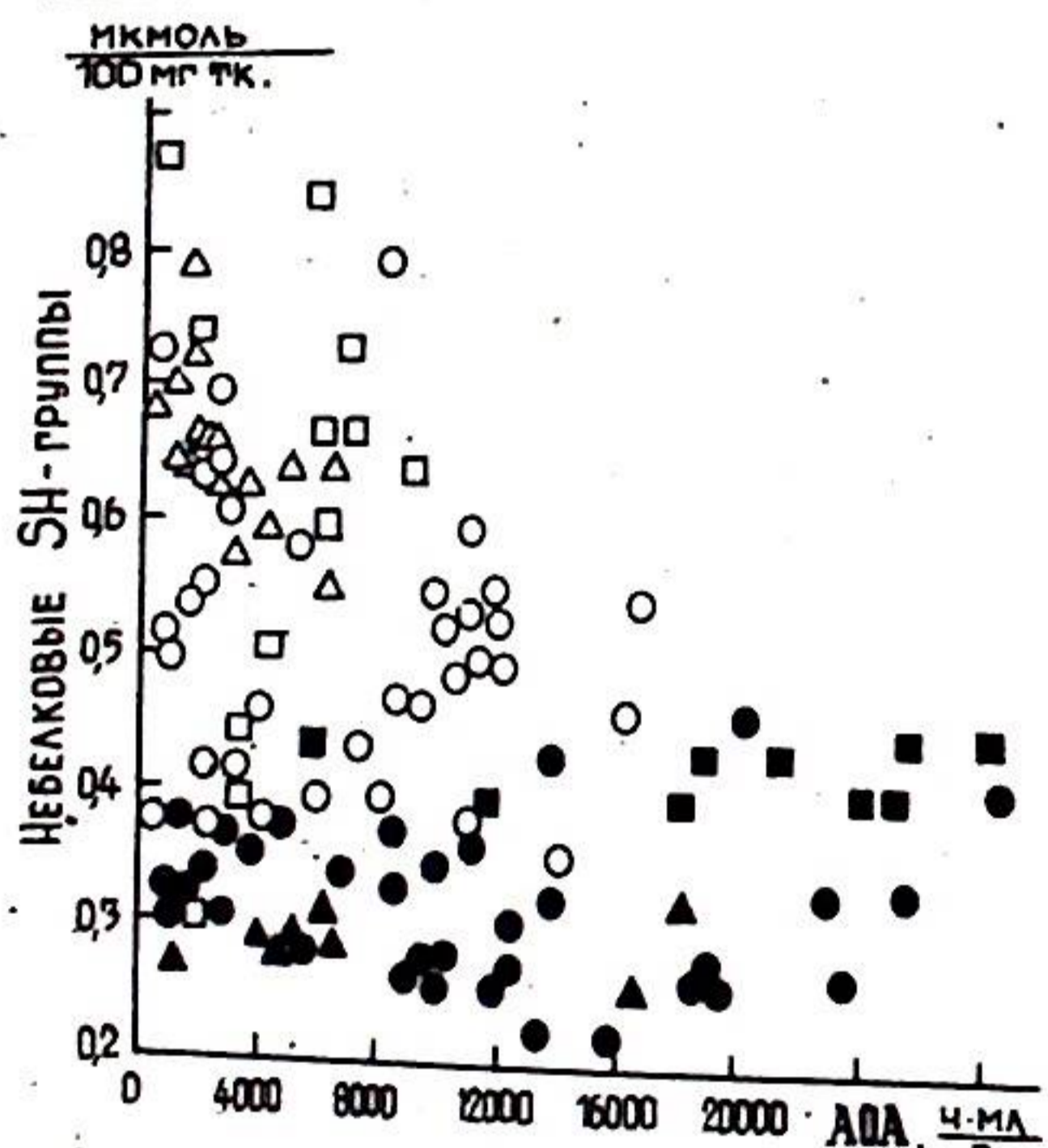


Рис.3

Рис.1. Связь между уровнем общих сульфгидрильных групп и величиной АОА липидов селезенки и печени индивидуальных животных разных видов. Оси абсцисс - величина АОА липидов, ч.мл/г. Оси ординат - уровень общих SH-групп, мкмоль/100 мг ткани.

Рис.2. Связь между уровнем белковых сульфгидрильных групп и величиной АОА липидов селезенки и печени индивидуальных животных разных видов. Усл. обозначения см. к рис.1.

Рис.3. Связь между уровнем небелковых сульфгидрильных групп и величиной АОА липидов селезенки и печени индивидуальных животных разных видов. Усл. обозначения см. рис.1.

корреляции между уровнями эндогенных тиолов и величинами АОА липидов органов мышц линии BALB в ходе дневных колебаний гораздо ниже, чем величины коэффициентов корреляции между этими параметрами для групп животных разных видов. При этом на величину коэффициентов корреляции между уровнем АОА липидов и количеством SH-групп в органах в ходе дневных колебаний и среднегрупповых параметров для животных разных видов влияют специфика органа и пола животного, сезон и природа сульфгидрильных групп. Проведенный корреляционный анализ дает основание утверждать, что изученные параметры не взаимосвязаны, поскольку не обнаружено простой прямолинейной и единообразной связи между уровнем эндогенных тиолов и АОА липидов органов как у индивидуальных животных, так и у животных разных видов. Полученные экспериментальные данные позволили нам предположить, что переход от одного вида животных к другому шел по пути одновременного и однонаправленного изменения обоих показателей, хотя степень выраженности таких изменений у индивидуальных животных могла быть различной. Таким образом, уровни АОА липидов и эндогенных тиолов отражают разные стороны клеточного метаболизма и обеспечивают устойчивость организма к действию радиации по разным метаболическим путям. Величина АОА липидов является характеристикой состояния мембраны, а ее модификация связана с изменением состава, структуры и функциональной активности мембран [1, 37]. Уровень общих (и взаимосвязанных с ними белковых [30]) сульфгидрильных групп должен быть существенным фактором в репарации ДНК, поскольку, как известно, ферменты репарации ДНК являются SH-содержащими [13, 39]. Кроме того, изменение уровня внутриклеточных сульфгидрильных групп играет важную роль не только в пострадиационной репарации ДНК, но и в связывании свободных радикалов, индуцированных облучением [36, 38]. С этой точки зрения становится важным соотношение исходных уровней эндогенных тиолов и АОА липидов в определении устойчивости организма к действию радиации, поскольку с определенной долей вероятности можно полагать, что эти параметры отражают возможность повреждения восстановления как ДНК, так и мембраны.

Выяснение коррелятивных зависимостей между исходными уровнями сульфгидрильных групп или величинами АОА липидов органов животных разных видов и линий в диапазоне доз облучения от ЛД<sub>10</sub>/30 до ЛД<sub>100</sub>/30 показало, что при

низких дозах облучения радиорезистентность животных определяется высокими уровнями АОА липидов и небелковых эндогенных тиолов в селезенке, а при летальных дозах облучения радиорезистентность животных определяется высокими уровнями общих (белковых) сульфгидрильных групп [11]. Это подтверждается и известной в литературе гипотезой о том, что ведущие молекулярные механизмы при облучении животных в летальных дозах и при действии малых доз радиации могут быть различны [23, 26]. Следовательно, поражение и восстановление ДНК и мембраны могут вносить разный вклад в обеспечение радиорезистентности организма в зависимости от тяжести лучевого поражения.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Регуляторная роль взаимосвязи изменений в концентрации антиоксидантов и составе липидов клеточных мембран / С.А.Аристархова, Г.В.Архипова, Е.Б.Бурлакова и др. // ДАН СССР. - 1976. - Т.228. - №1. - С.215-218.
2. Баглей Е.А., Бурлакова Е.Б., Дзюба Н.А. Антиокислительная активность и радиочувствительность нормальных и опухолевых тканей // Физико-химические механизмы злокачественного роста. - М.: Наука, 1970. - С.24-27.
3. Биоантиокислители. - М.: Наука, 1975. - С.267 с.
4. Бурлакова Е.Б., Эмануэль Н.М. Особенности действия меркамина и ингибиторов радикальных процессов в реакциях, моделирующих окисление жиров // ДАН СССР. 1960. - Т. 135. - №3. - С.599-602.
5. Связь между радиозащитным и противоопухолевым действием ингибиторов-антиокислителей / Е.Б.Бурлакова, В.Д.Гаинцева, Л.В.Слепухина и др. // ДАН СССР. - 1967. - Т.164. - №4. - С.934-936.
6. Роль синтетических и природных антиоксидантов в радиочувствительности / Е.Б.Бурлакова, Н.М.Дзюба, Л.В.Слепухина и др. // Вопросы тканевой радиочувствительности. - Алма-Ата: Наука, 1969. - С.125-128.
7. Биоантиоксиданты в лучевом поражении и злокачественном росте / Е.Б.Бурлакова, А.В.Алесенко, Е.М.Морочкина и др. - М.: Наука, 1975. - С.3-211.

8. Антиокислительная активность липидов и радиочувствительность / Е.Б.Бурлакова, Г.Ф.Иваненко, Я.З.Левенгарц и др. (Сообщение 4) // Радиобиология. - 1977. - Т.17. - Вып.2. - С.216-220.
9. Связь между изменениями уровней эндогенных тиолов и антиокислительной активности липидов и радиочувствительностью животных разных видов / Е.Б.Бурлакова, Б.М.Граевская, Г.Ф.Иваненко и др. // Радиобиология. - 1978. - Т.18. - Вып.5. - С.655-660.
10. Исследование связи между количеством сульфгидрильных групп и уровнем антиокислительной активности липидов у индивидуальных животных разных видов / Е.Б.Бурлакова, Г.Ф.Иваненко, А.А.Конрадов и др. // Радиобиология. - 1982. - Т.22. - Вып.3. - С.301-305.
11. Бурлакова Е.Б., Иваненко Г.Ф., Шишкина Н.В. Вклад антиоксидантов и эндогенных тиолов в обеспечение радиорезистентности организма // Изв. АН СССР. Сер.биол. - 1985. - №4. - С.588-593.
12. Механизмы перекисного окисления липидов и его действие на биологические мембраны / Ю.А.Владимирова, И.Оленев, П.Б.Суслова и др. // Биофизика. Итоги науки и техники. - 1975. - № 5. - С.56-117.
13. Газиев А.И. ДНК-лигазы // Успехи современной биологии. - 1974. - Т.78. Вып.2 (5). - С.171-187.
14. Гончаренко Е.Н. О биохимическом фоне радиорезистентности // Радиобиология. - 1971. - Т.11. - №6. - С.811-824.
15. Роль эндогенного дофамина в радиозащитном действии радиопротекторов / Е.Н.Гончаренко, Т.Джанумова, С.С.Жатькова и др. // Докл. АН СССР. - 1972. - Т.205. - №2. - С.465-468.
16. Граевский Э.Я. Сульфгидрильные группы и радиочувствительность. - М.: Атомиздат. - 1969. - С.144.
17. Граевская Б.М., Нечаев И.А. // Радиобиология. Информ. бюлл. - 1967. - Т.10. - С.73.
18. Граевская Б.М., Золотарева Н.Н. // Радиобиология. - 1970. - Т.10. - №5. - С.750-752.
19. Граевский Э.Я., Тарасенко А.Г. Тиольная концепция радиочувствительности // Радиобиология. - 1972. - Т.12. - №4. - С.483-492.

20. Константинова М.М., Минин А.А., Некува И.В. Роль эндогенного глутатиона в радиозащитном эффекте аноксии // Радиобиология. - 1981. - Т.21. - С. 277-280.
21. Константинова М.М., Минин А.А., Некува И.В. и др. Роль эндогенного глутатиона в модификации радиочувствительности клеток асцитной карциномы // Проблемы природной и модифицированной радиочувствительности. - М.: Наука. - 1983. - С.108-114.
22. Кузин А.М. Актуальные проблемы радиобиологии // Современные вопросы радиобиологии. - М.: Наука. 1980. - С.3-12.
23. Кузин А.М. О различии ведущих молекулярных механизмов при действии  $\gamma$ -радиации на организм в больших и малых дозах // Изв. АН СССР. Сер. биол. - 1980. - С.833-890.
24. Ле Суан Ту. Роль эндогенных тиолов в радиочувствительности млекопитающих // Изв. АН СССР. Сер. биол. - 1971. - №2. - С.212-220.
25. О механизмах природной и модифицированной радиочувствительности. - М.: Изд-во МГУ. - 1973. - С.132.
26. Первый Всесоюзный биофизический съезд.: Тезисы докл. - М., 1982. - С.110.
27. Проблемы природной и модифицированной радиочувствительности. - М.: Наука. - 1983. - 280 с.
28. Романцев Е.Ф. Радиация и химическая защита // М.: Атомиздат. - 1968. - 248 с.
29. Антиокислительная активность липидов и радиочувствительность. Сообщ.1/ Л.Н.Шишкина, Е.Б.Бурлакова, Н.М.Дзюба и др. // Радиобиология. - 1974. - Т.14. Вып.1. - С.35-38.
30. Шишкина Л.Н., Пальмина Н.П., Бурлакова Е.Б. Физико-химические свойства липидов и радиочувствительность // Радиочувствительность нормальной и опухолевой ткани. - Алма-Ата: Наука. - 1974. - С.78-81.
31. Антиокислительная активность липидов и радиочувствительность. Сообщ.2/ Л.Н.Шишкина, А.В.Алесева, Н.П.Пальмина и др. // Радиобиология. - 1976. - Т.16. Вып.1. - С.39-43.
32. Шишкина Л.Н., Пальмина Н.П., Бурлакова Е.Б. Антиокислительная активность липидов и радиочувствительность. Сообщ.3// Радиобиология. - 1976. - Т.14. Вып.2. - С.230-233.
33. Bacg Z.M., Alexander P. Importance for radio-protection of the reaction of cells to sulphhydryl and disulfide compounds// Nature. - 1964. - V.203. 4941. - P. 162-164.
34. Bindoli A., Cavalini L., Siliprandi N. Effect of Thiols Oxidation on Lipid Peroxidation in rat liver mitochondria // Chem. Biol. Interactions. - 1977. V. 19. - P. 333-386.
35. Chance B., Siese H., Boveries A. Hydroperoxide Metabolism in Mammalian Organs // Phys. Rev. - 1979. - V.59.-N.3. - P.527-605.
36. Ho S.K., Ho J.L. The role of hydroxyl radicals in radiation-induced single-strand breaks of bacterial DNA sensitized by parachloromercuribenzoate // Radiat. Rev. -1976. - N.2. - P.277-285.
37. Burlakova E.B., Archipova S.V., Dialyayeva M.I. et. al. Membrane-Lipids as Information Carrier // Biophysical and Biochemical Information transfer in Recognition N.Y.: Plenum Press. - 1979. - P.583-594.
38. Charman J.D., Gillespie C.J., Reuvers A.P. et. al. Radioprotectors, radiosensitizers and the shape mammalian cells survival curve // Cell Survival in Low Doses Radiat. Theoret. and Clin. Implicat. Proc. 8th L.G.Gray Conf., L. - 1975. - P. 135.
39. Söderhäll S., Lindahl T. DNA-ligases of eucaryotes // FEBS Lett. - 1976.-V.67. - N.1. - P.1-8.
40. Sparrow A.H., Underbrink A.G., Sparrow R.C. Chromosomes and cellular radiosensitivity. I. The relationship of Do to chromosome volume and complexity in seventy-nine different organisms // Radiat. Res. - 1967. - V.32. -P. 915-945.
41. Wallach D.F.H. Radiatin Effects on Biomembranes // Biomembranes. N.Y., L.: Plenum Press. - 1975. -V.5. - P. 213-249.
42. Wills E.D., Wilkinson A.E. The Effect of Irradiation on Subcellular particles destruction on Sulphudryl-groups // Internat. J. Radiat. Biol. - 1967. - V. 13. - N.1. - P. 45-55.

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ  
И ЭНХИТРЕИДД.А.Криволицкий, А.Г.Викторов,  
М.Ф.Филиппова

Радиочувствительность — показатель, характеризующий устойчивость организма к воздействию ионизирующих излучений, а факторы, его определяющие, — одна из центральных проблем в радиобиологии. От различий в радиочувствительности организма, при прочих равных условиях, зависит эффект облучения зооценоза.

Разнообразные наблюдения за популяциями диких животных в условиях интенсивного облучения биогеоценоза позволили прийти к выводу, что наиболее чувствительной к ионизирующему облучению (по тем последствиям, которые важны для существования популяций) является герминативная ткань половой системы. Это — "критическая система" для судьбы облучаемой популяции в природе, хотя чувствительность воспроизводительной системы с ЛД<sub>50</sub> взрослых животных не однозначна. До сих пор нет данных, чтобы сравнить столь важный показатель, как радиочувствительность половой системы, у разных видов животных.

Период размножения — самый уязвимый в жизни вида: гибель яиц, эмбрионов, молодых несопоставимо выше, чем взрослых особей. Нередко лишь доля процента молодых выживает до периода размножения. В природе существует тесная связь между плодовитостью вида и возможностью выживания молодых. Она определяется жестким естественным отбором, поэтому любое уменьшение исторически сложившихся показателей плодовитости самок, повышение гибели молодых будут иметь самые неблагоприятные последствия для популяции.

Для объяснения различий в радиочувствительности приводятся три группы факторов:

- 1) структура и размеры генома, что объясняет вероятность попадания частиц большой энергии в отдельные локусы хромосом;
- 2) способность организма к восстановлению радиационных повреждений;
- 3) биохимические особенности клеток (содержание триптофанов, липидов, воды, интенсивность метаболизма и т.д.), нарушение протекания химических реакций в облученной клетке.

Несмотря на то, что эти три группы факторов взаимосвязаны, они касаются только механизмов, действующих на молекулярном, клеточном и тканевом уровнях организации. Рассматривая организм как целое в его индивидуальном и историческом развитии, большое внимание следует уделить всему жизненному циклу, особенностям организации и радиочувствительности на разных стадиях развития. Эти особенности не столь важны для позвоночных животных, организация которых не претерпевает принципиальных изменений на протяжении жизни, но для многих беспозвоночных они могут иметь решающее значение.

Известно, что радиочувствительность клеток и тканей прямо пропорциональна скорости деления клеток, связана "митотическим индексом" — процентом клеток, которые находятся в стадии деления. У многих наземных беспозвоночных (насекомые, клещи, кивсяки) значительная стойкость к действию радиации объясняется почти полным отсутствием в соматических тканях делящихся клеток.

Есть в природе поразительно устойчивые к облучению группы — нематоды, тихоходки, у которых во взрослом состоянии в соматических органах совершенно нет делящихся клеток и постоянство клеточного состава является для каждого органа особенностью на протяжении всей жизни после завершения развития. Но в процессе роста те же самые виды на довольно короткое время оказываются довольно чувствительными к действию ионизирующего излучения. Иначе говоря, у беспозвоночных набор критических для облучения органов может меняться на протяжении индивидуального развития, а у взрослых животных нередко только генеративная ткань чувствительна к действию радиации в небольших дозах. Подобные факты привели к необходимости знать "радиационный профиль" онтогенеза. В этой связи значи-

тельно большая радиочувствительность позвоночных животных по сравнению с беспозвоночными может быть объяснена, кроме иных причин, еще и тем обстоятельством, что многие их ткани постоянно обновляются (эпителий, кровеносные органы и т.д.) и состоят из клеток, делящихся в течение всей жизни особи.

А.Х.Спэрроу и Г.М.Вудвелл [2] утверждают, что основной структурой, повреждаемой ионизирующей радиацией растений является клеточное ядро; растения с малым числом хромосом и крупными ядрами наиболее радиочувствительны, а полиплоиды и растения с большим числом хромосом и мелкими ядрами - резистентны. Большое значение имеет скорость клеточного деления. При хроническом облучении замедленное деление ядер увеличивает время облучения каждого интерфазного ядра и степень радиационного поражения. Любой экологический фактор, действующий на скорость роста через изменение скорости клеточного деления, влияет на радиочувствительность. Таких факторов Спэрроу и Вудвелл насчитывают четыре: изменяющие дозу облучения; изменяющие мощность дозы или фракционирование дозы; изменяющие вклад в суммарную дозу отдельных видов смешанного облучения; влияющие на скорость роста и скорость клеточного деления; влияющие на репарационные процессы при облучении. На уровне популяции наибольшее воздействие радиации оказывает на течение процесса полового размножения. Нет сомнений, что все эти факторы имеют важнейшее значение и при облучении популяций животных. В частности у них явно прослеживается коррелятивная связь между диаметром клеточного ядра в разных группах животных и радиочувствительностью.

В условиях средней полосы СССР важнейшей группой в структуре зооценоза являются почвенные черви (дождевые черви, энхитреиды), нематоды, на долю которых приходится более половины всей животной массы экосистемы. Наблюдения за структурой зооценоза в условиях повышенного фоновой ионизирующей радиации показывают, что энхитреиды и дождевые черви относятся к числу групп, которые не выдерживают хронического облучения, а из-за сокращения численности этих массовых групп сапрофагов распадаются многие трофические связи в зооценозе и резко сокращается численность таких хищников, как губоногие многоножки (термиты, филоиды и костянки) [5].

В то же время в экспериментах ЛД<sub>50</sub>/30 для энхитреид оказывается достаточно высокой - 50 кР [6]. В литературе всегда относят к числу радиоустойчивых форм. Наши эксперименты с белым горшечным червем дали еще более высокие показатели: 120 кР. Белый горшечный червь (*Enchytraeus albinus* Henle) оказался удобным объектом для радиобиологических исследований. Неприхотливость культивирования, быстрая смена поколений дают возможность с одной стороны исследовать реакцию этих животных на ионизирующее излучение.

Немного численны данные о радиочувствительности дождевых червей. Американскими исследователями отмечена высокая устойчивость дождевых червей *Lumbricus terrestris* к действию  $\gamma$ ,  $\beta$ -излучения, ЛД<sub>50</sub>/30 около 68 кР [3, 7]. Массовой гибели червей в искусственных популяциях не наблюдали и после облучения дозой 102,4 кР (правда, их поддерживали при температуре +5°C, в противоположность комнатной температуре (+20°C), при которой проводили наблюдения другие исследователи). Видимо, различиями в температуре содержания червей можно объяснить парадоксальное утверждение авторов о более высокой устойчивости дождевых червей к действию ионизирующей радиации по сравнению с другими беспозвоночными. Все же при этом делается замечание, что заметная гибель неполовозрелых стадий и, особенно, яиц лямблицид может наблюдаться при дозах, равных 10% ЛД<sub>50</sub>, а при дозах около 51 кР обнаружены очаги некрозов в кишечном эпителии и ганглиях брюшной нервной цепочки.

Наши исследования радиочувствительности массовых видов дождевых червей средней полосы европейской части СССР (*Lumbricus rudellus*, *Nicodrilus caliginosus*, *Eisenia nordenskioldi*) подтвердили, что ЛД<sub>50</sub>/30 для червей находится в пределах 60-160 кР, т.е. это весьма радиоустойчивые животные. Оказалось также, что показатель ЛД<sub>50</sub>/30 довольно постоянен для популяций червей одного района. Так, в разных районах Московской области в течение трех лет наблюдений для вида *Nicodrilus caliginosus* получали величину ЛД<sub>30</sub>/50 68-70 кР. В то же время в разных частях ареала популяции одного и того же вида существенно различаются по устойчивости к действию ионизирующего излучения. Для *Eisenia nordenskioldi*, обитающей в Ухтинском районе Коми АССР, отмечено ЛД<sub>50</sub>/30 150 кР. Возможно, столь высокая устойчивость к ионизирующему излучению

связана с общей приспособленностью червей исследуемого района к неблагоприятным условиям существования: летним засухам и нагреванию почвы, а зимой - к глубокому и длительному промерзанию.

Работами советских ученых по изучению изменения почвенной фауны под влиянием различных экспериментальных радиоактивных загрязнений было неоднократно показано, что население дождевых червей испытывает при действии ионизирующих излучений явное угнетение. Более того, в составе комплекса почвенной мезофауны дождевые черви оказываются наиболее угнетенной группой. Так, при экспериментальном загрязнении лесных участков  $^{90}\text{Sr}$  (2-3 кг/м<sup>2</sup>) численность любрицид уменьшалась в 100 раз [4]. Поэтому дождевых червей можно использовать в качестве биоиндикатора повышенного фона ионизирующих излучений. Подобная реакция на радиацию объясняется не повышенной радиочувствительностью, а особенностями экологии. Дело в том, что черви живут сравнительно долго, несколько лет до половой зрелости достигают на втором году жизни, коконы до вылупления долго (2-10 месяцев) находятся в почве, обитают любрициды в том ярусе биогеоценоза, который, как правило, содержит наибольшее количество радионуклидов, при питании они заглатывают много почвенных частиц, от которых организм облучается и изнутри. Поэтому полученная доза, которая приходится на ткани дождевых червей и их молодь, во много раз больше, чем у всех других животных, которые обитают в том же ландшафте.

Целью настоящей работы было изучение радиочувствительности почвенных олигохет (белого горшечного червя *Enchytraeus albinus* (Hemle), пашенного червя *Nicodrilus caliginosus* (Savigny) и *Eisenia foetida* (Savigny)) в зависимости от стадии их развития в момент острого  $\gamma$ -облучения.

#### Материал и методика

Исследования проводились на искусственных популяциях белого горшечного червя *Enchytraeus albinus* (Hemle) (*Oligochaeta*, *Enchytraeidae*), коконах пашенного червя *Eisenia foetida* (Savigny) (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*), половозрелых пашенных червей *Nicodrilus caliginosus* (Savigny) (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*) и *Eisenia foetida* (Savigny) (*Oligochaeta*, *Lumbricidae*).

Культура белого горшечного червя размножалась в предварительно стерилизованной почве. Червей с почвой равного объема облучили на установке с  $\gamma$ -источником  $^{60}\text{Co}$

мощность 400 Р/мин) в дозах 60, 80 и 100 кР. Облученные и необлученные искусственные популяции вместе с почвой содержали в чашках Петри в лабораторных условиях при температуре 22-24°C и кормили картофельным отваром.

Объект наблюдали под лупой-бинокляр (МБС-1) при увеличении 8x2. Для определения количества червей в 1 см<sup>3</sup> почвы с энхитреидами набирали в тигель емкостью 2 см<sup>3</sup>, оттуда ее маленькими порциями разводили на часовом стекле и под лупой подсчитывали количество червей. Число выходов (выборки) варьировало от 3 до 10 в зависимости от плотности червей в исследуемой почве. Для каждого варианта определяли среднее арифметическое суммы выборок, разделенное на два.

Кокон *Eisenia foetida*, собранные в природе, облучали на установке ГУБЭ-2000 (источник  $^{60}\text{Co}$ , мощностью 368 Р/мин) дозами 0, 300, 600, 900, 1200, 1500, 2000 и 3000 Р по 20 коконов на каждую дозу. Облученный материал культивировали в чашках Петри во влажных условиях при температуре 8-10°C. Кокон наблюдали под биноклярным микроскопом при увеличении 8x0,5. Учет выходящей из коконов молодки вели в течение 110 дней после облучения.

Облучали половозрелых дождевых червей на установке ГУБЭ-2000 (источник  $\gamma$ -излучения  $^{60}\text{Co}$ , мощность дозы 1840 Р/мин) дозами от 70 до 160 кР, интервал 10 кР. Облучаемые животные находились в пластмассовых цилиндрических контейнерах диаметром 3 см и высотой 5 см, содержащих влажную марлю. Каждой дозой облучались по 6 особей курской и по 10 особей курской популяции. После облучения животных содержали при температуре 12°C в стеклянных сосудах объемом 1 литр, наполненных почвой. Наблюдение за выживаемостью проводили раз в 5 дней в течение месяца. Определение ЛД<sub>50/30</sub> во всех случаях проводили по методу Кербера, а стандартную ошибку вычисляли по методу Гэддама [1].

#### Результаты и обсуждение

Восстановление искусственных популяций белого горшечного червя (*Enchytraeus albinus*) после гамма-облучения. Через 20 дней после  $\gamma$ -облучения искусственных популяций в дозах 60, 80 и 100 кР численность животных в 1 см<sup>3</sup> почвы значительно сократи-

Таблица 1

Изменение численности белого горшечного червя после гамма-облучения за четыре месяца культивации (в дозах 0, 60, 80, 100 кР)

	Время учета			
	Через 20 дней		Через 2,5 м-ца	
	0	80	80	100
Общее кол-во червей	327,9	168,1	86,9	20,4
Из них юных форм (длиной до 3 мм)*	$\frac{31,6}{9,6}$	$\frac{154,3}{91,8}$	$\frac{78,6}{90,4}$	$\frac{18,0}{88,2}$
			38,4	
			0	
			60	
			80	
			100	
			185,8	
			166,1	
			183,7	
			132,2	
			2,0	
			$\frac{2,6}{1,4}$	
			$\frac{1,8}{1,0}$	
			$\frac{1,9}{1,4}$	

\*В числителе - абсолютное число, в знаменателе - % общего числа червей в 1 см<sup>3</sup> почвы.

лась: с 327,9 в контроле (без облучения) до 168,1, 86,9 и 20,4 соответственно (табл. 1). Одновременно под влиянием  $\gamma$ -лучей изменился и возрастной состав энхитреид. Если без облучения в исследуемом объеме почвы число выведенных особей (длиной до 3 мм) составляет всего лишь 9, то после облучения, на фоне сокращения общей численности особей, резко возросла доля новорожденных червей в каждом из вариантов и составила соответственно 91,8, 90,4 и 88,2%.

Далее общая численность червей в расчете на 1 см<sup>3</sup> почвы продолжала сокращаться и через 2,5 месяца после облучения в варианте дозой 80 кР составила всего лишь 38,4, где юных особей было только 9%. Взрослые же черви очень крупные (20 мм), все имели пояска.

Спустя четыре месяца после культивации уцелевшие черви восстановили свою численность до уровня, близкого контролю как по общему числу особей, так и по возрастному составу.

В связи со способностью энхитреид после

$\gamma$ -облучения высокими дозами восстанавливать численность популяции несомненный интерес представляет изучение цитоморфологических изменений у особей, развившихся после облучения. С этой целью червей облучали в дозах 20, 40 и 60 кР, и животных из восстановленной через 1,5 месяца популяции фиксировали в уксуснокислом спирте (1:3). Депарфинированные продольные срезы животных красили по Фельгену. На препаратах под микроскопом МБИ-3 при увеличении 10x1, 5x20 у облученных и необлученных организмов исследовали кишечный эпителий по митотическому индексу и количеству ядер в фазах пролиферации. Результаты подсчета даны в табл. 2, из которой видно, что в кишечном эпителии восстановленной популяции горшечного червя дозы 20-60 кР несколько стимулируют клеточное деление, повышая митотический индекс с 20 до 26%. В этих условиях в фазах пролиферации кишечника число регенерирующих ядер снижается с 13,4 до 6%, в то время как количество ядер в промежуточной фазе возрастает с 19 до 28% при несколько замедленном распаде ядер. У восстановленной популяции горшечного червя кишечный эпителий заметно отличается от такового у контрольных животных. Торможение регенерирующей фазы, стабильность фазы распада сопровождаются увеличением количества ядер в промежуточной фазе. Это, вероятно, можно объяснить глубокими биохимическими и физиологическими изменениями в восстановленном организме животных, которые, естественно, изменили и морфологию тканей кишечника.

Высокая способность к восстановлению популяции горшечного червя после  $\gamma$ -облучения 20-100 кР указывает на их радиоустойчивость. Скорость восстановления популяции тем быстрее, чем ниже доза лучей. Численность облученных червей снижается в зависимости от дозы радиации до определенного предела, после которого уцелевшие организмы дают начало новой популяции с измененной морфологией кишечного эпителия.

Радиочувствительность коконов *Eisenia foetida*. Наблюдения за выходом молоди из коконов *E. foetida* велось в течение 110 дней. Внешний вид, подвижность, пищевая активность облученных и контрольных особей не различались; не было выявлено также четкой зависимости между поглощенной дозой, с одной стороны, и такими показателями, как смертность коконов, динамика выхода и численность молоди, с другой (табл. 3). Исключением является

Состояние кишечного эпителия у восстановленной популяции белого горшечного червя после гамма-облучения

Таблица 2

Доза облучения, кР	Общее кол-во исследованных ядер		Митотический индекс		Фазы пролиферации кишечного эпителия				
	Кол-во ядер	%	Кол-во ядер	%	регенерации		промежуточная		распад
					Кол-во ядер	%	Кол-во ядер	%	
0	2484	495	19,9±0,9	334	13,4±0,8	471	19,0±0,9	1184	47,7±1,1
20	2583	460	17,8±0,9	276	10,7±0,7	570	22,1±0,9	1277	49,4±1,1
40	4017	882	21,9±0,8	340	8,5±0,5	723	18,0±0,7	2072	31,6±0,8
60	2865	766	26,7±0,7	340	12,2±0,5	526	18,6±0,7	2072	31,6±0,8

Таблица 3

Выход молоди *Eisenia foetida* из облученных коконов

	Доза облучения, Р							
	0	300	600	900	1200	1500	2000	3000
Кол-во пустых коконов	20	17	14	14	16	15	16	10
Кол-во червей	36	20	26	24	20	29	20	10

большая - 3000 Р - доза, которая вызвала смертность 50% коконов. Подобная картина, по-видимому, объясняется тем, что облучаемые коконы находились на разных стадиях развития.

Цитоморфологическое исследование кишечника молоди, вышедшей из необлученных коконов, получивших 3000 Р, показало отсутствие достоверных различий как по митотическому индексу, так и по численности клеток кишечного эпителия на разных стадиях пролиферации (табл.4).

Результаты облучения коконов *E.foetida* говорят о том, что на этом этапе развития, по всей видимости, существует по крайней мере одна критическая стадия, чувствительная к радиационному стрессу. В том случае, если в момент облучения коконы не находятся на "критической стадии", то выплывающая из кокона молодежь, по нашим данным, не уступает по жизнеспособности необлученным особям. Наряду с изучением радиочувствительности коконов *E.foetida*, подобные исследования были проведены и с коконами *Dendrobaena octaedra*. Однако высокая смертность коконов в контроле (75%) не позволяет делать какие-либо аргументированные выводы о радиочувствительности данного вида на ранних стадиях онтогенеза.

Радиочувствительность пашенного червя *Nicodrilus caliginosus*. Итоги 30-дневных наблюдений за облученными половозрелыми червями представлены в табл.5. Отсутствие монотонной зависимости между поглощенной дозой и смертностью объясняется, по всей видимости, тем, что использованные в опытах половозрелые дождевые черви были изъяты непосредственно из природных популяций,

Таблица 4

Состояние кишечного эпителия у молодых червей, вышедших из гамма-облученных коконов

Доза облучения, Р	Общее кол-во ядер	Митотический индекс		Фазы пролиферации кишечного эпителия					
		декс		регенерации		промежуточная		распад	
		Кол-во делющихся ядер	%	Кол-во ядер	%	Кол-во ядер	%		
Контроль (без облучения)	1306	325	24,9±1,5	63	4,8±0,8	372	28,5±1,5	546	41,8±1,5

Контроль (без об-

лучения)

325 24,9±1,5 63 4,8±0,8 372 28,5±1,5 546 41,8±1,5

Таблица 5

Радиочувствительность курской и уральской популяций пашенного червя

Популяция	Кол-во выживших и погибших особей	Поглощенная доза, кР											
		0	70	80	90	100	110	120	130	140	150	160	
Курская	Выжило	8	8	7	8	6	9	2	2	3	1	0	112,0±3,2
	Погибло	2	2	3	2	4	1	8	8	7	9	10	
Уральская	Выжило	6	4	5	5	6	4	2	1	2	1	0	134,0±5,6
	Погибло	0	2	1	1	0	2	4	5	4	5	6	

ЛД50/30, кР

состоящих из особей разных возрастов и разного физиологического состояния. Полученные значения LD<sub>50/30</sub> для курской и уральской популяций - 112±3,4 и 135±5,6 соответственно - были сопоставлены с помощью критерия Стьюдента. Последний позволил с вероятностью, превышающей 0,999, сделать заключение о существенном различии этих значений. Факторы, определяющие различную радиочувствительность животных данных популяций, в настоящем эксперименте не изучали. Исследование, которое бы стояло перед собой подобную цель, следует проводить на однородном (по возрасту и физиологическому состоянию) материале с обязательным контролем поглощенной дозы в эксперименте.

### Выводы

Результаты изучения радиочувствительности коконового червя, половозрелых пашенных червей и энхитреид говорят об относительно высокой устойчивости почвенных олигохет к радиационному стрессу. При этом очевидно, на начальных стадиях онтогенеза эти животные более чувствительны к воздействию радиации, чем во взрослом состоянии. Устойчивость к радиационному стрессу подвержена, наряду с возрастной, также и географической изменчивости, однако, как было отмечено выше, цельная картина может быть получена только при работе на однородном (в возрастном и физиологическом отношении) материале, с обязательным контролем поглощенной дозы.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Беленький М.Л. Элементы количественной оценки фармакологического эффекта. - Рига: Изд-во АН ЛатССР. 1959. - 115 с.
2. Спэрроу А.Х., Вудвелл Д.М. Чувствительность растений к хроническому  $\gamma$ -облучению // Вопросы радиационной экологии. - М.: Атомиздат. - 1968. - С.57-85.
3. Edwards C.A. The effect of gamma irradiation on populations of soil invertebrates // Symp. radioecol. 1969. - P.68-77. (USAEC. Rep. CONF - 670-503).
4. Krivolutsky D.A. Earthworms as bioindicators of radioactive soil pollution // Abstracts Intern. Symp.

- biological monitoring of the state of the environment (bioindicators). Indian Natl. Acad. New Delhi. -1984. - P. 51-55.
5. Krivolutsky D.A. Radiation ecology of soil animals // Biol. Fert. Soils. -1987. V.3. - N.1-2. - P. 51-55.
6. Niassaut P. Etude de la radioresistance de certains animaux // Rev. corps. de sante. - 1968. - N.9. - N.2. - P. 243-246.
7. Reichle D.E., J.P. Witherspoon, M.J. Mitchell and C.Styron. Effects of beta-gamma radiation on earthworms under simulated-fallout conditions // Symp. Series Survival of Food Crops and Livestock in the event of Nuclear War. - 1972. - P. 527-534.

УРОВЕНЬ ДОМИНАНТНЫХ ЛЕТАЛЕЙ  
В ПОПУЛЯЦИЯХ ДРОЗОФИЛЫ,  
ПОДВЕРГНУТЫХ ДЛИТЕЛЬНОМУ (ХРОНИЧЕСКОМУ) ВОЗДЕЙСТВИЮ  
СОЛЕЙ УРАНА, ТОРИЯ И СВИНЦА

А.О.Ракин

Направленность эволюции генотипов в условиях постоянного радиационного фона — один из основных вопросов современной радиозологии. Способом решения этой задачи является генетический мониторинг популяций организмов, обитающих в таких условиях. Важность подобного рода мониторинга вызвана и необходимостью оценки возможного генетического ущерба с последующим установлением и обоснованием генетически оправданных, предельно допустимых концентраций того или иного вещества, поступающего в биосферу в результате хозяйственной деятельности человека.

Основной вклад в формирование радиационного фона природных условиях вносят радионуклиды, разнообразие проявляемых ими свойств и можно объяснить возникающую сложность в интерпретации результатов исследований. Именно этому особое значение приобретают результаты, полученные в модельных экспериментах. Одним из наиболее удобных объектов в генетических экспериментах является дрозофила. Относительная легкость ее содержания позволяет в лабораторных условиях проводить работы на популяциях, приближая лабораторный эксперимент к полевому.

В настоящей работе изложены результаты длительного эксперимента, проведенного на перекрывающихся популяциях дрозофилы с целью оценки возможного генотоксического действия на них ионов урана, тория и свинца, имитируемых радионуклидами среды тяжелыми естественными радионуклидами и металлами. Выбор обусловлен их наибольшей пространенностью в окружающей среде по сравнению с

иными металлами, имеющими сходную природу [3, 9]. Оценка генетического ущерба проводилась посредством определения в популяциях дрозофилы уровня доминантных леталей (ДЛ), отражающего степень инактивации генома гоноцитов.

Материал и методика

Перекрывающиеся популяции дрозофилы на протяжении 20 поколений содержали в ящиках объемом 10 дм<sup>3</sup>. Пищей служила агаро-дрожжевая выварка с добавлением изюма и манной крупы, приготовленная по стандартной методике [5].

В качестве затравок в среду вводили нитраты свинца, тория и уранила в концентрациях 10<sup>-2</sup>, 3·10<sup>-3</sup> и 10<sup>-3</sup> г-иона, содержащегося в субстрате исследуемого элемента. Выбор концентраций обоснован предшествовавшими исследованиями [7].

Подсчет ДЛ производили следующим образом: в ящике с популяцией в течение 30 мин экспонировали 3-5 пенициллиновых флаконов объемом 15 мл со стандартной средой, затем подсчитывали отложенные во флаконах яйца и через 36 часов определяли долю неразвившихся яиц. Эта доля, выраженная в процентах, и являлась показателем частоты ДЛ в исследуемых популяциях, что соответствует общепринятой методике [2, 4].

Уровень ДЛ определяли на 15-й, 45-й, 75-й, 150-й, 225-й и 300-й дни от начала эксперимента, что соответствует приблизительно 1, 3, 5, 10, 15 и 20-му поколениям дрозофилы (F<sub>1</sub>, F<sub>3</sub>, F<sub>5</sub>, F<sub>10</sub>, F<sub>15</sub> и F<sub>20</sub>). В F<sub>20</sub> у популяций, содержащихся на среде, включавшей 10<sup>-2</sup> г-иона исследуемого элемента, указанный параметр не определялся.

Математическую обработку результатов проводили по общепринятой методике [6].

Результаты и обсуждение

Уровни ДЛ в исследуемых популяциях приведены в таблице. Динамика изменения этого параметра проиллюстрирована на рис. 1. Как видно из рисунка, на протяжении первых десяти поколений происходит адаптация генетических структур популяций к хроническому воздействию включенных в пищевую среду свинца и радионуклидов: частота ДЛ превышает таковую в контрольной популяции.

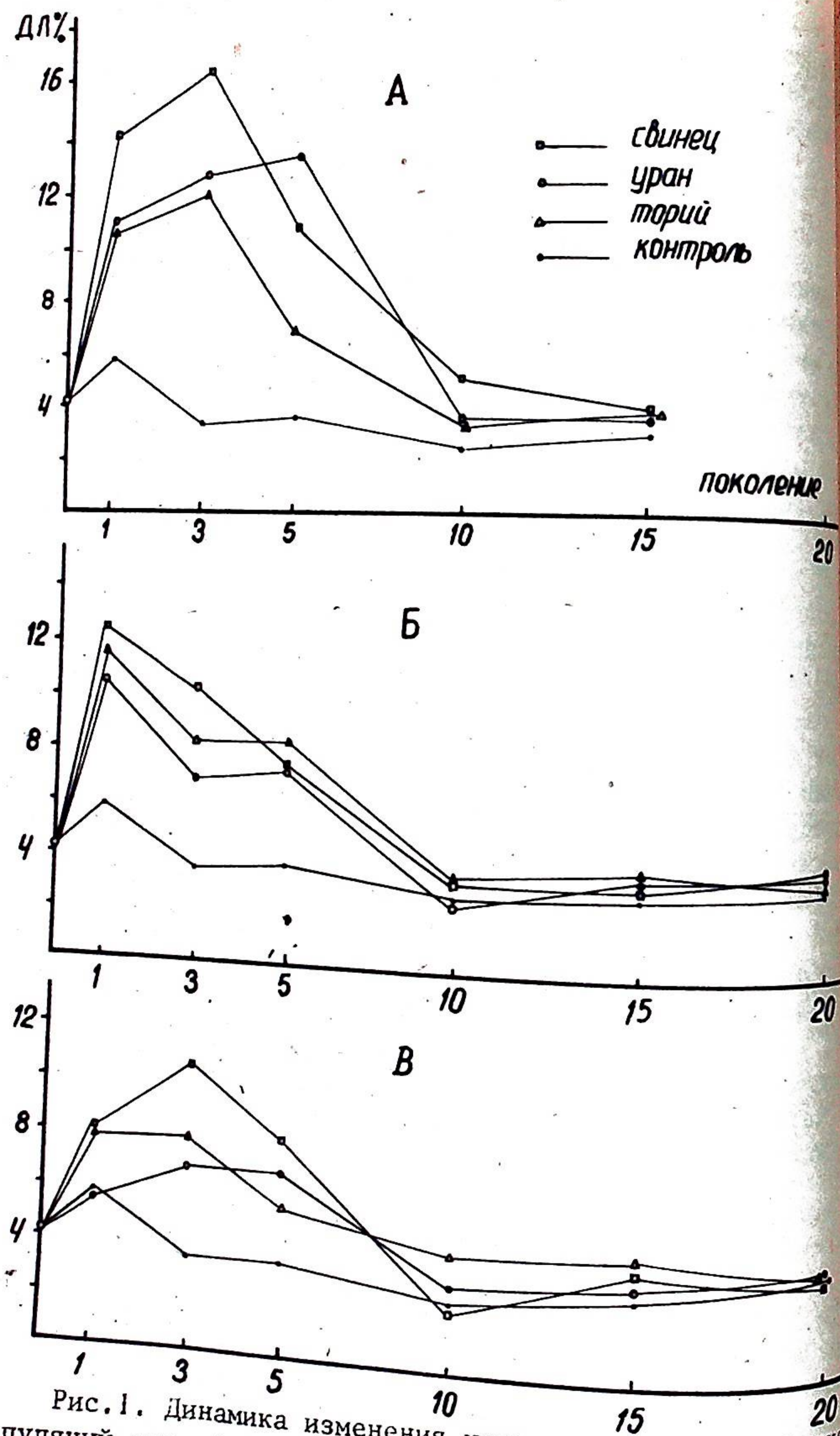


Рис. 1. Динамика изменения уровня Д1 при обработке популяций дрозофилы нитратами свинца, урана и тория в концентрациях:  $10^{-2}$  г-ион - А,  $3 \cdot 10^{-3}$  г-ион - Б,  $10^{-3}$  г-ион - В.

Уровень доминантных леталей в исследуемых популяциях дрозофилы, %

Содержание в субстрате	Концентрация (г-ион)	Первое поколение						Пятое поколение						Десятое поколение						Пятнадцатое поколение						Двадцатое поколение	
		первое		третье		пятое		третье		пятое		десятое		пятнадцатое		десятое		пятнадцатое		двадцатое							
		n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$	n	$\bar{X} \pm m$						
Свинец	$10^{-2}$	218	$14,2 \pm 2,36$	86	$16,3 \pm 3,96$	144	$10,4 \pm 2,55$	537	$4,8 \pm 0,94$	448	$4,0 \pm 0,93$	322	$4,0 \pm 1,10$														
	$3 \cdot 10^{-3}$	304	$12,5 \pm 1,90$	193	$10,4 \pm 2,19$	164	$7,3 \pm 2,03$	341	$3,2 \pm 0,96$	585	$3,3 \pm 0,73$	225	$3,6 \pm 1,23$														
	$10^{-3}$	255	$8,2 \pm 1,72$	188	$10,6 \pm 2,25$	124	$8,1 \pm 2,45$	256	$2,3 \pm 0,95$	576	$4,0 \pm 0,87$	188	$3,7 \pm 1,38$														
Урана	$10^{-2}$	202	$10,9 \pm 2,19$	226	$12,4 \pm 1,57$	101	$12,9 \pm 3,33$	167	$3,6 \pm 1,44$	528	$3,4 \pm 0,79$	130	$1,9 \pm 1,69$														
	$3 \cdot 10^{-3}$	192	$10,4 \pm 2,20$	161	$6,8 \pm 1,99$	112	$7,1 \pm 2,43$	641	$2,5 \pm 0,62$	866	$3,6 \pm 0,63$	188	$3,7 \pm 1,38$														
	$10^{-3}$	165	$5,4 \pm 1,77$	162	$6,8 \pm 1,99$	311	$6,8 \pm 1,42$	294	$3,1 \pm 1,00$	890	$3,5 \pm 0,61$	272	$3,7 \pm 1,14$														
Тория	$10^{-2}$	169	$10,6 \pm 2,37$	211	$11,8 \pm 1,53$	93	$6,5 \pm 2,55$	374	$3,7 \pm 0,98$	589	$3,7 \pm 0,78$	225	$4,0 \pm 1,31$														
	$3 \cdot 10^{-3}$	87	$11,5 \pm 3,42$	231	$8,2 \pm 1,81$	132	$8,3 \pm 2,41$	424	$3,5 \pm 0,90$	451	$3,8 \pm 0,90$	272	$3,7 \pm 1,14$														
	$10^{-3}$	230	$7,4 \pm 1,73$	315	$7,9 \pm 1,52$	127	$5,5 \pm 2,03$	395	$4,1 \pm 0,99$	239	$4,6 \pm 1,36$	362	$3,6 \pm 0,98$														
Контроль	-	208	$5,8 \pm 1,62$	115	$3,5 \pm 1,71$	277	$3,6 \pm 1,12$	568	$2,5 \pm 0,65$	444	$2,9 \pm 0,80$	362	$3,6 \pm 0,98$														

Наиболее ярко выражена реакция популяций на затравку в первом поколении, где при концентрации исследуемого элемента  $10^{-2}$  и  $3 \cdot 10^{-3}$  г-ион частота ДЛ достоверно выше, чем в контроле ( $P < 0,01$ ). Одновременно прослежена прямая дозовая зависимость, когда, за небольшим исключением, более высокая концентрация металла в среде влечет за собой и более высокий уровень ДЛ в популяции.

Почти во всех случаях после некоторого нарастания частоты ДЛ от  $F_1$  к  $F_3$  наступает ее снижение. Исключения составляют популяции, содержащиеся на среде, включающей уран. В этих популяциях повышение уровня ДЛ идет вплоть до  $F_5$ , что свидетельствует, очевидно, о некоторых особенностях действия урана на генотип, затрудняющих адаптацию.

К  $F_{10}$  уровень ДЛ во всех случаях выходит на плато с близким к контрольному значением. В то же время различие в частотах ДЛ между  $F_5$  и  $F_{10}$ , как правило, достоверно.

Для иллюстрации воздействия исследуемых элементов на рис. 2 представлены усредненные по трем концентрациям графики, отражающие динамику изменения частот ДЛ в популяциях. Наиболее остро действует на популяции свинец: в  $F_1$ ,  $F_3$  и  $F_5$  уровень ДЛ достоверно выше контрольного ( $P < 0,01$ ) и одновременно несколько превышает этот показатель при затравке торием и ураном. В популяциях, подверженных воздействию тория, частота ДЛ неуклонно снижается от 9,9% ( $F_1$ ) к 3,8% ( $F_{10}$ ), достоверно отличаясь от контроля вплоть до  $F_5$  ( $P < 0,05$ ). Частота ДЛ в популяциях, обрабатываемых ураном, на протяжении пяти поколений остается приблизительно на одном уровне.

Представленные данные свидетельствуют о том, что частота ДЛ во всех вариантах с внесением затравок к  $F_{10}$  нормализуется и достигает контрольных значений, оставаясь и далее на том же уровне. Это позволяет утверждать, что к 10-му поколению в популяциях, подвергавшихся длительному воздействию повышенных концентраций свинца, тория и урана, произошел сдвиг нормы реакции.

Если сопоставить хроническое действие ионизирующей радиации на популяции дрозофилы с результатами представленного в настоящей работе постоянного влияния токсического фактора в виде ионов свинца, тория и урана, то не трудно обнаружить аналогию. Активная стабилизация уровня приспособленности популяций дрозофилы к действию радиации наступает к 10-му [8] или к 15-16-му [4, 12] поколениям.

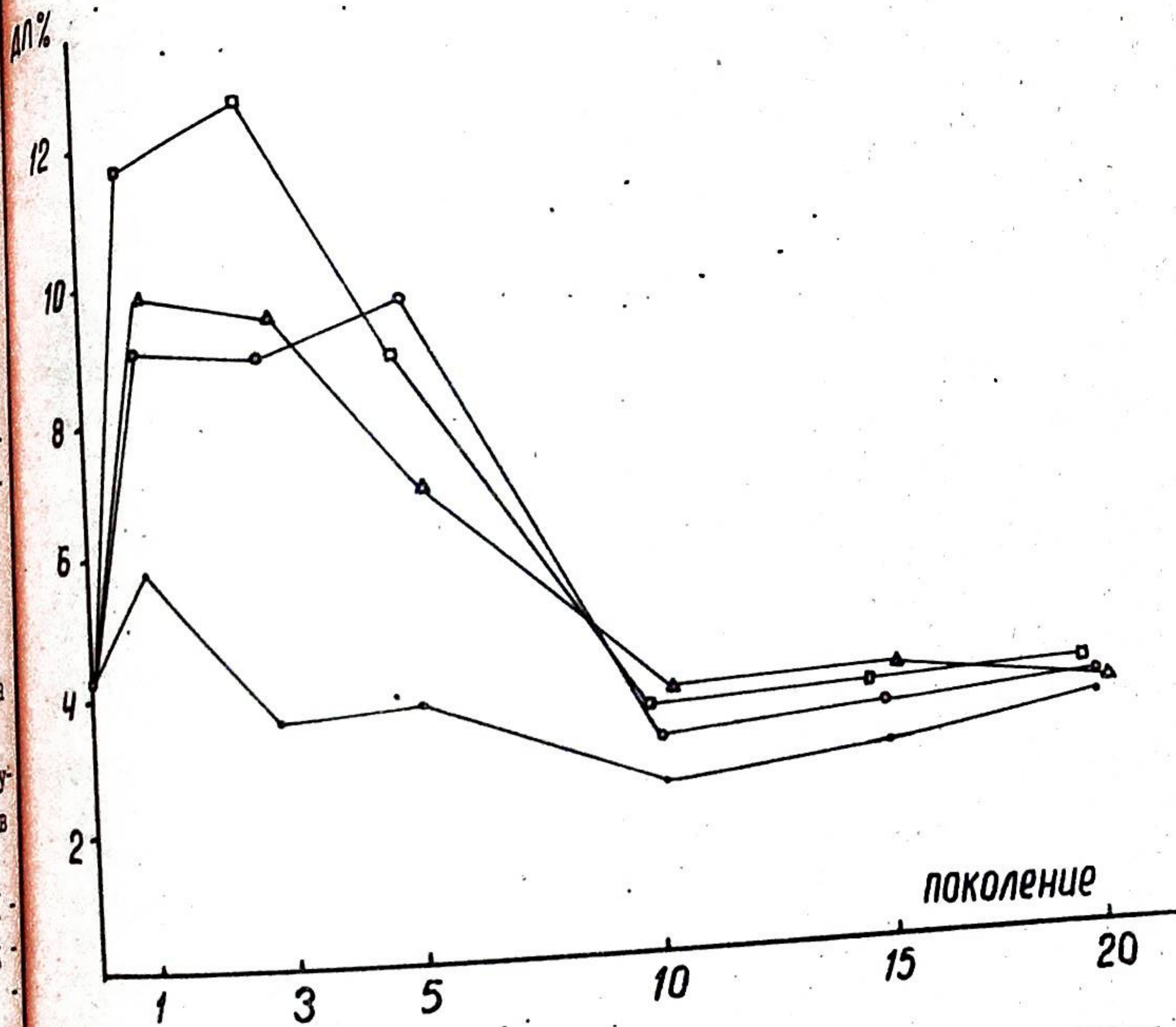


Рис. 2. Специфичность действия свинца, урана и тория на уровень ДЛ исследуемых популяций. Среднее значение по трем концентрациям. Усл. обозначения см. к рис. 1.

Доказано, что механизм адаптации организмов, и в частности дрозофилы, к действию тяжелых металлов по большей части сводится к формированию в фазе пренатального развития в кишечнике белков протекторов, и процесс этот протекает тем быстрее, чем менее сложные по структуре соединения образуются при инкорпорации металлов [1, 11]. Торий, как правило, не формирует сложных комплексов [3], поэтому легко объясняется сравнительно быстрая адаптация к нему популяций дрозофилы. Свинец и уран образуют высокомолекулярные органокомплексы, что затрудняет компенсацию токсического действия этих элементов в

субвитаальных концентрациях [3, 9]. Этим объясняется некое "запаздывание" снижения частот ДЛ в популяциях, обрабатываемых свинцом и ураном, чего не наблюдается в популяциях, подверженных воздействию тория.

Нельзя не обратить внимание на то, что торий и уран, в отличие от свинца, проявляют себя не только как токси-каны, но и как источники радиоактивности. Однако, по мнению Блэйлока и Шугарта [10], адаптация к малым дозам радиации происходит у дрозофилы уже в 3-4-м поколениях. Поэтому можно предположить, что к F<sub>5</sub> генотипы популяций дрозофилы становятся устойчивыми к радиационному воздействию урана и тория.

На основании изложенного установлено, что в исследуемых популяциях наблюдается прямая дозовая зависимость уровня ДЛ от концентрации металла в среде, а также то, что свинец проявляет большую, чем уран и торий, токсическую активность на протяжении первых трех поколений дрозофилы.

Полученные данные позволяют сделать следующее заключение:

- радиационное воздействие на популяции дрозофилы урана и тория в субвитаальных концентрациях несоизмеримо мало по сравнению с токсическим;

- свинец и уран, в силу особенностей своей химической природы, медленнее, чем торий, вызывает формирование в организме компенсаторных механизмов;

- сдвиг нормы реакции в перекрывающихся популяциях дрозофилы в сторону адаптации при воздействии тяжелых металлов и тяжелых естественных радионуклидов в концентрациях, близких к техногенным, происходит к десятому поколению.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бигалиев А.Б. Генетические эффекты ионов металлов. - Алма-Ата: Наука, 1986. - 186 с.
2. Ватти К.В., Тихомирова М.М. Спонтанные и индуцированные радиацией доминантные летальные мутации у самок и самцов дрозофилы // Исследования по генетике. - Л.: Изд-во ЛГУ, 1976. - Вып.6. - С.32-43.
3. Курляндская Э.Б. Некоторые вопросы токсикологии нерастворимых солей тория-232 и урана-238 // Мате

риалы по токсикологии радиоактивных веществ. - М: Медицина, 1964. - Вып.4. - С.3-9.

4. Моссэ И.Б. Динамика популяции при облучении и воздействии антимуутагенном // Отбор и мутационный процесс в популяциях. - Минск: Наука и техника, 1985. - С.107-158.

5. Объекты биологии развития. - М.: Наука, 1975. - С.130.

6. Плохинский Н.А. Алгоритмы биометрии. - М.: Изд-во МГУ, 1980. - 150 с.

7. Ракин А.О. Токсическое действие свинца, урана и тория на экспериментальные популяции дрозофилы // X-я Коми республиканская молодежная научная конференция: Тез.докл. - Сыктывкар, 1987. - С.57-58.

8. Томенко Т.В. Генетические процессы в экспериментальных популяциях *Drosophila melanogaster*, подвергнутых хроническому облучению // Биосфера и человек. - М.: Наука, 1975. - С.253-254.

9. Ahlberg J., Ramel C., Wachtmeister C.A. Organolead compounds shown to be genetically active // AMBIO. - 1972. - V.1. - N.1. - P. 32-36.

10. Blaylock B.G., Shugart H.H. The effect of radiation induced mutations on the fitness of *Drosophila* populations // Genetics. - 1972. - V.72. - N.3. - P. 469-474.

11. Maroni G., Latstovsky-Perry D., Otto E., Watson D. Effects of heavy metals on *Drosophila* larvae and metallothionein "c" DNA // Environ. Health Perspect. - 1986. - V.65. - P. 107-116.

12. Wallace B. Genetic changover in *Drosophila* populations // Proc. Nat. Acad. Sci. - 1986. - V.83. - N.5. - P. 1374-1378.

## НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ

О.В. Ермакова, А.В. Ткачев

Проблема радиочувствительности щитовидной железы, поставленная еще в начале XX в. в трудах Б.С. Зимницкого, М.И. Неменова, Д.Ф. Решетилло и других [6, 14, 15], не утратила своей актуальности и в наши дни. Напротив, все более широкое использование атомной энергии, интенсивное применение в народном хозяйстве радиоактивных изотопов создают предпосылки для увеличения радиационного фона окружающей среды и образования зон с повышенным фоном радиации. Поэтому вопросы радиочувствительности как организма в целом, так и отдельных его тканей при хроническом радиационном воздействии в малых дозах, являются актуальными в современной радиобиологии.

Щитовидная железа, обладая широким спектром гормональных воздействий, играет исключительно важную роль в развитии организма в целом и его отдельных систем, способствует его адаптации к факторам внешней среды. Это объясняется тем, что тиреоидные гормоны, синтезируемые фолликулярными клетками, оказывают влияние на все виды обмена веществ, стимулируют окислительные процессы в организме, усиливают теплообразование и поглощение кислорода тканями, стимулируют пролиферацию и дифференцировку клеток.

Вопрос о радиочувствительности щитовидной железы до сих пор является спорным. Имеющиеся в настоящее время сведения относительно реакции щитовидной железы на воздействие ионизирующей радиации в широком диапазоне доз отличаются крайностью точек зрения. Отдельные авторы относят этот орган к радиорезистентным, не обнаруживая существенных изменений в его структуре даже при воздействии

сублетальных и летальных доз радиации [9, 15]. Другие рассматривают тиреоидную ткань как весьма радиочувствительную [17, 19, 20].

Щитовидная железа характеризуется высокой структурной и функциональной лабильностью [1, 3, 4, 20]. Функциональная активность фолликулярного эпителия находится в обратных коррелятивных связях с температурой окружающей среды, зависит от таких эндо- и экзогенных факторов, как возраст, пол, половая цикличность, уровень тиреотропного гормона в крови, объем наносимой травмы и т.д. Все это предполагает высокую уязвимость этого органа при различных повреждающих воздействиях, тем более радиационных.

Результаты экспериментов, проведенные рядом исследователей, в том числе одним из авторов настоящего сообщения, позволяют отнести тиреоидную ткань к весьма радиочувствительным. Установлено, что ее высокие компенсаторные возможности и степень функциональной асинхронности структурных компонентов затрудняют выявление радиационных повреждений. В связи с этим становятся понятными несоответствия между структурой и функцией щитовидной железы, отмечаемые многими исследователями. В реакции этого органа на лучевое повреждение существует еще ряд особенностей, которые могут объяснить причину разногласий в вопросе о радиочувствительности щитовидной железы.

Различные стороны неспецифического метаболизма щитовидной железы, этапы гормоногенеза подвержены радиационному повреждению в разной степени. Разрешающие возможности световой микроскопии в выявлении пострadiационных дефектов тиреоидных клеток ограничены. Лишь комплекс тестов позволяет определить, что активность энзимов, ультраструктура и гормоногенетическая функция таких клеток резко изменены. Причины несоответствия данных световой микроскопии и субклеточной организации, гистохимии и показателей функционального состояния, несомненно, связаны и со своеобразием повреждения при облучении в широком диапазоне доз. При этом патологическая ситуация в железе может возникнуть мозаично на субклеточном уровне, и характер ее может быть неодинаков в различных структурах. Как известно, явление дезинтеграции является характерным признаком при лучевом воздействии [2]. Обнаружение дезинтеграции возможно как на субклеточном уровне, так и на уровне фолликула и органа в целом.

Другой характерной реакцией щитовидной железы при радиационных воздействиях является фазность морфологических изменений. Многие авторы наблюдают ее при широком диапазоне доз, что позволяет говорить о постоянстве такой реакции [9, 16, 18, 19]. Однако нужно учитывать, что количественные и качественные проявления ее неодинаковы при различных условиях облучения.

Известно [8, 19], что при воздействии летальных доз радиации начальная реакция щитовидной железы сопровождается как гипертрофией, так и гиперплазией секреторных элементов. Такой эффект может быть сравним, с определенными оговорками, с острой стимуляцией железы экзо- или эндогенным тиреостимулирующим гормоном (ТСГ) [24]. Воздействие малых доз радиации сопровождается главным образом гиперпластической реакцией тиреоидного эпителия [19]. Одновременно появляется большое число светлых клеток. Такие изменения напоминают результат хронического воздействия ТСГ и отчасти соматотропного гормона (СТГ) [5]. Связан ли такой эффект с тиреотропной функцией гипофиза, можно лишь предполагать. Однако представляется весьма интересным факт активизации гиперпластических процессов в тиреоидной ткани под влиянием малых доз радиации.

Хроническая стимуляция гиперпластических процессов может вызвать опухолевый рост в тиреоидной ткани. В.Н. Стрельцова и Ю.И. Москалев доказали это, вводя животным незначительное количество радиоизотопов, не влияющих на продолжительность жизни [12, 17]. В этой связи нельзя полностью согласиться с мнениями авторов [9], которые отводят радиационному фактору лишь роль стимулятора трофной активности гипофиза, не учитывая пострадиационных нарушений в самих тиреоидных клетках. Здесь уместно сослаться на данные авторов, которые показали, что уже при облучении в дозе 5 Р появляются структурные различия ДНК [10]. Следует также учитывать сообщения о генетической регуляции процессов роста тиреоидных клеток [13, 23]. К тому же широко используемый в радиационной эндокринологии термин "дизинтеграция нейроэндокринной системы" предполагает синхронную реакцию как регулирующих механизмов (гипофиз - гипоталамус), так и периферических желез.

Лучевое воздействие вызывает повреждение щитовидной железы, играя роль пускового механизма для длительной стимуляции тиреотропным гипофизарным гормоном участков

щитовидной железы, обуславливающей рост опухолей. Последовательность событий радиационного воздействия [12] может быть представлена следующим образом: радиационное воздействие → повреждение щитовидной железы, понижение секреции тиреоидных гормонов → понижение уровня тиреоидных гормонов в крови → гиперфункция гипофиза → гиперплазия сохранившейся ткани щитовидной железы → аденома щитовидной железы.

В опытах на крысах [7, 19] через год после введения тория-232 (25%-ный коллоидный раствор двуокиси тория, по 4 мл на животное, внутривенно) была отмечена патологическая трансформация тиреоидной паренхимы, которую можно рассматривать как предопухолевый процесс. Его развитие обусловлено сочетанным воздействием местного радиационного поражения с хронической тиреотрофной стимуляцией. Отмеченные периодические изменения тиреоидной паренхимы частично напоминают эффект хронической тиреотрофной стимуляции, однако имеются качественные особенности: микрофолликулы образуются не за счет гипертрофии секреторных элементов, как это происходит при воздействии ТСГ без облучения, а вследствие гиперплазии парафолликулярной ткани и новообразования фолликулов. Наблюдаемая при этом паренхиматозная трансформация не является заключительным этапом морфологической реакции, и обновление микроструктуры может осуществляться многократно.

Учитывая, что при введении радиоизотопов облучение тиреоцитов осуществляется хронически, локально и с большей плотностью ионизации, можно предположить, что со временем возрастет количество и степень повреждения тиреоцитов. Это создает функциональный дефицит щитовидной железы, который и без повышения уровня секреции ТСГ может быть компенсирован внутренними гомеостатическими механизмами, - например, возбуждением сохранившихся элементов.

На рисунке мы попытались схематически представить различные способы реакции тиреоцитов в зависимости от силы радиационного воздействия. При воздействии малых доз радиации выявлено, что реакция тиреоидной паренхимы отличается от наблюдаемой при острой лучевой болезни. При общем внешнем облучении тиреоидные клетки повреждаются одновременно в большом количестве, но с малой плотностью ионизации. Прямые радиационные дефекты будут менее существенны в отдельных клетках, но число их ока-

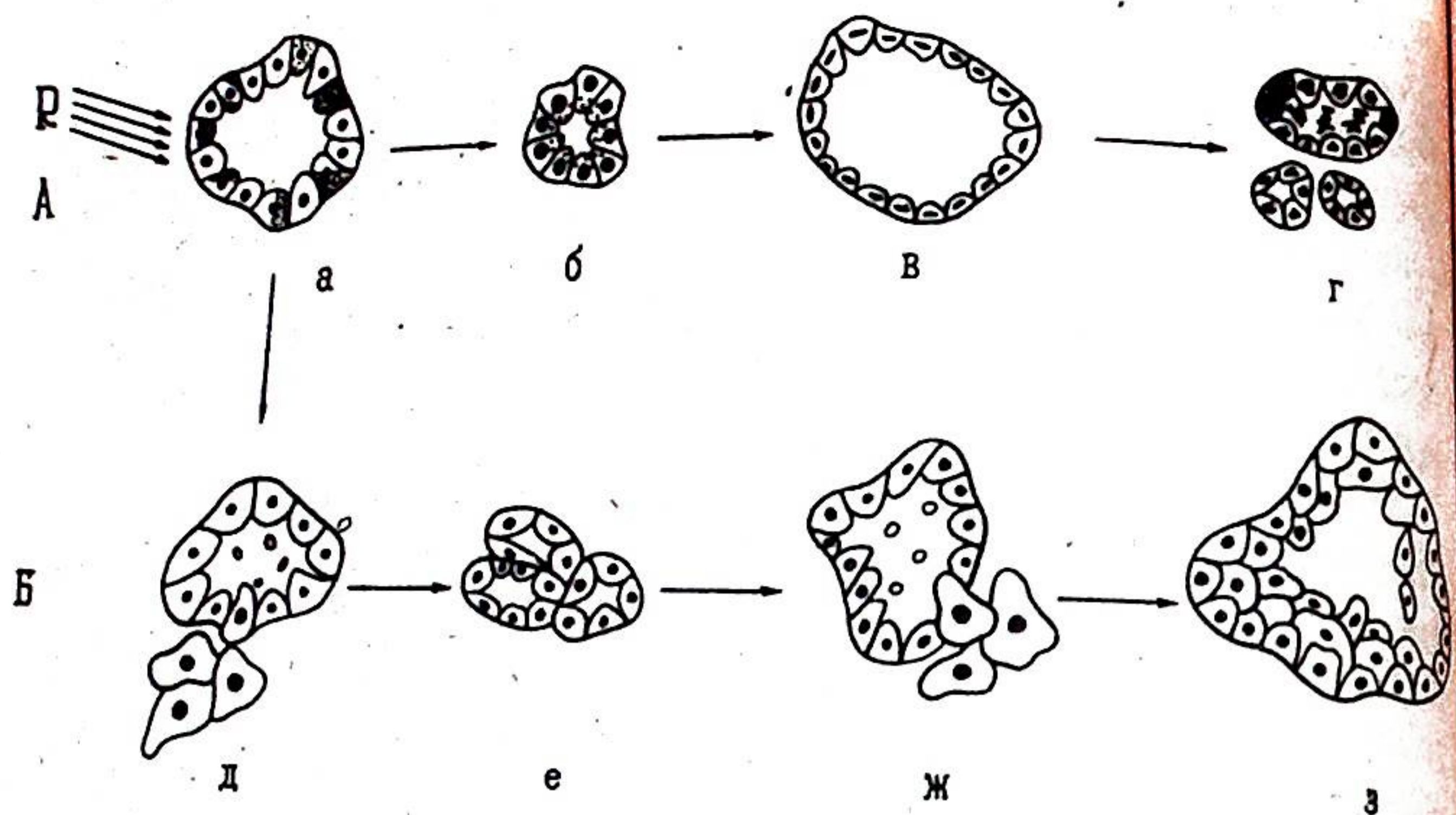


Рис. Реакция тиреоцитов при воздействии абсолютно смертельных (А), сублетальных и малых (Б) доз радиации. а) мозаичное повреждение тиреоцитов вследствие радиационного воздействия; б) морфологические признаки активации тиреоцитов в латентный период острой лучевой болезни; в) гипоплазия секреторных элементов в период разгара острого лучевого заболевания; г) повторное появление морфологических признаков возбуждения тиреоцитов и элементы деструкции в период исхода; д) массовый выход тиреоцитов в парафолликулярное положение в начальный период после воздействия сублетальных и малых доз радиации; е) новообразование фолликулов из тиреоцитов, ранее выклинившихся в парафолликулярное положение; ж) повторная паренхиматозная трансформация щитовидной железы; з) нарушение морфогенных свойств тиреоцитов в отдаленные сроки после радиационного воздействия.

жется большим, чем при облучении от инкорпорированных изотопов. Выключение части функциональных элементов щитовидной железы при введении радиоактивных изотопов создает дополнительную нагрузку на неповрежденные клетки. Известно, что клетки и ткани, находящиеся в метаболически активном состоянии, обладают повышенной радиочувствительностью [11]. Подобная ситуация оказывается порочным кругом, поскольку стимуляция со стороны гипофиза возбуждает тиреоидные клетки, способствуя их большему повреждению. Функциональная недостаточность создает дополнительную нагрузку на сохранившиеся элементы, вероятность

повреждения которых при этом возрастает. Выходом из такого порочного круга, как показали результаты наблюдений [19], может быть перегруппировка секреторных элементов посредством выклинивания и образования новых фолликулов из относительно полноценных тиреоцитов. Однако полноценного восстановления тиреоидных клеток не происходит [1,19]. Вновь сформированные фолликулы не в состоянии выполнять свое назначение и подвергаются вторичной трансформации.

Говоря о пострадиационном восстановлении, мы подразумеваем не только регенерацию структуры органа, клеток, но и восстановление функции и компенсаторных способностей. Эксперименты с применением функциональной нагрузки в пострадиационный период наглядно свидетельствуют о неполноценности и временности восстановительных процессов в щитовидной железе. В связи с этим следует еще раз подчеркнуть, что тиреоидные клетки являются высоко радиочувствительными.

Учитывая развивающиеся представления о высокой радиочувствительности щитовидной железы, а также важнейшую роль этого органа и всей эндокринной системы в становлении механизмов адаптации, считаем, что несомненный интерес будут представлять исследования щитовидной железы у природных объектов, подвергающихся хроническому воздействию радиационного фактора при относительно низких мощностях дозы. Такие исследования открывают возможность проследить за развитием предпатологических состояний эндокринной системы организма при действии слабых раздражителей.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Войткевич А.А. Восстановительные процессы и гормоны. - Л.: Медицина, 1965. - 251 с.
2. Войткевич А.А. Нейро-эндокринная дезинтеграция при лучевом синдроме // Вестник АМН СССР. - 1967. - №12. - С. 5-14.
3. Глумова В.А. Щитовидная железа // Структурные основы адаптации и компенсации нарушенных функций. - М.: Медицина, 1987. - С. 320-328.
4. Гордиенко В.М., Козырицкий В.Г. Ультраструктура желез эндокринной системы. - Киев: Здоров'я, 1978. - 288 с.

5. Зайчик В.Е., Ткачев А.В. Количественная оценка тиреостимулирующего эффекта // Нейроэндокринные корреляции. - Обнинск, 1968. - С. 39-41.

6. Зимницкий В.С., Баскина Н.А., Девирц А.П. Влияние рентгеновских лучей на тонкую структуру паренхимы щитовидной железы // Вестник рентгенологии и радиологии. - 1933. - Т.17. - №1. - С. 71-79.

7. Изменения в костной ткани и некоторых эндокринных органах под влиянием двуокиси тория / Г.А.Зедгендзе, И.С.Амосов, Э.Л.Соболева, А.В.Ткачев // Мед. радиология. - 1968. - Т.13. - №12. - С.46-49.

8. Кащенко Л.А. Реакция щитовидной железы, яичников и передней доли гипофиза на общее однократное и хроническое облучение радиоактивным кобальтом ( $Co^{60}$ ) из внешнего источника // Научн. тр. / НИРРИ МЗ СССР. - 1957. - Т.2. - С. 254-256.

9. Кирпатовский И.Д., Жумабаев М.К. Реактивные изменения в щитовидной железе после местного рентгеновского облучения. - М., 1984. - С. 1-10. - Деп. в ВИНТИ 13.02.84, № 1278-84.

10. Определение структурных различий ДНК по соотношениям нуклеиновых белков / Г.А.Крицкий, В.М.Лахтин, Н.Н.Нинкина и др. // Биохимические методы. - М.: Наука, 1980. - С.113-118.

11. Манойлов С.Е. Первичные механизмы биологического действия проникающей радиации. - Л.: Медицина, 1968.

12. Москалев Ю.И., Стрельцова В.Н. Лучевой канцерогенез в проблеме радиационной защиты. - М.: Энергоиздат, 1982. - 121 с.

13. Муртзаева Л.А., Хакимов П.А., Мирахмедов А.К. Цитофизиология органов эндокринной системы в онтогенезе (радиационные аспекты). - Ташкент, 1979. - 128 с.

14. Неменов М.И. Рентгенотерапия. Руководство для врачей и студентов. - Пг., 1920.

15. Неменов М.И. Рентгенотерапия через воздействие на нервную систему. - М., 1950.

16. Подпильчак М.Д., Калынюк П.П. Гистоморфологические изменения в щитовидной железе при острой лучевой болезни // Радиобиол. терапия. - 1964. - Т.5. - № 1. - С. 47-57.

17. Стрельцова В.Н., Москалев Ю.И. Отдаленные последствия радиационного поражения. Бластомогенное действие // Итоги науки и техники. Сер. радиац. биол. - 1985. - Т.5. - 181 с.

18. Ташходжаев П.И. Реакция щитовидной железы на действие гамма-лучей  $Co^{60}$ : Автореф. дисс. ... канд. мед. наук. - Ташкент, 1967.

19. Ткачев А.А. Аспекты радиационного поражения щитовидной железы: Автореф. дисс. ... докт. мед. наук. - Л., 1970. - 30 с.

20. Хакимов П.А., Муртзаева Л.А., Туйгиев С. Влияние малых доз ионизирующей радиации на клетки щитовидной железы в процессе эмбриогенеза // Радиобиология. - 1983. - Т.23, №1 - С. 119-122.

21. Чернявский Ф.Б., Ткачев А.В. Популяционные циклы леммингов в Арктике: Экологические и эндокринные аспекты. - М.: Наука, 1982. - 164 с.

22. Michaelson S.M., Quinlan W. et al. Radiation-induced thyroid dysfunction in the clod // Radiat. Res. - 1967. - V.30.-N. 1. - P. 38-77.

23. al-Saadi A.A., Beierwaltes W.H. Chromosomal changes in rat thyroid cells during iodine repletion // Cancer. Res. - 1966. - V.26.-N.4. - P. 676-688.

24. Seljelid R. On the origin of colloid droplets in thyroid follicle cells // Exper. Cell. Res. - 1966. - V. 41. - P. 688-691.

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  
RHARONTICUM CARTHAMOIDES (WILLD.) JLJIN  
ПРИ ПОВТОРНЫХ ОСТРЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ  
СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА

Н.П.Фролова, А.И.Таскаев, Ю.М.Фролов

Фундаментальные исследования в области радиобиологии свидетельствуют о том, что ионизирующие излучения при определенных условиях могут выступать в роли регуляторов многих биологических процессов [2, 3]. Так, в растениеводстве ионизирующая радиация используется для повышения продуктивности растений и в качестве мутагенного фактора. Однако нерешенным остается вопрос об изменении уровня радиочувствительности растительных популяций при многократных последовательных облучениях семенного материала.

В литературе имеются данные, свидетельствующие как о повышении, так и о снижении радиочувствительности растительных организмов при облучении семян мутагенными дозами в нескольких поколениях [6, 10]. Vasti S.M. и Jensen J. [9], анализируя результаты 11-кратных циклов периодического облучения растений, пришли к заключению, что на основании полученных данных о выживаемости особей, мутабельности, продуктивности популяций нельзя говорить об изменении радиочувствительности. Анализ других литературных данных свидетельствует о том, что проявление радиационно-индуцированных эффектов при повторных облучениях семян не однозначно и зависит во многом от видовой специфики растений, величины и мощности доз облучения, кратности воздействия и условий произрастания растений [1, 5].

Более ранними исследованиями, проведенными в условиях среднетаежной подзоны Коми АССР с рапонтиком сафлоровидным - видом, отличающимся высокой природной радиорезистентностью, было установлено наличие стимуляционных эф-

фектов в широком диапазоне доз гамма-облучения (5-100Гр) [7]. Изучение последствий однократного радиационного воздействия в этом диапазоне доз не выявило существенных изменений в продуктивности потомства рапонтика сафлоровидного [8]. Тем не менее осталось опасение, что многократное последовательное использование предпосевной радиационной обработки получаемого семенного материала в ряде поколений может модифицировать радиобиологические эффекты у растений. Поэтому задачей проведенных исследований было выявление возможных изменений в радиочувствительности модельных популяций многолетнего травянистого вида - после двух циклов острого облучения семенного материала.

Материал и методика

В качестве объекта исследований был использован высоко-радиоустойчивый вид - рапонтик сафлоровидный *Rharon-ticum carthamoides* (ЛД<sub>95</sub>- 1840 Гр) [4], эндемик Алтая, многолетнее травянистое поликарпическое растение, интродуцированное в Коми АССР в качестве кормового, отличающееся высокой пластичностью и хорошей приспособляемостью к условиям внешней среды.

Были подготовлены четыре модельные популяции рапонтика, различающиеся между собой суммарной величиной дозы радиационного воздействия при двух циклах острого облучения семян. При первом цикле покоящиеся семена рапонтика сыктывкарской репродукции облучали в дозе 5 Гр на гамма-установке "Исследователь" (мощность дозы - 5,2 Гр/мин). Первое семенное поколение, полученное в первом опыте у этой популяции, разделили на три партии, которые подвергли повторному облучению перед посевом. Они были обработаны в различном режиме - первая получила дозу 5; вторая - 50, третья - 200 Гр. Таким образом, были сформированы три опытные модельные популяции (Р), различающиеся дозой радиационного воздействия:

$P_1 - (5'Гр+5''Гр)$ ;  $P_2 - (5'Гр+50''Гр)$ ;  $P_3 - (5'Гр+200''Гр)$ .

Для сравнения использовали контрольную популяцию (Р<sub>0</sub>), семена которой не подвергались радиационной обработке. Растения после двух циклов острого облучения выращивали в полевых условиях на выравненном фоне при свобод-

ном неконтролируемом переопылении, с размещением 50x50 см. Жизнеспособность модельных популяций определяли по состоянию вегетативной и генеративной продуктивности растений в первые три года жизни, что позволило сравнить реакцию модельных популяций рапонтика на различный радиационный режим при двух последовательных циклах облучения семян.

Оценку изменения радиочувствительности потомства растений после повторных облучений (P<sub>0</sub>, P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>) провели на основании данных лабораторных экспериментов с дополнительным провокационным облучением семян. Для этого по-вариантно с каждой особи собирали по одному соцветию, обмолотили, а полученные семена смешали. Из каждого смешанного образца впоследствии были произвольно отобраны семена для дополнительного провокационного гамма-облучения в дозах 5, 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 Гр. Сразу же после радиационного воздействия семена закладывали в рулончики из фильтровальной бумаги (100 штук на вариант) и проращивали на водопроводной воде в термостате при температуре 22°C. После прорастания семян рулончики с проростками переводили на питательную смесь и выращивали в течение 20 дней на свету в комнатных условиях.

В качестве критериев, характеризующих реакцию модельных популяций на дополнительное облучение, использовали показатели ростовых процессов 20-дневных проростков (длину корня и высоту надземной части). При этом полагали, что если на какой-либо из этих двух показателей дополнительное облучение опытных популяций (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>) окажет меньшее влияние, чем контрольной (P<sub>0</sub>), то можно будет считать эти популяции менее чувствительными к облучению. Для оценки радиочувствительности экспериментальных популяций были получены дозовые кривые роста проростков при остром облучении сухих семян в широком диапазоне доз.

#### Результаты и обсуждение

В таблице приведены данные о продуктивности растений четырех исследуемых модельных популяций рапонтика сафлоровидного при его произрастании в полевых условиях. По изученным показателям растения всех опытных вариантов

Показатели продуктивности особи	Сравнительные данные о продуктивности растений рапонтика сафлоровидного после двукратного облучения семян		
	Год жизни растений	Модельные популяции и дозы облучения, Гр	
		P <sub>0</sub> (0'+0")	P <sub>1</sub> (5'+5")   P <sub>2</sub> (5'+50")   P <sub>3</sub> (5'+200")
Количество вегетативных побегов	Первый	2,0±0,5	2,3±0,4   1,9±0,6   2,2±0,7
Количество вегетативных листьев	"	7,38±0,44	8,53±0,50   8,00±0,76   8,33±1,0
Количество листьев	Второй	50,2±6,0	52,2±5,5   47,8±6,7   57,5±9,4
Величина надземной массы, кг	"	0,52±0,06	0,72±0,16   0,62±0,08   0,68±0,13
Количество генеративных побегов	Третий	0,75±0,27	0,79±0,29   0,84±0,20   1,38±0,22
Семенная продуктивность, г*	-	1,76±0,59	1,92±0,70   2,30±0,49   2,00±0,54
Количество семян в соцветии, шт	-	3,85	4,43   4,86   4,61
Масса 1000 семян, г	-	205,1	209,9   250,5   230,4
Лабораторная всхожесть	-	18,8	21,1   19,4   18,4
	-	41	58   46   53

\* По семенной продуктивности приведены средние данные за два года репродукции.

( $P_1, P_2, P_3$ ) в течение первых трех лет жизни несущественно отличались от растений контрольной популяции ( $P_0$ ). И все же следует обратить внимание на особенности ответной реакции растений популяции  $P_3$ . В ранее проведенных полевых экспериментах было замечено, что однократное предпосевное воздействие на семена дозой 200 Гр обуславливало небольшой угнетающий эффект по некоторым показателям продукционного процесса. В данном же эксперименте доза 200 Гр, примененная во втором цикле облучения семенного материала ( $P_3$ ), не вызвала никаких признаков депрессии. Напротив, отдельные показатели продуктивности растений были значительно выше величины показателей контрольной популяции. По-видимому, предварительное облучение покоящихся семян в дозе 5 Гр в первом цикле облучения оказало модифицирующее влияние на формирование ответной реакции растений рапонтика к последующему облучению в более высокой дозе 200 Гр. Более детальное рассмотрение продукционных процессов в полевом эксперименте в период генеративного развития особей модельной популяции  $P_3$ , когда наиболее полно реализуются отдельные эффекты радиационного воздействия, позволило обнаружить некоторые сдвиги в репродуктивной способности особей этой популяции по сравнению с контрольными растениями популяции  $P_0$ . Если в популяции  $P_0$  среднее количество генеративных побегов на одной особи в первый год плодоношения составило 0,75, то в популяции  $P_3$  оно достигало 1,38. Качество семян, оцениваемое по массе 1000 семян и лабораторной всхожести в этом варианте ( $P_3$ ), было также достаточно высоким (табл.). В целом все данные свидетельствуют о благополучии ростовых и репродуктивных процессов на данном этапе онтогенеза у всех трех исследованных модельных популяций и отсутствии каких-либо изменений в радиочувствительности рапонтика после двух циклов облучения семян в различных режимах.

Для выяснения радиочувствительности семенного потомства рапонтика первой репродукции был проведен специальный лабораторный эксперимент с дополнительным провокационным облучением. Для всех популяций были определены кривые роста надземной части и корневой системы в широком диапазоне гамма-облучения семян дозами 0,5; 10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 1500, 2000 Гр (рис.1). Каждая точка кривой являлась средней из промеров 45-60 проростков.

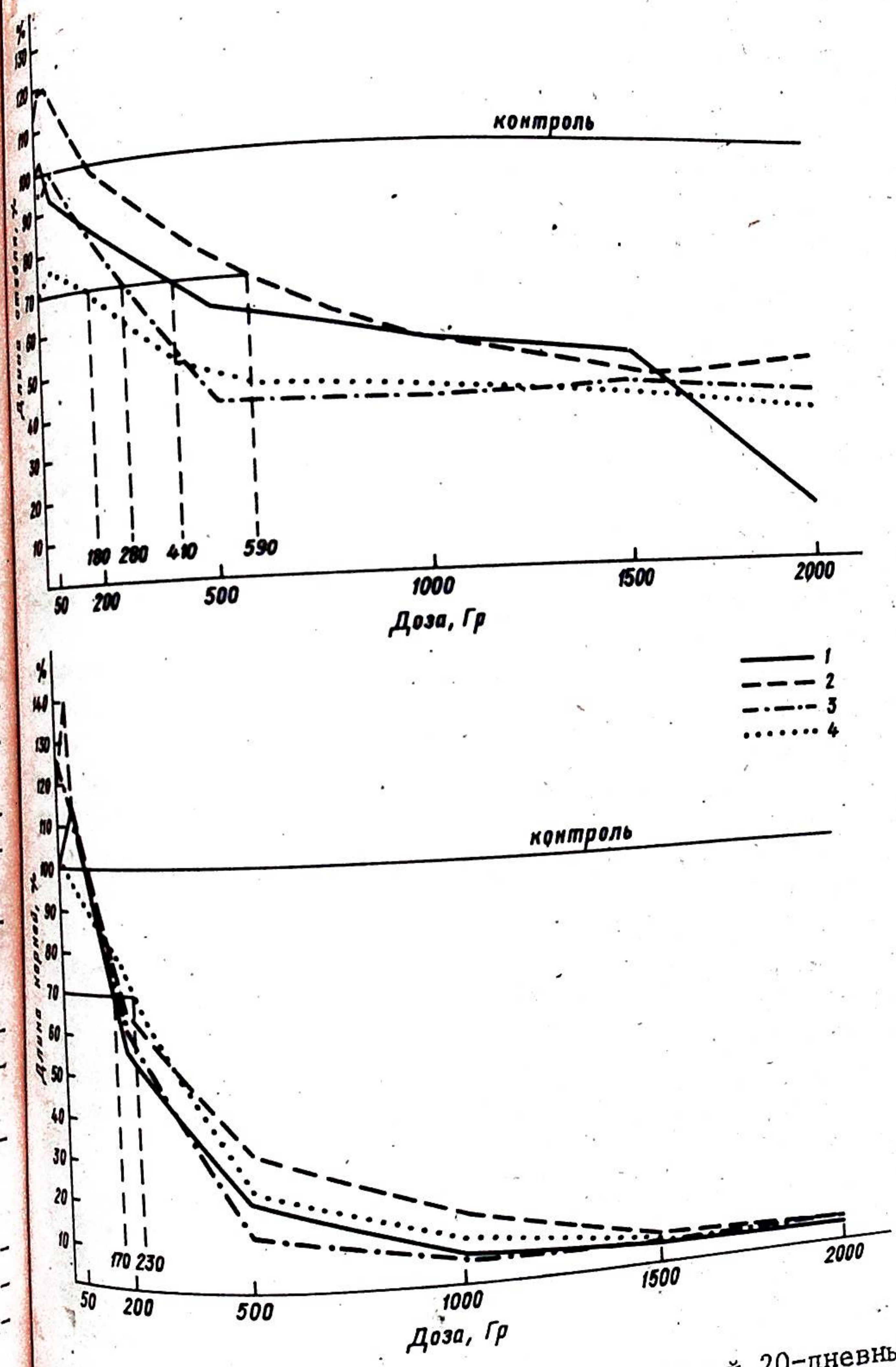


Рис.1. Зависимость длины стебля и корней 20-дневных проростков рапонтика сафлоровидного при провокационном облучении различными дозами сухих семян контрольной ( $P_0$  - 1) и опытных ( $P_1$  - 2,  $P_2$  - 3,  $P_3$  - 4) популяций.

Анализ зависимости длины корней от дозы дополнительного провокационного облучения свидетельствует о практически одинаковом характере хода кривых при обследовании семенного потомства популяций  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$  (рис.16). Для всех растений трех модельных популяций в диапазоне 5-50 Гр наблюдается хорошо выраженный эффект стимуляции. Реакция на дополнительное облучение семенного потомства популяции  $P_3$  отличается от трех предыдущих. Особенно существенны различия в диапазоне малых доз (5-200 Гр), в котором выявлена депрессия ростовых процессов корневой системы проростков. Однако, начиная с дозы 200 Гр, ход кривых для всех четырех модельных популяций становится примерно одинаковым. Можно предположить, что ответная реакция проростков популяции  $P_3$  на дополнительное облучение обусловлена некоторым изменением чувствительности ее семян под действием дозы 200 Гр. Ростовые реакции на облучение надземной части проростков значительно варьируют среди исследованных популяций рапунтика (рис.1а). Отмечено сильное торможение роста у проростков популяции  $P_3$  в диапазоне облучения 5-500 Гр. Поскольку для данного радиоустойчивого вида весьма затруднительно определить дозу, дающую 50% угнетения как корневой, так и надземной части проростков, то в качестве критерия радиочувствительности было решено использовать величину дозы, дающую 30% угнетения роста ( $ДУ_{30}$ ) при остром облучении покоящихся семян. Оказалось, что величина  $ДУ_{30}$  для корневой системы у контрольных и опытных растений примерно одинакова и в среднем близка к 200 Гр (размах изменчивости от 170 до 230 Гр), т.е. все экспериментальные популяции рапунтика сафлоровидного, включая и контрольную, по данному показателю характеризовались одинаковой радиочувствительностью.

Дозы, дающие 30%-ное угнетение высоты проростка в опытных и контрольных вариантах, различались довольно значительно. Для контрольной популяции  $P_0$ - $ДУ_{30}$  равнялась 410 Гр; для опытных популяций отмечается большой размах изменчивости ее от 180 Гр до 590 Гр ( $P_1$  - 590 Гр,  $P_2$  - 280 Гр,  $P_3$  - 180 Гр). Судя по этому показателю, три опытные модельные популяции довольно четко отличались от контрольной по чувствительности ростовой реакции надземной массы на дополнительное облучение. По характеру ростовой реакции надземной массы была выявлена определенная

дифференциация популяций, которая позволила расположить исследуемые популяции в ряд по мере возрастания их радиорезистентности:  $P_3$  - 180 Гр,  $P_2$  - 280 Гр,  $P_0$  - 410 Гр,  $P_1$  - 590 Гр, что графически представлено на рис.1.

Наблюдения за ростовой реакцией 20-дневных проростков подтверждают тот факт, что величина дозы, исследуемая при повторных последовательных облучениях семян, является фактором, способным модифицировать радиобиологический эффект. С этих позиций представляет интерес сравнение индивидуальной изменчивости отдельных признаков в контрольной и опытных популяциях.

Анализ вариационных кривых распределения длины корешка 20-дневных проростков всех модельных популяций в зависимости от дополнительного облучения покоящихся семян в дозе 10 и 200 Гр показывает, что распределение этого показателя у проростков, выросших в условиях чистого контроля ( $P_0$ ), наиболее близко к нормальному (рис.2а). Средняя длина корней для данной популяции равняется 11,3 см, а мода (наиболее часто встречаемый в распределении класс) приходится на 11-13 см.

Кривые распределения данного признака в вариантах  $P_1$ ,  $P_2$  и  $P_3$  существенно отличаются от нормального распределения: появляются асимметричность, двувёршинность, значительно модифицируется диапазон изменчивости изучаемого показателя, смещается мода. Характерные нарушения в ходе вариационных кривых у модельных популяций  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  показывают направление действия фактора (расширение диапазона изменчивости исследуемого признака).

Дополнительное облучение семян популяций  $P_0$ ,  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  в дозах 10 (рис.2б) и 200 Гр (рис.2в) позволяет проследить за характером индивидуальной изменчивости признака "длина корня" в сравнении с рассмотренным выше эффектом последствия последовательного двукратного облучения семян. Влияние дополнительного облучения в дозе 10 Гр на длину корня 20-дневных проростков проявляется у исследуемых популяций по-разному. Небольшая доза облучения оказывает стимулирующее действие на ростовые процессы семян популяций  $P_0$  и  $P_1$ . Для проростков популяции  $P_2$  характерно увеличение размаха изменчивости, снижения эксцесса, изменение формы распределения. В то же самое время это воздействие не влечет за собой существенных изменений индивидуальной изменчивости исследуемого признака у популяции  $P_3$ .

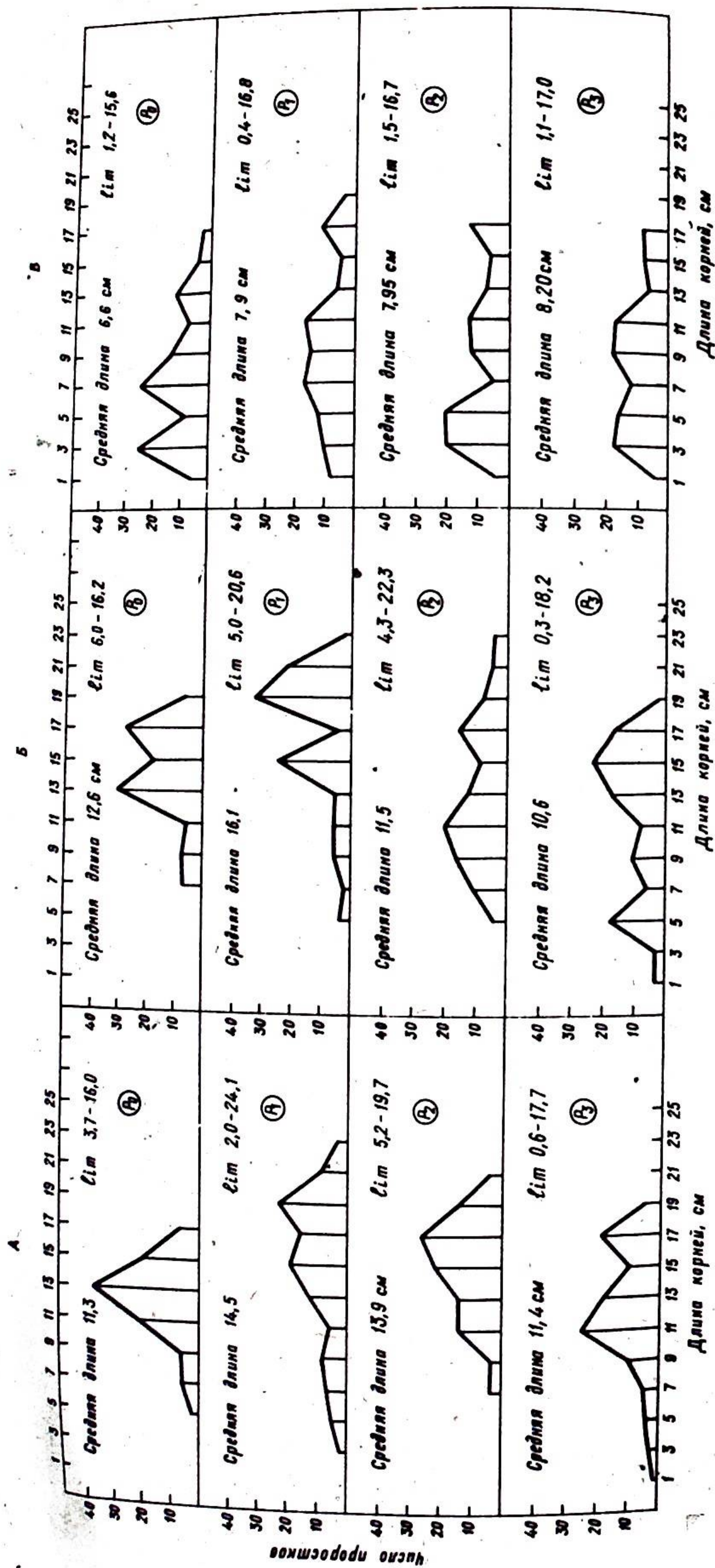


Рис. 2. Распределение по длине корня при дополнительном гамма-облучении 20-дневных проростков рапунтика сафлоровидного, выросших из семян контрольной (P<sub>0</sub>) и опытных (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub>) популяций. (А - 0 Гр; Б - 10 Гр; В - 200 Гр).

Следует отметить определенную специфику ответной реакции экспериментальных популяций на новое провокационное облучение их семенного потомства в дозе 200 Гр. Уровень радиационной депрессии длины корешка при этом изменяется в зависимости от величины дозы предыдущих радиационных воздействий. Если в контрольной популяции (P<sub>0</sub>) радиационная депрессия достигает 41,6% (в ответ на первое однократное воздействие), то в популяциях P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub>, P<sub>3</sub> уровень депрессии варьирует от 30% в P<sub>1</sub> до 29,6% в P<sub>2</sub> и 27,4% в P<sub>3</sub>. По-видимому, два предварительных цикла облучения и величина дозы радиационного воздействия оказали влияние на изменение скорости ростовых процессов 20-дневных проростков. Следует подчеркнуть, что уровень радиационной депрессии достоверно различался от контрольной только у популяции P<sub>3</sub>.

#### Выводы

Анализ экспериментальных данных показывает, что жизнеспособность и продуктивность модельных популяций рапунтика сафлоровидного (P<sub>1</sub>, P<sub>2</sub> и P<sub>3</sub>) - многолетнего травянистого поликарпического растения, подвергнутых острому двукратному циклу облучения семенного материала в диапазоне доз для P<sub>1</sub> - (5'Гр+5''Гр), для P<sub>2</sub> - (5'Гр+50''Гр), для P<sub>3</sub> - (5'Гр+200''Гр), не отличаются от тех же показателей у растений контрольной популяции.

На основе лабораторных экспериментов выявлена возможность модификации радиационных эффектов в зависимости от дозовых нагрузок при предварительных облучениях. Дополнительное провокационное облучение семенного потомства модельных и контрольной популяций позволило на начальных этапах развития выявить различия в ростовой реакции надземной массы проростков и их радиочувствительности. Двукратное облучение семян рапунтика в дозах 5 Гр + 200 Гр обуславливает более высокую устойчивость их к новому острому облучению в дозе 200 Гр по сравнению с контрольными, не подвергавшимися радиационному воздействию.

Последовательное облучение семенного потомства в режиме невысоких доз (5-10 Гр) не приводит к существенным отклонениям продуктивности растений рапунтика сафлоровидного и изменению их радиочувствительности.

1. Ахунд-Заде И.М. Радиобиологический и мутагенный эффект гамма-облучения у различных сельскохозяйственных растений // Генетика и селекция в Азербайджане. Баку, 1979. - С.3-16.
2. Формирование радиобиологической реакции растений / Д.М.Гродзинский, К.Д.Коломиец, И.Н.Гудков и др. - Киев: Наукова думка, 1984. - 216 с.
3. Корнеев Н.А., Поваляев А.П., Алексахин Р.М. Основные достижения и проблемы сельскохозяйственной радиологии в свете решения актуальных задач сельскохозяйственной науки и производства // 1-я Всесоюзная конф. по с-х. радиологии: Тез.докл. - М., 1979. - С.3-8.
4. Мухин В.П., Аброськин Н.И. Радиочувствительность рапонтика сафлоровидного // Изв. ТСХА. - 1976. - №6. - С.61-69.
5. Позолотин А.А., Альшиц Л.К. Изменение радиочувствительности семян гороха под влиянием малых доз облучения // Радиозкологические исследования почв и растений. - Свердловск, 1975. - С.93-99.
6. Турбин Н.В., Володин В.Г., Горлей И.А. Гетерозис и радиоустойчивость растений. - Минск: Наука и техника, 1977. - 152 с.
7. Фролова Н.П., Фролов Ю.М., Таскаев А.И. Влияние предпосевного гамма-облучения на рост, развитие и урожайность рапонтика сафлоровидного в условиях Коми АССР // Растительные ресурсы. - 1984. - Т.20.- Вып. 1. - С.74-81.
8. Фролова Н.П., Фролов Ю.М., Таскаев А.И. Последствие ионизирующей радиации на продуктивность рапонтика сафлоровидного при его семенном размножении // Радиация как экологический фактор при антропогенном загрязнении. - Сыктывкар, 1984. - С.115-121. (Тр./АН СССР, Коми фил., Ин-т биологии; Вып. 67).
9. Vasti S.M., Jensen J. Radiosensitivity of a recurrently irradiated barley population // Environmental and Experimental Botany. - 1984. - V. 24. - P.9-15.
10. Steuckardt R. Untersuchungen über Wirkung von Röntgenstrahlen auf Rispenhirse (*Panicum miliaceum* L.) nach einmaliger und mehrfacher Bestrahlung. II Die Chlorophyllmutationsspektrum nach mehrfach wiederholter Bestrahlung // Pflanzenzucht. - 1960. - V.43. - N 3. - S. 297-322.

## "ДОЗА-ЭФФЕКТ" В ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТОВ МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ

В.Г.Зайнуллин

Проблема действия малых доз ионизирующего излучения на биологические объекты привлекает все большее внимание, становясь одной из центральных проблем радиобиологии. Однако существующие на сегодняшний день способы оценки эффективности малых доз определяются в основном позицией исследователя, а эффект малых доз вычисляется на основе экстраполяции к нулю линейной зависимости "доза-эффект", полученной в экспериментах с большими дозами. В этом случае никакой проблемы с малыми дозами не возникает - всегда можно рассчитать величину биологического эффекта. С другой стороны, при объяснении сигмоидной зависимости эффекта от дозы проблема доз сводится к проблеме определения порога предельно допустимых доз облучения, ниже которого биологический эффект не проявляется.

Серьезным аргументом против неограниченного использования приема экстраполяции является общепризнанное положение о различиях в механизмах чувствительности организма к действию агента в больших и малых дозах [4, 5]. Поэтому возникает вопрос о правомерности применения в радиобиологических исследованиях критерия "летальная доза" - критерия, который, на наш взгляд, характеризует скорее не радиочувствительность организма, а его радиопоражаемость.

Синонимичность понятий чувствительности и поражаемости возможна, по-видимому, только при таких условиях доз, когда единственно возможной реакцией живой системы на воздействие остается ее инактивация. Поэтому следует разделить понятия радиопоражаемости и радиочувствительности. По-видимому, вводить дополнительное определение

критерия поражаемости нет необходимости. Радиочувствительность же мы понимаем как степень восприимчивости клеток, тканей, органов, организмов и т.д. к воздействию ионизирующего излучения. Поскольку любой из этих объектов исследований является частью живой системы, возможность фиксации биологического эффекта будет зависеть от многих факторов, в том числе и необязательно прямо связанных с изучаемым эффектом. Из этого положения исходит "структурно-метаболическая теория" в объяснении радиобиологических эффектов [6].

Согласно теории, при облучении (даже в малых дозах) изменяется не только структура, играющая ведущую роль в наблюдаемом эффекте, но и другие структуры и метаболические реакции, участвующие в регуляции биологических процессов. Реакция живой системы на облучение может быть как "положительная" (стимулирующий эффект), так и отрицательная (угнетающее действие радиации), т.е. существует реальная возможность обнаружения противоположного по своим эффектам действия больших и малых доз радиации. Вероятно, такая неоднозначность реакции организма на действие фактора (граница между малыми и большими дозами весьма условна и приближительна) и приводит к нередко наблюдаемым несоответствиям в определении величин инактивационных доз [8, 10] и делает проблематичным возможность использования LD50 в определении чувствительности.

Как известно, при изучении механизмов радиочувствительности широко используется дрозофила. В ходе исследований накоплена обширная информация о радиочувствительности этого объекта, в частности, о зависимости выхода радиоиндуцированных мутаций от величины дозы. Анализ последней позволяет нам высказать следующие соображения относительно закономерностей в реализации биологического эффекта при облучении в разных дозах.

Согласно нашим исследованиям [7], экспериментальные данные по изучению динамики выхода рецессивных, сцепленных с полом летальных мутаций (РСЛМ) в условиях облучения сверхмалыми дозами (до 0,25 Гр) не укладываются в "кривую" прямо пропорциональной зависимости. При "малых" сверхмалых дозах уровень индуцированных РСЛМ лежит выше условной линии регрессии ( $y = a + bx$ ), при средних сверхмалых дозах - ниже, при "больших" (до 0,25 Гр) - вблизи линии регрессии (рис.). Далее кривую зависимости можно продолжить, основываясь на данных других авторов [1, 2, 3].

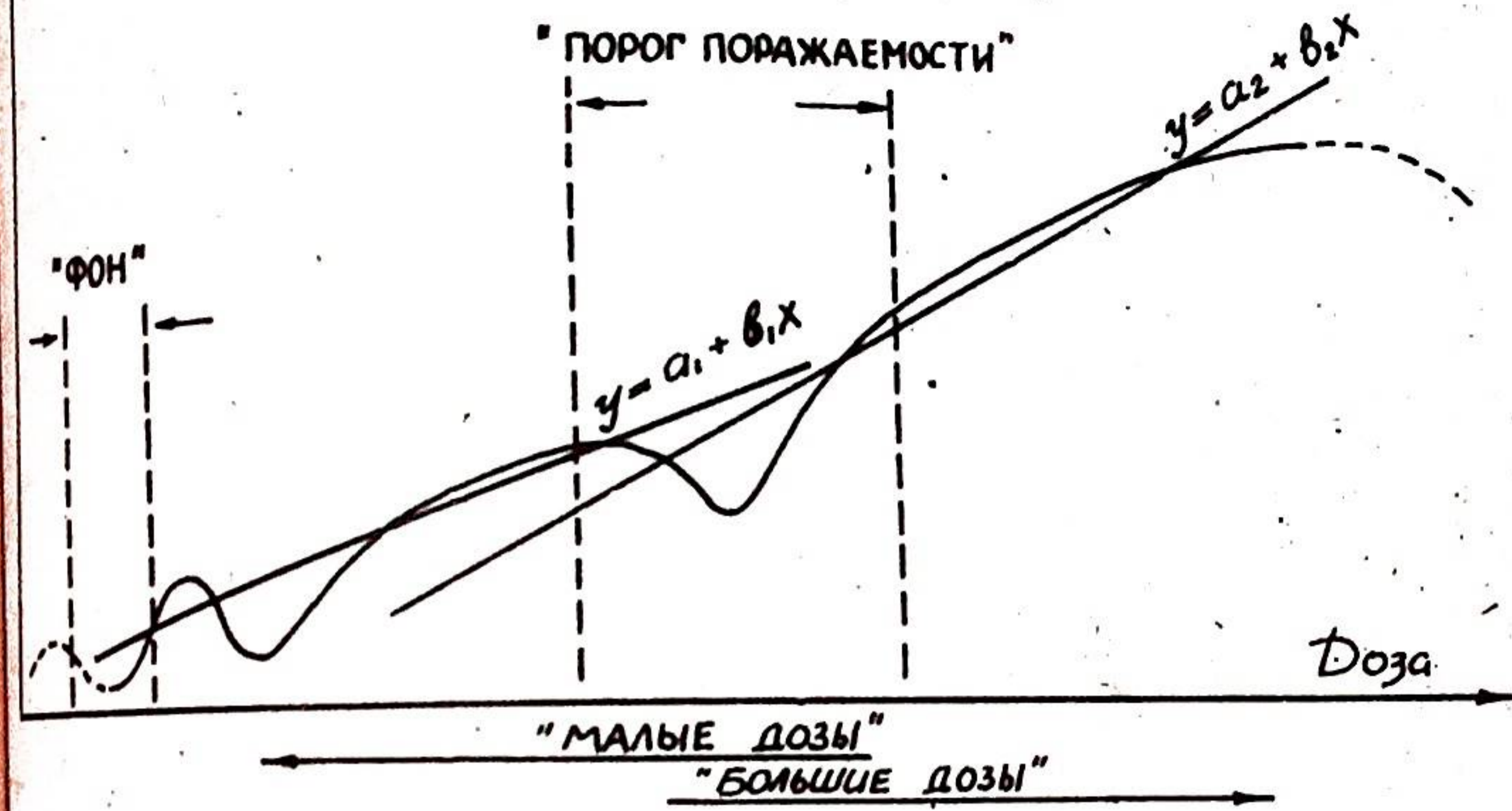


Рис. Зависимость выхода рецессивных, сцепленных с полом летальных мутаций от величины дозы облучения.

Как правило, линейная зависимость от дозы характерна для больших доз; при относительно малых дозах (1-10 Гр) зависимость имеет вид, аналогичный кривой зависимости, обнаруживаемой при облучении сверхмалыми дозами. По-видимому, объяснить спад частоты РСЛМ в первом случае можно активацией систем репарации. Дальнейшее нарастание частоты идет уже в условиях "регистрируемого биологического эффекта" - так называемый порог "поражаемости" в сигмоидной кривой. Последующее снижение уровня летальных мутаций (в цитируемых работах велся анализ частот РСЛМ) возможно за счет инактивации наиболее чувствительной части клеток [1, 2, 3].

Дальнейший рост частоты мутаций в зависимости от дозы, по-видимому, должен быть ограничен самой дозой - т.е. той дозой, которая приводит к инактивации живой системы.

Характер кривой выхода РСШМ в условиях низкого "отрицательного" фона (ниже естественного фона) экспериментально не показан. По крайней мере, нам не известна литература, посвященная этому. Однако, принимая во внимание работы [6, 9], можно предположить, что уровень мутаций в условиях естественного фона будет отличаться от такового в экспериментах с экранированием естественного фона. Это требует экспериментальной проверки.

В случае справедливости нашего предположения о ходе кривой в области низкого ("отрицательного") фона факт беспороговости действия радиации при индукции мутаций можно будет считать очевидным, что, как следует из анализа рассмотренных нами данных, не исключает существования порога для поражающего действия радиации.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бельговский М.Л., Абелева Э.А., Потехина Н.А. Характер зависимости частоты леталей, возникающих на разных стадиях сперматогенеза, от дозы рентгеновских лучей // Докл. АН СССР. - 1959. - Т.124, - С. 922-924.
2. Бельговский М.Л. Зависимость радиочувствительности хромосом животных от стадии развития половых клеток // Итоги науки. - М.: Изд-во АН СССР, 1960. - Т.3. - С. 123-131.
3. Ватти К.В. О зависимости частоты мутаций от дозы облучения в связи с чувствительностью стадий сперматогенеза // Генетика. - 1965. - №4. - С. 94-99.
4. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующего излучения на биологические процессы. - М.: Атомиздат, 1977. - 133 с.
5. Кузин А.М. О различии ведущих молекулярных механизмов в больших и малых дозах // Изв. АН СССР. Сер. биол. - 1980. - №6. - С. 883-890.
6. Кузин А.М. Структурно-метаболическая теория в радиобиологии. - М.: Наука, 1986. - 284 с.
7. Генетические эффекты, индуцированные в популяциях дрозофилы при хроническом гамма-облучении / А.О.Ракин, Е.Н.Мяснянкина, М.В.Генералова, В.Г.Зайнуллин // Молекулярные механизмы радиационного мутагенеза: Тез. докл. Всес.совещ. - М., 1988.

8. Fertit B., Dertinger H., Coirdi A., Maisie E.P. Mean inactivation dose: A useful concept for intercomparison of human cell survival curves // Radiat.Res. - 1984. - V.99. - N.1. - P.73-84.
9. Planel G., Soleilhavoup I.P., Tixador R. Demonstration of a stimulation effect of natural ionizing radiation and of very low radiation doses on cell multiplication // Biological and Environmental effects of Low-Level Radiation. Vienna IAEA. - 1976. - P.127-140.
10. Tucker S.L. Is the mean inactivation dose a good measure of cell radiosensitivity // Radiat.Res. - 1986. - V.105. - N.1. - P. 18-26.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ  
НА ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КЛЕТКИ  
С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
КОМПОНЕНТЫ С ВЫСОКОЙ ЛПЭ  
ПО ОТНОШЕНИЮ К КОМПОНЕНТЕ С НИЗКОЙ ЛПЭ  
В ПРЕДЕЛАХ ОДНОГО ВИДА ИЗЛУЧЕНИЯ

В.И. Сусликов, Вал.Г. Зайнуллин, П.А. Бородкин,  
Л.А. Башлыкова

Относительная биологическая эффективность (ОБЭ) в радиобиологии понимается как отношение равноэффективных по биологическому эффекту доз — поглощенной дозы эталонного рентгеновского излучения с граничной энергией 200 кэВ к поглощенной дозе рассматриваемого вида ионизирующей радиации [8]. Величина ОБЭ, определяемая таким способом, как правило, непостоянна и зависит от величины биологического эффекта или дозы облучения. В радиационной цитогенетике такое непостоянство ОБЭ вытекает из того факта, что при излучениях с низкой и средней величиной линейной потери энергии (ЛПЭ) часть генетических повреждений пропорциональна квадрату дозы, а при действии излучений с высокой ЛПЭ зависимость от дозы имеет линейный характер [3; 4, с.172; 7; 12]. Поэтому для определения величины ОБЭ используют или специфически узкий диапазон доз, или определенную величину биологического эффекта [4, с.176]. Кроме того, такое непостоянство ОБЭ затрудняет использование этого понятия как константы для оценки действия комбинации радиационных факторов. Поэтому в дополнение к существующему понятию ОБЭ мы предлагаем ее модификацию, величина которой не будет зависеть от уровня биологического эффекта и действующего фактора. В общем виде зависимость эффекта "у" от дозы (Д) радиационного воздействия в диапазоне относительно малых ее величин может быть описана в виде:

$$y = \phi + A \cdot D + B \cdot D^2, \quad (1)$$

где  $\phi$  — фоновый уровень эффекта;  $A$  ( $A \geq 0$ ) — константа, характеризующая скорость увеличения радиационных повреждений, вызванных высокоионизирующей компонентой с высокой ЛПЭ и возникающих по одноударному механизму;  $B$  ( $B \geq 0$ ) — константа скорости прироста радиационных повреждений, которые возникают под влиянием низкоионизирующей компоненты с низкой величиной ЛПЭ по двухударному механизму.

Поскольку очевидно, что соотношение (1) верно только в ограниченном диапазоне доз, вместо него можно использовать его обобщение, справедливое при всех уровнях облучения:

$$y = y(D) = \phi (a \cdot t \cdot D + b \cdot ((1-t) \cdot D)^2), \quad (2)$$

где  $y$  — функция, одинаковая для всех видов ионизирующего излучения;  $t$  — доля дозы, приходящаяся на высокоионизирующую компоненту. Вид соотношения (2) указывает на то, что механизм процесса, обуславливающий величину фонового уровня, предполагается не зависящим от радиационного и того, что две вышеупомянутые компоненты на уровне неких промежуточных радиационных изменений являются одинаковыми по одному из свойств, ответственных за радиобиологический эффект  $y$ , и поэтому их величины ( $a \cdot t \cdot D$  и  $b \cdot ((1-t) \cdot D)^2$ ) складываются аддитивно, при этом  $A = a \cdot t$ ,  $B = b \cdot (1-t)^2$ .

Уравнение (2) подсказывает следующую модификацию понятия ОБЭ, не зависящую от уровня биологического эффекта. В качестве такой характеристики, аналогичной понятию ОБЭ, мы предлагаем использовать относительную биологическую эффективность компоненты с высокой (в) ЛПЭ в сравнении с компонентой излучения с низкой (н) ЛПЭ ( $ОБЭ_{в,н}$ ). Такое толкование ОБЭ позволяет говорить о ее величине даже в пределах одного эталонного излучения. Действительно, известно, что при взаимодействии рентгеновского излучения с облучаемым объектом возникают так называемые дельта-электроны, в конце трека которых ЛПЭ повышена [4, с.174].

Итак, под величиной ОБЭ компоненты с высокой ЛПЭ по отношению к эталонной компоненте с низкой ЛПЭ предлагаем использовать величину, зависящую от коэффициентов "а" и "б" в уравнении (2):

$$ОБЭ_{в,н} = a / \sqrt{b}.$$

Ее можно интерпретировать и как отношение эффективности одной ионизации (первичного повреждения) - единицы поглощенной дозы в компоненте с высокой ЛПЭ - к эффективности одного аналогичного повреждения в компоненте с низкой ЛПЭ. Косвенный метод оценки ОБЭ (в нашей модификации) обсуждается в настоящей статье на материале исследований изменений хромосом в клетках костного мозга полевок-экономок (*Microtus oeconomus* Pall.), обитающих в условиях техногенного загрязнения комплексом радиоактивных веществ и тяжелых металлов [2].

### Материал и метод

Полевок отлавливали на двух участках, сходных по экологическим условиям, за исключением уровня радиационного загрязнения. Мощность экспозиционной дозы внешнего облучения на участках с техногенно повышенной радиоактивностью варьировала в пределах от 4,3 до 216 пКл/(кг·с) и составляла в среднем  $51,6 \pm 5,5$  пКл/(кг·сек) на первом участке и  $1,48 \pm 0,08$  пКл/(кг·сек) - на втором. Содержание  $^{226}\text{Ra}$  в теле мышей находилось в пределах от  $3,4 \cdot 10^{-13}$  до  $1,54 \cdot 10^{-11}$  г/г золы. Хромосомные препараты готовили по общепринятой методике [1].

Косвенный метод определения величины ОБЭ<sub>В,н</sub> заключался в следующем. Зависимость генетического эффекта от дозы воздействия описывали функцией вида:

$$y = \begin{cases} c_5, & \text{при } D < c_1 \\ c_5 - (c_5 - c_6) \cdot ((D - c_1) / (c_2 - c_1)) c_8 \cdot c_9 c_8^{-1}, & \text{при } c_1 \leq D < TP_1 \\ c_6 + (c_5 - c_6) \cdot ((c_2 - D) / (c_2 - c_1)) c_8 \cdot (c_9 / (c_9 - 1)) c_8^{-1}, & \text{при } c_2 > D \geq TP_1 \\ c_6, & \text{при } c_2 \leq D < c_3 \\ c_6 + (c_7 - c_6) \cdot ((D - c_3) / (c_4 - c_3)) c_{10} \cdot c_{11} c_{10}^{-1}, & \text{при } c_3 \leq D < TP_2 \\ c_6 - (c_7 - c_6) \cdot ((c_4 - D) / (c_4 - c_3)) c_{10} \cdot (c_{11} / (c_{11} - 1)) c_{10}^{-1}, & \text{при } c_4 > D \geq TP_2 \\ c_7, & \text{при } D \geq c_4 \end{cases} \quad (4)$$

при ограничениях:  $0 \leq c_1 \leq c_2 \leq c_3 \leq c_4$ ;  $c_5 \geq c_6 \leq c_7$ ;  $c_6 \geq 0$ ;  $c_8 \geq 1$ ;  $c_9 > 1$ ;  $c_{10} \geq 1$ ;  $c_{11} > 1$ , где  $TP_1 = c_1 + (c_2 - c_1) / c_9$ ;  $TP_2 = c_3 + (c_4 - c_3) / c_{11}$ ;  $y$  - величина генетического эффекта;  $c_1$  - пороговая величина дозы радиационного воздействия,

... которой дозы являются не действующими по изучаемому биологическому показателю;  $c_2 - c_{11}$  - другие параметры кривой. Эффективную дозу радиационного воздействия (Эфф) как функцию двух факторов - радия и (или) внешнего гамма-излучения представляли в одном из трех видов зависимостей:

$$a_1 \cdot t_1 \cdot C_{\text{Ra}} + b_1 \cdot ((1 - t_1) \cdot C_{\text{Ra}})^2, \quad (5)$$

$$a_2 \cdot t_2 \cdot C_{\text{Ra}} + b_2 \cdot ((1 - t_2) \cdot C_{\text{Ra}})^2 + a_3 \cdot t_3 \cdot D_{\gamma} + b_3 \cdot ((1 - t_3) \cdot D_{\gamma})^2, \quad (6)$$

$$a_4 \cdot (t_4 \cdot k_1 \cdot C_{\text{Ra}} + t_5 \cdot k_2 \cdot D_{\gamma}) + b_4 \cdot ((1 - t_4) \cdot k_1 \cdot C_{\text{Ra}} + (1 - t_5) \cdot k_2 \cdot D_{\gamma})^2, \quad (7)$$

где  $a_i$  и  $b_i$  ( $i=1-4$ ) - коэффициенты, характеризующие эффективность двух компонент факторов,  $t_i$  ( $i=1-5$ ) - доли факторов, приходящиеся на компоненту с низкой ЛПЭ;  $k_1$  и  $k_2$  - коэффициенты, учитывающие различные размерности факторов, при этом один из них введен только из соображений симметрии выражения (7). Величины отношений  $a_i / b_i$  ( $i=1-4$ ) служили в качестве оценок ОБЭ<sub>В,н</sub>,  $C_{\text{Ra}}$  - концентрация радия,  $D_{\gamma}$  - мощность дозы внешнего гамма-излучения.

Выбор настоящих моделей был сделан с целью проверки некоторых предположений. По модели (4,5) предполагается, что изучаемый генетический эффект обусловлен только действием инкорпорированного радия и обе его вышеупомянутые компоненты действуют аддитивно. Гипотеза о различных механизмах образования четырех одинаковых промежуточных изменений при воздействии внешнего гамма-облучения и инкорпорированного радия лежит в основе модели (4,6) (модель аддитивного сложения одинаковых промежуточных изменений, обуславливающих биологический эффект). Модифицированная гипотеза предполагается по модели (4,7).

Нахождение оптимальных значений параметров и их среднеквадратичных ошибок для трех моделей, описывающих комбинированное воздействие компонент с различными ЛПЭ, осуществляли на ЭВМ по специально разработанной нами программе. Величины параметров определяли, используя экспериментальные данные (см. табл.1, графу 6), а среднеквадратичные ошибки параметров - данные 100 машинных экспериментов. Для этого сначала строили ориентировочное распределение величин, характеризующих индивидуально выбранное животное, для чего подбирали группы полевок, которые подвергались одинаковому радиационному воздействию. Для каждой из этих однородных групп строили распределе-

ние отклонений (в процентах) показателя относительно его средней величины. Общее распределение получили после объединения предполагавшихся одинаковыми указанных распределений. Затем проводили машинный эксперимент, в результате которого вместо значения показателя, полученного экспериментатором, находили ожидаемое. Последнее (для j-го значения показателя) получали следующим образом. Используя вышеупомянутое распределение, случайно выбирали возможное отклонение  $O_j$ . Оценивали вероятную частоту возникновения анализируемых нарушений - как точную характеристику выбранного животного - по формуле:

$$P_j = U_{э,j} \cdot O_j + U_{э,j} \quad (8)$$

где  $U_{э,j}$  - частота возникновения генетических нарушений, измеренная экспериментатором. Далее, пользуясь полученной величиной ( $P_j$ ) и биномиальным распределением, находили ожидаемый цитогенетический эффект, который мог быть измерен у этого случайно выбранного животного при анализе того же количества клеток костного мозга, что и в реальном эксперименте, т.е. вышеупомянутую величину показателя, характеризующую индивидуально каждое животное. Полученные в результате 100 таких машинных экспериментов "данные" служили материалом для нахождения распределений отклонений параметров моделей от их оптимальных значений. Ввиду асимметрии указанного распределения для оценки точности определения параметров использовали средние квадратичные отклонения от найденного оптимального значения отдельно для каждого из обоих плеч распределения. Оценки производных величин (степени превышения максимального воздействия над пороговым, вклад гамма-облучения в эффективную дозу радиационного воздействия) проводили подобным образом. Для устранения систематического смещения оценок параметров, обусловленного накладываемыми на параметры моделей ограничениями, величину ОБЭ<sub>в,н</sub> определяли не как отношение (3) - по результату аппроксимации моделями экспериментальных данных, а более точно - как среднее геометрическое значений, полученных по каждому из 100 вышеуказанных машинных экспериментов, по формуле:

$$ОБЭ_{в,н} = \exp\left(\frac{1}{100} \sum_{j=1}^{100} (\ln a_{ij} - 0,5 \cdot \ln b_{ij})\right) \quad (9)$$

Дисперсию ОБЭ<sub>в,н</sub> находили, используя результаты 100 ранее проведенных машинных экспериментов. Из них случайно выбирали 100 значений, для которых по формуле (9) определяли значение ОБЭ<sub>в,н</sub>. Дисперсия полученных таким способом 100 значений ОБЭ<sub>в,н</sub> служила в качестве оценки среднеквадратичного отклонения величины ОБЭ<sub>в,н</sub>.

### Результаты и обсуждение

Все экспериментальные данные приведены в табл.1 и на рисунке. В табл.1 приведены также расчетные значения цитогенетического эффекта для самцов-сеголеток. Как показано на рисунке, все экспериментальные данные могут быть разделены на 4 группы. В первые две входят величины цитогенетического показателя, полученные при анализе хромосомного аппарата костного мозга самок. Если провести две ломаные линии, аппроксимирующие данные цитогенетического обследования только сеголеток или только перезимовавших самок, то легко убедиться (см.рис.) в том, что практически все точки зависимости 1 расположены выше, чем точки линии 2. Результатов цитогенетического обследования самцов меньше. Однако и в этом случае, если провести линии, аппроксимирующие зависимости цитогенетического показателя от концентрации радия в теле сеголеток или перезимовавших животных, можно убедиться в том, что линия 3, характеризующая дозовую зависимость показателя от содержания радия у трех самцов-сеголеток, расположена правее и выше, чем линия 4, соединяющая показатели, полученные при цитогенетическом анализе клеток костного мозга трех перезимовавших самцов. Такое однотипное распределение результатов, полученных при анализе животных обоего пола, позволяет утверждать, что радиочувствительность сеголеток по данному тесту больше, чем перезимовавших особей. Действительно, величины показателя цитогенетического эффекта у самцов-сеголеток в области малых концентраций радия (до  $9,2 \cdot 10^{-13}$  г/г золы) в 5 случаях из 6 больше, чем 3 аналогичные величины у перезимовавших животных, а у самцов-сеголеток - 3 величины показателя при содержаниях радия, ближайших к  $1,29 \cdot 10^{-11}$  г/г золы, больше, чем две величины показателя у перезимовавших животных. Вероятность случайно получить такое расположение точек равна 0,005 (0,15·0,35). Последние два числа полу-

Доля гиподиплоидных клеток  
в костном мозге полевок-экономок  
при различных уровнях  
техногенного радиоактивного загрязнения

Таблица 1

Пол	Возраст	Концентрация радия в теле мышь, $\times 3,4 \cdot 10^{-13}$ г/г золы	Мощность дозы внешнего гам- ма-облучения, пКл/(кг·с)	Количество кле- ток	Процент гипо- диплоидных кле- ток	Аппроксимирующее значение экспе- риментальных данных		
						мо- дель (4,5)а	мо- дель (4,6)б	мо- дель (4,7)в
самцы	п	9,4	51,6±5,5	49	4,1	-	-	-
	п	38,0	"	145	5,5	-	-	-
	п	38,0	"	118	5,1	-	-	-
самки	п	1,3	1,48±0,08	101	4,9	-	-	-
	п	2,4	"	106	3,8	-	-	-
	п	2,4	"	125	4,0	-	-	-
	п	40,0	51,6±5,5	36	5,5	-	-	-
	п	40,0	"	196	3,6	-	-	-
самцы	с	26,5	"	43	11,6	-	-	-
	с	45,0	"	114	15,8	-	-	-
	с	45,0	"	32	9,4	-	-	-
	с	1,0	1,48±0,08	77	9,1	9,1	9,1	9,1
самки	с	1,8	"	63	7,9	7,6	7,6	7,8
	с	2,5	"	231	6,1	5,6	5,6	5,6
	с	2,5	"	112	5,3	5,6	5,6	5,6
	с	2,5	"	84	3,7	5,6	5,6	5,6
	с	2,7	"	94	6,4	5,3	5,3	5,3
	с	12,6	51,6±5,5	78	3,8	3,9	3,9	3,9
	с	16,0	"	104	9,5	9,5	9,5	9,5

Коэффициент прямолинейной корреляции  
между экспериментальными и аппрокси-  
мирующими значениями

0,92 0,92 0,92

Пояснение к таблице.

а) Оптимальные значения параметров для модели (4,5):  
 $c_1=0,28$ ;  $c_2=5,7$ ;  $c_3=12,6$ ;  $c_4=31,3$ ;  $c_5=0,092$ ;  $c_6=0,039$ ;  
 $c_7=0,21$ ;  $c_8=4,1$ ;  $c_9=4,0$ ;  $c_{10}=5,5$ ;  $c_{11}=5,9$ ;  $a_1=1,5$ ;  
 $b_1=0,61$ ;  $b_1=0,036$ ;  
б) То же, для модели (4,6):  
 $c_1=0,12$ ;  $c_2=5,2$ ;  $c_3=15,3$ ;  $c_4=67,1$ ;  $c_5=0,093$ ;  $c_6=0,039$ ;  
 $c_7=0,43$ ;  $c_8=3,25$ ;  $c_9=3,1$ ;  $c_{10}=8,8$ ;  $c_{11}=12,5$ ;  $a_2=1,75$ ;  
 $b_2=0,55$ ;  $b_2=0,051$ ;  $a_3=0,018$ ;  $t_3=0,43$ ;  $b_3=0,0016$ .  
в) То же, для модели (4,7):  
 $c_1=0,61 \pm 0,05$ ;  $c_2=4,9 \pm 1,4$ ;  $c_3=9,4 \pm 4,0$ ;  $c_4=22,7 \pm 15,5$ ;  
 $c_5=0,091 \pm 0,01$ ;  $c_6=0,038 \pm 0,002$ ;  $c_7=0,13 \pm 0,02$ ;  $c_8=6,2 \pm 0,6$ ;  
 $c_9=8,3 \pm 0,8$ ;  $c_{10}=6,4 \pm 0,5$ ;  $c_{11}=6,0 \pm 1,9$ ;  $a_4=1,3 \pm 0,3$ ;  
 $t_1=0,97 \pm 0,4$ ;  $t_4=0,48 \pm 0,03$ ;  $b_4=0,0052 \pm 0,04$  (-0,0017);  
 $t_2=0,047 \pm 0,001$ ;  $t_5=0,78 \pm 0,02$ .  
г) перезимовавшие, д) сеголетки.

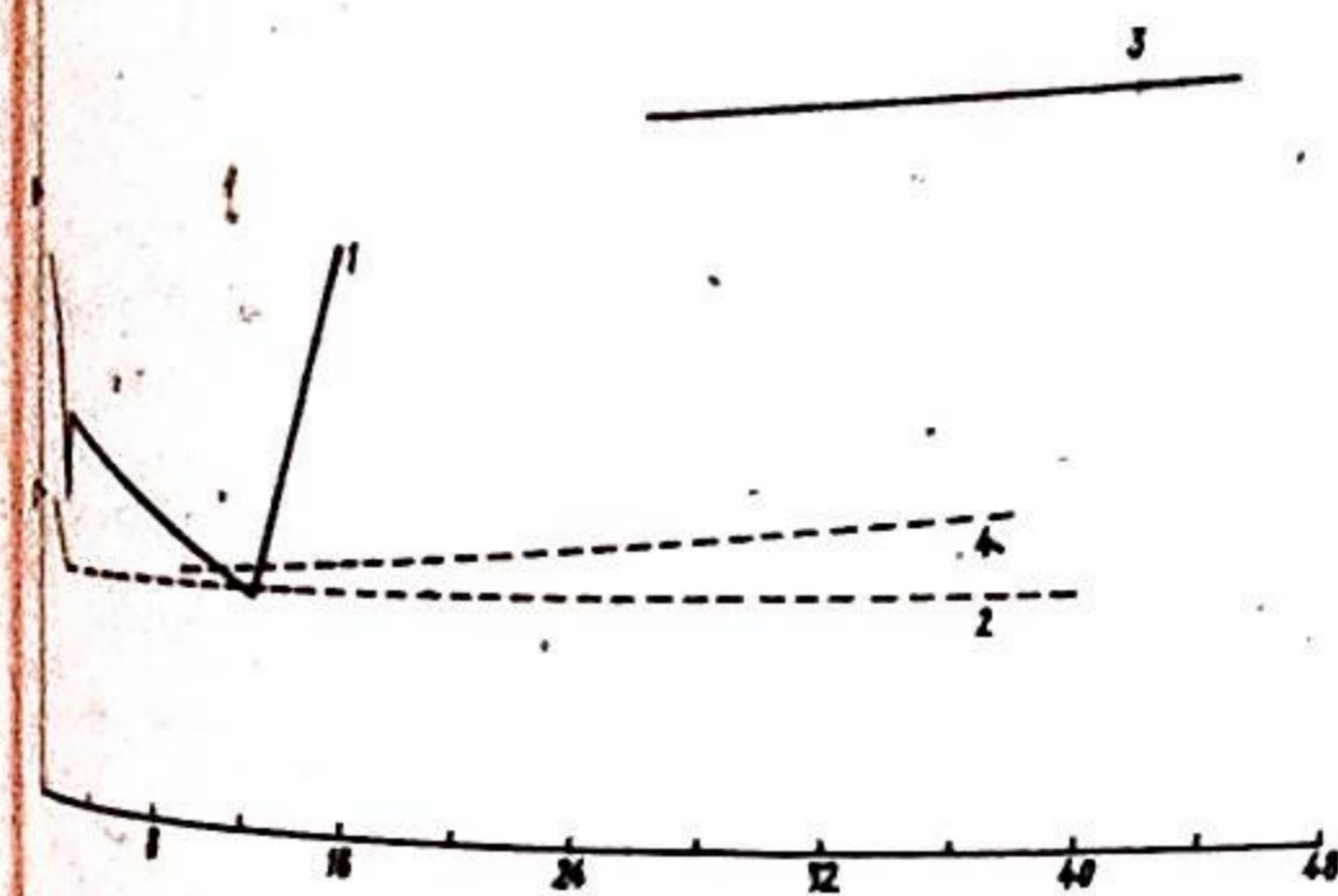


Рис. Зависимость процента гиподиплоидных клеток в костном мозге полевок-экономок от количества инкорпорированного радия. 1 - самки-сеголетки, 2 - перезимовавшие самки, 3 - самцы-сеголетки, 4 - перезимовавшие самцы. Ось абсцисс - количество инкорпорированного радия в долях от  $3,4 \cdot 10^{-13}$  г/г золы тушки. Ось ординат - число гиподиплоидных клеток.

ченны по методу, изложенному в работах [10, 11]. Каждое из них характеризует вероятность случайно получить распределение чисел в двух 4-польных таблицах:

5	0
1	3

и

3	0
0	2

Обращает на себя внимание и необычная зависимость величины данного показателя от содержания радия в теле животного в диапазоне его малых концентраций: уменьшение цитогенетического эффекта при увеличении содержания радия в организме. Тем не менее, такая зависимость, по-видимому, достоверна.

Полученный выше вывод о неслучайном распределении данных на 4 группы позволяет проводить оценку степени достоверности такой необычной зависимости отдельно по результатам цитогенетического обследования только самок-сеголеток, только перезимовавших самок и, наконец, суммарно. Итак, вероятность того, что при наименьшем содержании радия у самки-сеголетки величина показателя могла случайно оказаться самой высокой - 9,1, по сравнению с 6 остальными (7,9; 6,1; 5,3; 3,7; 6,4; 3,8), равна 1/7. Вероятность того, что при следующем за ним содержании радия, равном  $6,1 \cdot 10^{-13}$  г/г золы, величина показателя будет больше, чем при пяти ближайших более высоких концентрациях (6,1; 5,3; и т.д.), равна 1/6. Наконец, вероятность того, что при содержании радия, равных  $(8,4-9,2) \cdot 10^{-13}$  г/г золы, среднее значение показателя  $(5,4 = (6,1+5,3+3,7+6,4)/4)$  будет больше, чем величина 3,8 - показателя у животного, содержащего  $4,28 \cdot 10^{-12}$  г/г золы, равна 1/2. Вероятность (ее верхняя оценка) одновременно случайно получить все три однонаправленных результата в диапазоне содержания радия от  $3,4 \cdot 10^{-13}$  до  $4,28 \cdot 10^{-12}$  г/г золы, равна 0,012 ( $1/7 \cdot 1/6 \cdot 1/2 = 1/84$ ). Аналогичным способом оцененная вероятность случайно получить ту же зависимость у перезимовавших самок равна 1/3.

Таким образом, вероятность случайно получить в области относительно малых концентраций  $^{226}\text{Ra}$  две спадающие кривые равна  $4 \cdot 10^{-3}$  ( $1/84 \cdot 1/3 = 1/252$ ). Уменьшение уровня гиподиплоидных клеток по сравнению со спонтанным при хроническом воздействии техногенного радиационного загрязнения так же, как и описанные в литературе данные, полученные при кратковременном внешнем гамма-облучении *in vitro* лимфоцитов человека [13] и зародышей рыбы [9], может быть объяснено активацией малыми дозами радиации восстановительных систем, либо включением индуцибельной системы антимутагенного эффекта [5].

Поскольку данные, полученные при цитогенетическом анализе клеток костного мозга самок-сеголеток, наиболее многочисленны, они послужили материалом для моделирования механизма радиационного воздействия на генетический материал клетки.

Результаты приведены в табл. 2. Сравнение соответствия моделей (4,5), (4,6) и (4,7) экспериментальным данным выявило преимущества какой-либо из предложенных моделей. Средние значения степеней соответствия, вычисленные по

Таблица 2  
Результаты моделирования механизма радиационного воздействия на генетический материал клетки

Показатель	Модель (4,5)	Модель (4,6)	Модель (4,7)
Пороговая мощность внешнего гамма-облучения, пКл/(кг·сек)		9,4 $\begin{cases} +47 \\ -7,3 \end{cases}$	10,6
Пороговая доза для радия, г/г золы $3,4 \cdot 10^{-13}$	0,31 $\begin{cases} +16,3 \\ -0,25 \end{cases}$	0,12 $\begin{cases} +1500 \\ -0,1 \end{cases}$	1 $\begin{cases} +1000000 \\ -0,8 \end{cases}$
ОБЭ <sub>в,н</sub> для радия	2,6 ± 0,3	24,9 ± 2,5	
ОБЭ <sub>в,н</sub> для внешнего гамма-облучения		0,19 ± 0,01	
ОБЭ <sub>в,н</sub> для инкорпорированного радия и внешнего гамма-облучения			7,0 ± 0,5
Степень превышения максимального воздействия над пороговым	57 $\begin{cases} +8500000 \\ -47 \end{cases}$	165 $\begin{cases} +800000 \\ -99 \end{cases}$	20 $\begin{cases} +60000 \\ -11 \end{cases}$
Вклад гамма-облучения, %		10 $\begin{cases} +60 \\ -7 \end{cases}$	20 $\begin{cases} +65 \\ -18 \end{cases}$

методу [6], по результатам 100 машинных испытаний составили  $0,71 \pm 0,02$  для модели (4,6);  $0,70 \pm 0,02$  для модели (4,7) и  $0,70 \pm 0,03$  для модели (4,5). Такой результат, с одной стороны, может служить подтверждением сделанного ранее предположения о том, что изменения, возникающие в клетках костного мозга полевок, обусловлены, в основном, действием инкорпорированного радия, с другой — указывает на то, что наших экспериментальных данных недостаточно, чтобы выявить более тонкие особенности действия факторов на организм полевок-экономок. ОБЭ компоненты излучения с высокой ЛПЭ по отношению к компоненте с низкой ЛПЭ, рассчитанная для радия и его дочерних продуктов по модели (4,5), составила  $2,6 \pm 0,3$ . По второй модели (4,6) аналогичная величина ОБЭ оказалась равной  $24,9 \pm 2,5$ , а для внешнего гамма-облучения —  $0,19 \pm 0,01$ . Наконец, по третьей модели (4,7) ОБЭ плотноионизирующей компоненты смешанного облучения составила  $7,0 \pm 0,3$ . Сравнивая полученные по второй и третьей модели величины  $ОБЭ_{В,Н}$  между собой, можно прийти к выводу о том, что нам не удалось избавиться от влияния вида ионизирующего излучения, так как величины ОБЭ для плотноионизирующей компоненты гамма-излучения, радия с его дочерними продуктами и для их сочетания оказались различными — 0,19, 2,6 и 24,9. Это, по-видимому, послужило причиной того, что величина  $ОБЭ_{В,Н}$  по третьей модели (7,0) оказалась промежуточной — между 24,9 и 0,19. Представляется, что в дальнейшем будет целесообразно вводить в анализ не две (плотноионизирующую и редкоионизирующую), а три или больше компонент с добавлением компонент с промежуточными значениями ЛПЭ. Тогда можно будет сделать выбор одной модели, наиболее адекватно описывающей экспериментальные данные.

Значение трех рассмотренных моделей не ограничивается только возможностью получения оценок  $ОБЭ_{В,Н}$ . Они могут быть использованы и для решения некоторых вопросов экологического нормирования. Так, используя полученные пороговые дозы (параметр  $c_1$ ) для всех трех моделей — 0,28; 0,12; 0,61, — можно вычислить, что практически не действующей на полевок величиной загрязнения окружающей среды будет та, при которой концентрация инкорпорированного радия не превышает  $0,3 \cdot 10^{-13}$  г/г золы (эта величина находится в пределах кларковых содержаний), или мощность дозы внешнего гамма-облучения, равная 9,4 пКл/(кг·сек) (131 мкР/час). Оценку среднего вклада (В) внешнего гам-

облучения в эффективную дозу комбинированного радиационного воздействия проводили по формуле:

$$B = \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K \frac{D_j |_{C_{Ra}=0}}{D_j} \cdot 100, \quad (10)$$

где  $K$  — число экспериментальных точек,  $D_j |_{C_{Ra}=0}$  — эффективная доза внешнего гамма-облучения для  $i$ -ой экспериментальной точки,  $D_j$  — эффективная доза комбинированного радиационного воздействия. Для вычисления эффективных доз использовали формулы (6) или (7), причем при вычислении  $D_j |_{C_{Ra}=0}$  в формуле (6) или (7) величину  $D_{\gamma}$  приравнивали к нулю. Вклад внешнего гамма-облучения в эффективную дозу радиационного воздействия составил по модели (4,6) 10%, а по модели (4,7) — 20%. Отношение эффективной дозы к ее пороговому значению может служить оценкой степени превышения радиационного загрязнения над пороговой величиной загрязнения для данной популяции. Величина степени превышения, вычисленная при максимальном уровне радиационного воздействия (при содержании радия, равном  $1,54 \cdot 10^{-11}$  г/г золы и мощности внешнего гамма-облучения, равной 51,6 пКл/(кг·сек)), оказалась равной 57 для модели (4,5), 165 — для модели (4,6) и 20 — для модели (4,7). Таким образом, в качестве максимальной оценки степени повышения радиационного фактора над пороговым значением для обитающей на техногенно загрязненном участке популяции полевок-экономок следует принять величину, равную 165.

Заключая обсуждение, остановимся на следующем аспекте проблемы прогнозирования комбинированного действия различных по природе факторов окружающей среды. По нашему мнению, предложенные модели позволяют по разработанной нами ЭВМ-программе быстро определить параметры "г", "а" и "б" для любого фактора, который не обязательно должен иметь радиационную природу, даже в том случае, если он действует в комплексе с другими факторами. Тогда для того, чтобы предсказать ожидаемый результат воздействия на популяцию комплекса загрязнений с любыми соотношениями факторов, достаточно замерить их количественные характеристики. Из изложенного в статье видно,

что такая возможность является логическим следствием введения модифицированного понятия ОБЭ, величина которого не зависит от уровня биологического эффекта.

#### Выводы

1. Предложена модификация понятия ОБЭ, величина которой не зависит от уровня биологического эффекта.
2. Для цитогенетического эффекта ионизирующей радиации, заключающегося в изменении доли гиподиплоидных клеток, величина ОБЭ плотноионизирующей компоненты внешнего гамма-излучения и/или инкорпорированного в тело полевок-экономок  $^{226}\text{Ra}$  и его дочерних продуктов по отношению к их же редкоионизирующей компоненте, оцененная по нескольким математическим моделям, составила 0,19; 7,0; 2,6; 24,9
3. Для того же цитогенетического эффекта вклад сопутствующего внешнего гамма-облучения на изученном техногенно загрязненном участке не превышает 20%.
4. Оцененная по результатам моделирования и необходимая для экологического нормирования величина степени превышения максимальной дозы радиационного воздействия, которой подвергаются полевки-экономки на изученном техногенно загрязненном участке, над пороговым значением состава 165-кратную величину.
5. В области относительно малых доз радиационного воздействия влияние ионизирующего излучения приводит к уменьшению спонтанного уровня гиподиплоидных клеток.
6. Предложенные модели механизма цитогенетического действия ионизирующей радиации на костный мозг полевок-экономок адекватно описывают дозовые зависимости изменения процента гиподиплоидных клеток во всем диапазоне доз радиационного воздействия. Степень прямолинейной корреляции между наблюдаемыми и аппроксимирующими значениями достигает 0,9.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бактон К., Эванс Г. Методы анализа хромосомных aberrаций у человека. - Женева, ВОЗ. - 1975. - С.15-16.
2. Дозовая нагрузка на мышевидных грызунов, обитающих на участках с повышенной естественной радиацией / А.А.Моисеев, В.И.Маслов, Б.В.Тестов, В.Я.Овченков. - М.: Госкомитет по использованию атомной энергии СССР, 1973. - 27 с.

3. Дубинина Л.Г. Лейкоциты крови человека - система для оценки мутагенов среды. - М.: Наука, - 31 с.
4. Дубинин Н.П. Эволюция популяций и радиация. - Атомиздат, 1966.
5. Дубинин Н.П. Новое в современной генетике. - Наука, 1986. - С.62.
6. Зайнуллин В.Г., Сусликов В.И., Попова В.И., Шершунова В.И., Таскаев А.И. Оценка радиочувствительности популяций (организма) в условиях радиационного загрязнения с помощью модели комбинированного действия факторов. (см. статью в наст. сб.)
7. Индуцированные облучением хромосомные aberrации в клетках человека (рисунки) / Научный комитет по воздействию атомной радиации. 69-03662. - 1969. Рис.4.
8. Машкович В.П. Защита от ионизирующих излучений. - М.: Атомиздат, 1982. - С.18.
9. Митрофанов Ю.А. Антимутагенный эффект малых доз  $\gamma$ -лучей облучения спермиев и развивающейся икры лягушки // Радиобиология. - 1986. - Т.26. Вып.3. - С.383-388.
10. Сусликов В.И. Максимально правдоподобная оценка достоверности различия между результатами наблюдения, ожидаемое количество особей с наличием эффекта или его отсутствием в одной или нескольких группах меньшего размера: Тез. докл. 2-й Всесоюзной конф. по фармакологии и радиобиологии. - М., 1972. - С.39.
11. Сусликов В.И. Об уменьшении смертности млекопитающих от кишечного синдрома при частичном экранировании кровеносной системы или постлучевой трансплантации кроветворных клеток // Радиобиология. - 1972. - №6. - С.885.
12. Luchnik N.V. Do One-Hit Chromosome Exchanges Induced by Ionizing Radiation // Rad. and Environm. Biophys. - 1975. - N 12. - С.199.
13. Pohl Ruling J., Ficher P. et. al. Effect of low dose acute X-irradiation on the frequencies of chromosomal aberrations in human periferal lymphocytes in vitro // Mutation Research. - 1983.-V. 110. - N 1. - С.11-82.

ОЦЕНКА РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ (ОРГАНИЗМА)  
В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ  
С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ  
КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ

Вал. Г. Зайнуллин, В. И. Сусликов, В. И. Шершунова,  
О. Н. Попова, А. И. Таскаев

Изучение генетических процессов в хронически облучаемых популяциях организмов привело к открытию феномена радиоадаптации [1]. Далее было установлено, что успех становления нового, адаптивного к облучению генотипа зависит (даже в контролируемых условиях) от множества условий, факторов [1, 6]. В популяциях, подвергающихся антропогенному загрязнению, ситуация осложняется еще и тем, что эти загрязнения, как правило, многокомпонентны и составляющие их элементы отличаются друг от друга по своей физической и химической природе. Поэтому проблема прогнозирования комбинированного действия на живые организмы факторов загрязнения по известным количественным физическим и химическим характеристикам загрязняющих веществ до сих пор в общем виде не решена. Один из возможных путей решения этой проблемы, на наш взгляд, может состоять в том, чтобы для каждой компоненты определять в эксперименте или расчетным путем ту часть ее действия, которая является общей с влиянием каждого из нескольких факторов, принятых за эталоны, и ту, которая является специфической, независимой от них. При этом под общим имеется в виду то, что действие как исследуемого компонента загрязнения, так и эталонного, происходит по одному и тому же механизму, начиная с некоторого момента после начала воздействия факторов.

Настоящая работа является примером реализации такого подхода путем использования модели комбинированного дей-

ствия факторов. Оценивалась радиочувствительность семян (одна из составляющих радиочувствительности популяции) горошка мышиного *V. sativa* L., обитающего в течение ряда лет на экспериментальной территории урано-радиевого загрязнения, по их реакции на острое провокационное облучение.

Модель комбинированного действия факторов

Степень общности в действии комплекса вредных факторов и эталонных зависит, вообще говоря, как от вида рассматриваемых факторов, так и от изучаемого объекта, на который эти факторы влияют, а также от вида исследуемой биологической реакции (показателя). В случаях, аналогичных нашему, когда загрязнения имеют радиоактивную природу, в качестве эталонов могут быть использованы редко- и (или) плотноионизирующее излучения. Те части доз загрязнений (их величины мы будем в дальнейшем называть эквивалентными (экв) дозами антропогенных факторов), которые вызывают эффекты, общие с таковыми эталонных, суммируются, и их сумма выражается в единицах измерения доз эталонных воздействий. Тогда проблема прогнозирования комбинированного влияния изучаемых антропогенных загрязнений сведется к нахождению комбинированного эффекта эталонных факторов, доза каждого из них выражена в эквивалентных дозах; с последующим добавлением к нему эффектов действия упомянутых специфических механизмов действия антропогенных загрязнений.

В общем случае, при условии независимости механизмов действия эталонных факторов, будет справедливо следующее выражение:

$$Y = 1 - \prod_{i=1}^N (1 - \Phi_i (D_{эт.,i}^* + D_{экв.,i})) \cdot (1 - \Phi_{сп}), \quad (1)$$

причем  $\Phi_i (D_{эт.,i}^* + D_{экв.,i}) = \Phi_i (D_{эт.,i})$ , где

$Y$  — величина исследуемого показателя организма,  $\Phi_i$  — функция, определяющая зависимость величины аналогичного показателя контрольной популяции от количественной характеристики (дозы  $D_{эт.,i}$ )  $i$ -го эталонного воздействия;  $D_{эт.,i}^*$  — величина дозы воздействия  $i$ -го эталонного фак-

тора на популяцию, подвергающуюся воздействию загрязняющих факторов;  $D_{экв.,i}$  - количественная оценка факторов загрязнения, по механизму действия частично одинаковых с  $i$ -м эталонным фактором,  $\Phi_{сп}$  - специфическая составляющая, зависящая от уровня загрязнения.

В данной статье мы ограничимся рассмотрением ситуации, когда совокупность экспериментальных данных позволяет провести сравнение изучаемых факторов только с одним эталоном - кратковременным гамма-излучением, которому подвергались семена перед проращиванием.

Если исследуемые факторы и эталонный по механизму своего действия одинаковы, тогда метод прогнозирования их комбинированного эффекта в любом количественном отношении факторов может быть довольно простым. В этом случае, очевидно, должно быть справедливо следующее соотношение:

$$Y = \Phi(D_{эт.}^* + D_{экв.}) = \Phi(D_{эт.}). \quad (2)$$

Таким образом, из модели (2) вытекает, что при любом определенном уровне показателя  $Y$  величина  $D_{эт.}$  (дозы эталонного фактора при воздействии на контрольную, чистую популяцию) должна быть на одну и ту же величину ( $D_{экв.}$ ) больше, чем доза эталонного фактора ( $D_{эт.}^*$ ) при воздействии на популяцию, подвергнутую действию загрязняющего фактора. Другими словами, величина  $D_{экв.}$  является мерой того, насколько изменяется радиочувствительность организма под влиянием любых антропогенных загрязнений, в том числе загрязнений радионуклидами.

В настоящей работе для описания зависимости  $Y = \Phi(D_{эт.})$  использовали функцию вида:

$$\Phi = \begin{cases} C3, & \text{при } C1 > D \\ C3 - (C3 - C4) \cdot ((D - C1) / (C2 - C1))^{C5} \cdot C6^{(C5 - 1)}, & \text{при } C1 \leq D < TP \\ C4 + (C3 - C4) \cdot ((C2 - D) / (C2 - C1))^{C5} \cdot (C6 / (C6 - 1))^{(C5 - 1)}, & \text{при } C2 > D \geq TP \\ C4, & \text{при } C2 \leq D \end{cases} \quad (3)$$

с ограничениями  $C2 > C1$ ,  $C3 \geq C4$ ,  $C5 \geq 1$ ,  $C6 \geq 1$ . В этой формуле  $C1$  - пороговая величина дозы;  $C2$  - величина дозы, при которой показатель минимален и равен  $C4$ ;  $C3$  - фоновое значение изучаемого показателя;  $C5$  и  $C6$  - параметры, определяющие форму кривой;  $TP = C1 + (C2 - C1) / C6$ .

Оптимальные значения параметров модели (3) находили

путем минимизации суммы квадратов относительных отклонений (СКОО) расчетных (по кривой (3)) значений от экспериментальных ( $\varepsilon$ ) с учетом ошибок измерений:

$$СКОО_{\varepsilon} = \sum_{i,j} ((Y_{i,j,k} - \bar{Y}_{i,j,\varepsilon}) / (Y_{i,j,k} \cdot m\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}))^2, \quad (4)$$

где  $Y_{i,j,k}$  - рассчитанная по кривой (3) величина показателя на  $j$ -м ( $j=1, 2, 3$ ) участке (на каждом участке своя степень загрязнения) при  $i$ -ой сумме провокационного облучения объектов участка (в дозе  $D_{эт.,i,j}^*$ ) и эквивалентной дозы ( $D_{экв.,j}$ );  $\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}$  - средняя величина показателя при провокационном облучении в дозе  $D_{эт.,i,j}^*$ ;  $m\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}$  - средняя квадратическая ошибка  $\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}$ . Уровень значимости отличия расчетной (оптимальной) кривой от экспериментальных данных определяли путем машинного ( $m$ ) эксперимента. Предполагалось, что распределение отклонений результатов измерения в каждой точке ( $i, j$ ) (при каждой дозе провокационного облучения) от расчетных (оптимальных) подчиняется нормальному закону со среднеквадратической ошибкой  $m\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}$ . С помощью генератора случайных чисел, распределенных по нормальному закону около расчетных значений, определяемых кривой (3), находили новое "экспериментальное" значение ( $Y_{i,j,m,1}$ ) которое могло бы получиться и при повторном реальном эксперименте ( $1 \leq l \leq 100$ ) ( $l$  - номер машинного эксперимента). Для каждого из таких полученных с помощью ЭВМ новых "экспериментальных" значений находили новую величину

$$СКОО_{m,1} = \sum_{i,j} ((Y_{i,j,k} - Y_{i,j,m,1}) / (Y_{i,j,k} \cdot m\bar{Y}_{i,j,\varepsilon}))^2, \quad (5)$$

которую сравнивали с величиной  $СКОО_{\varepsilon}$  для результатов, полученных в реальном эксперименте. Затем определяли долю ( $P$ ) случаев из 100, в которых  $СКОО_m$  была больше или равна  $СКОО_{\varepsilon}$ . Величина  $P$  и является конечным искомым односторонним уровнем значимости отличия экспериментальных данных от расчетной кривой, вычисленной при самых благоприятных значениях ее параметров. Мы считали, что при наблюдении условия  $0,01 \leq P \leq 0,99$  степень соответствия расчетной кривой экспериментальным значениям удовлетворительна, а тем самым и степень правомерности допущения о

том, что анализируемые экспериментальные данные могут быть моделированы полностью эталонным, достаточно велика (при  $P > 0,99$  прогностическая ценность модели с очень высокой степенью соответствия будет, тем не менее, очень мала).

### Результаты и их обсуждение

Предложенная модель (2,3) была использована для анализа ранее описанных данных [4,5], где изложены результаты исследований мышиного горошка (*V. scacca L.*), выросшего из семян, собранных с растений, длительно произраставших при трех уровнях содержания в почвенном субстрате природных радиоактивных изотопов урана и сопутствующих загрязнений в виде тяжелых металлов и других факторов (крайне малого содержания в субстрате питательных веществ и воды), после предпосевного (провокационного) их облучения в больших дозах эталонного гамма-облучения. В таблице приведены эффекты предпосевного гамма-облучения семян на показатели выживаемости и вегетативной продуктивности растений (вес воздушно-сухой надземной массы и средний вес одного растения) в конце вегетации [5].

Воспроизведенные данные могут быть интерпретированы в предположении, что длительное произрастание природной популяции горошка мышиного на участке с повышенным внешним и внутренним фонами ионизирующей радиации и содержанием в почве тяжелых элементов, обладающих токсическим действием, является причиной возникновения в семенах изменений, в некоторых своих свойствах эквивалентных радиационным изменениям, возникающим в семенах при однократном кратковременном облучении перед проращиванием. Для разных показателей величина эквивалентной дозы кратковременного гамма-облучения может быть различной, так как разные конечные радиобиологические изменения, очевидно, не могут быть полностью скоррелированы друг с другом. Поскольку эти два типа изменений, возникающих в семенах растений при длительном произрастании последних на радиоактивном участке и (или) после провокационного воздействия на такие семена перед посевом, предполагаются эквивалентными, то естественно предположить, что они могут друг с другом "складываться" в том смысле, что вызываемые ими конечные радиобиологические эффекты (напри-

Влияние провокационного гамма-облучения семян горошка мышиного на показатели выживаемости и вегетативной продуктивности растений в конце вегетации

Доза, Гр	Вариант					
	Контроль		Опыт 1		Опыт 2	
	$\bar{x} \pm m\bar{x}$	П*	$\bar{x} \pm m\bar{x}$	П	$\bar{x} \pm m\bar{x}$	П
0	66,7 ± 6,6	67,6	35,4 ± 2,2	38,9	70,8 ± 5,8	67,0
50	67,7 ± 8,1	62,1	46,4 ± 5,4	38,1	50,5 ± 3,0	58,8
100	57,5 ± 8,1	54,3	39,4 ± 8,7	37,8	52,5 ± 1,6	51,8
150	45,4 ± 3,8	48,3	30,3 ± 7,9	37,8	40,4 ± 4,6	46,5
200	35,4 ± 3,3	44,0	34,3 ± 4,1	37,8	47,5 ± 3,0	42,7
0	16,1 ± 2,0	14,3	4,5 ± 0,9	5,2	14,9 ± 0,9	14,3
50	12,9 ± 1,3	13,8	5,9 ± 0,9	4,7	11,5 ± 2,0	12,6
100	14,7 ± 2,9	11,6	5,2 ± 2,3	4,4	10,3 ± 2,0	10,6
150	9,8 ± 0,7	9,9	5,3 ± 2,0	4,2	7,3 ± 1,5	9,0
200	8,8 ± 0,8	8,4	4,4 ± 0,3	4,1	11,0 ± 2,3	7,8
0	0,80 ± 0,07	0,689	0,40 ± 0,06	0,413	0,72 ± 0,11	0,688
50	0,66 ± 0,02	0,689	0,40 ± 0,02	0,411	0,83 ± 0,21	0,688
100	0,90 ± 0,23	0,689	0,34 ± 0,08	0,411	0,66 ± 0,16	0,688
150	0,73 ± 0,09	0,688	0,55 ± 0,010	0,411	0,58 ± 0,07	0,688
200	0,85 ± 0,14	0,688	0,43 ± 0,05	0,411	0,72 ± 0,09	0,688

\*П - расчетные значения показателей по модели (2,3).

Примечание.

а - при значениях параметров функции (3), равных  $c_1=0,19\pm 0,10$ ;  $c_2=443,9\pm 70,0$ ;  $c_3=67,6\pm 1,3$ ;  $c_4=37,8\pm 0,4$ ;  $c_5=2,9\pm 0,4$ ;  $c_6=14,1\pm 1,4$ ;  $D_{\text{экв.1}}=311\pm 18$  Гр;  $D_{\text{экв.2}}=20,0\pm 0,5$ .  $P=0,85$ .

б -  $c_1=0,04\pm 0,01$ ;  $c_2=992,2\pm 97,9$ ;  $c_3=14,3\pm 0,3$ ;  $c_4=3,8\pm 0,4$ ;  $c_5=4,5\pm 0,7$ ;  $c_6=19,3\pm 3,0$ ;  $D_{\text{экв.1}}=390\pm 26$ ;  $D_{\text{экв.2}}=27\pm 1$ .  $P=0,3$ .

в -  $c_1=0,29\pm 0,01$ ;  $c_2=1329\pm 132$ ;  $c_3=0,689\pm 0,05$ ;  $c_4=0,411\pm 0,06$ ;  $c_5=13,0\pm 1,2$ ;  $c_6=1,75\pm 1,5$ ;  $D_{\text{экв.1}}=930\pm 9$ ;  $D_{\text{экв.2}}=70,0\pm 0,2$ .  $P=0,05$ .

мер, выживаемость растений) зависят только от суммы этих изменений. Каждое из них может быть взаимно однозначно сопоставлено с соответствующей величиной дозы однократного кратковременного провокационного облучения. Другими словами, это предположение означает, что дозовые кривые конечного радиобиологического эффекта, получаемые после кратковременного однократного облучения семян, собранных с растений на участках №1 (вариант 1) и №2 (вариант 2), должны совпадать с аналогичной кривой, полученной при кратковременном облучении семян, собранных с растений, выросших на контрольном участке, если каждую из первых двух кривых сдвинуть относительно "контрольной" дозовой кривой на некоторую соответствующую (для каждого участка одну) величину дозы, которую мы называли несколько раньше эквивалентной величиной дозы эталонного действия.

Данные анализа, проведенного исходя из изложенной гипотезы, представлены в таблице и на рисунке. Из них следует, что изменения, возникающие в семенах, собранных на участке №1, и приводящие к уменьшению процента выживших растений, эквивалентны дозе однократного кратковременного гамма-облучения, равной  $311\pm 18$  Гр. По показателю веса воздушно-сухой надземной массы величина накопленной дозы эквивалентна  $390\pm 26$  Гр кратковременного гамма-облучения, а по показателю уменьшения среднего веса одного растения -  $930\pm 9$  Гр. Для участка №2 эти величины эквивалентных доз составляют соответственно  $20,0\pm 0,5$  Гр,  $27,0\pm 1,0$  Гр,  $70,0\pm 0,2$  Гр.

Таким образом, у горошка мышиного, произрастающего в течение длительного времени на участке №1, радиочувстви-

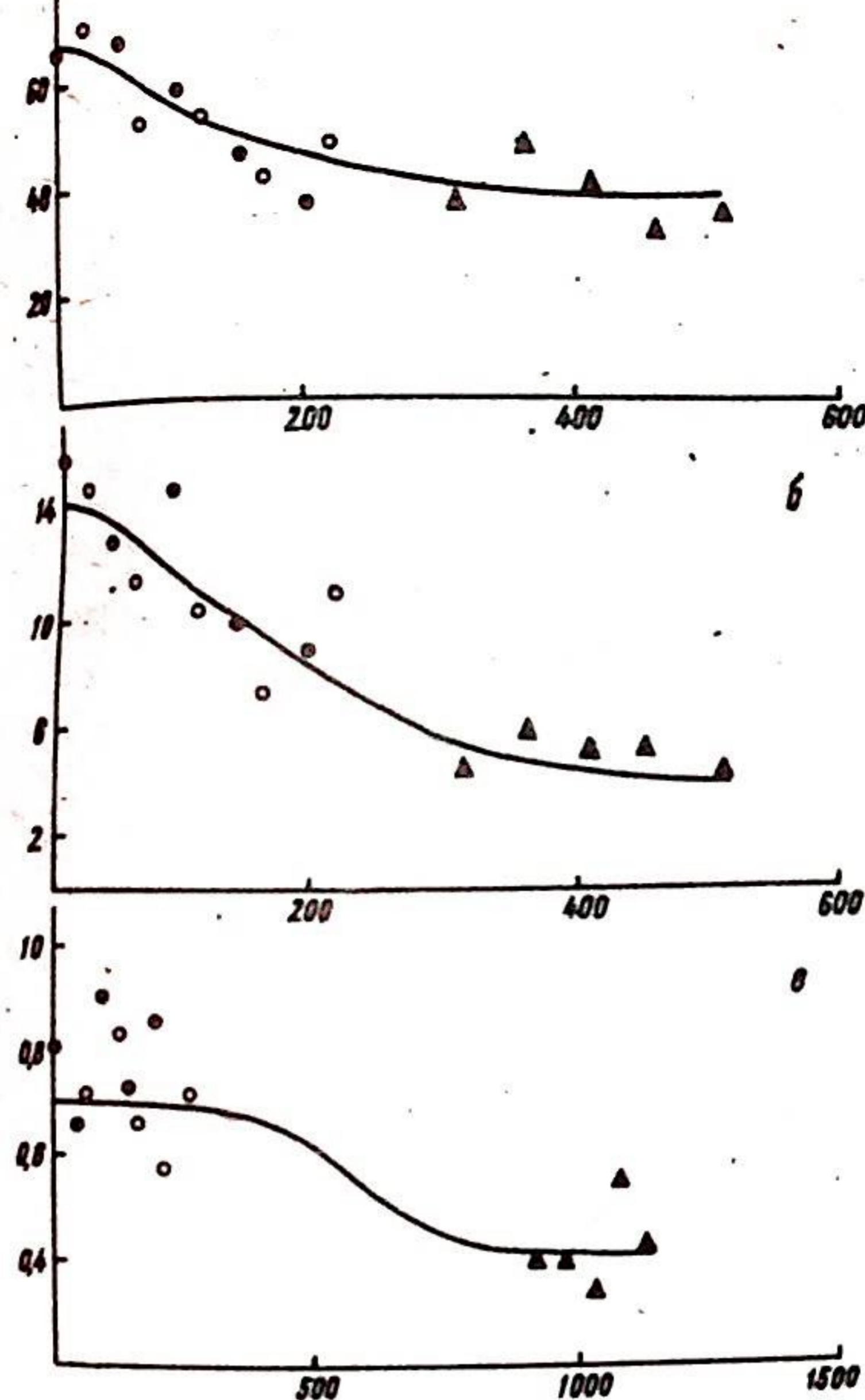


Рис. Расчетная зависимость морфо-физиологических показателей (а, б, в) семян горошка мышиного от уровня загрязнения экспериментальной территории радионуклидами. По оси абсцисс - уровень загрязнения техногенной территории, выраженная в единицах эталонного облучения, Гр. По оси ординат - величина показателя: а - число выживших растений (%), б - вес воздушно-сухой надземной массы ( $г/6,8 \text{ дм}^3$ ), в - средний вес одного растения, г. о - контроль, ● - участок №1, ▲ - участок №2.

тельность увеличилась на 311 Гр по показателю выживаемости растений, на 390 Гр по показателю веса воздушно-сухой надземной массы и на 930 Гр по показателю среднего веса одного растения. Для участка №2 радиочувствительность увеличилась на 20, 27 и 70 Гр. Полученные различные величины эквивалентных доз для разных показателей являются, по-видимому, доказательством различного вклада систем восстановления в радиобиологический эффект на разных уровнях интеграции растительного организма [2].

Суммарная физическая доза (интегральная эквивалентная доза), накопленная растениями на участке №1 за один вегетационный период  $\sim 100$  суток, по приблизительным расчетам, составляет для корней -  $0,5-0,7$  Зв ( $50-70$  бэр), для надземных частей  $0,05-0,07$  Зв ( $5-7$  бэр), для семян, как известно, должна быть еще меньше. Если даже ввести в расчеты величину дозы, накопленную за время нахождения семян в земле до прорастания и за все время обитания популяции на экспериментальной территории, то и тогда величина поглощенной популяцией дозы будет намного

меньше приведенных эквивалентных доз. Большое различие между ожидаемыми эквивалентными (физическими) и полученными нами расчетными величинами дает основание предположить, что последние являются той интегральной мерой (количественно выраженной в дозах  $\gamma$ -излучения, выбранного в качестве эталонного) вредности всего комплекса факторов радиационной и нерадиационной природы, представленных на территории урано-радиевого загрязнения и вызывающих конечный биологический эффект. Этот конечный эффект, помимо чисто радиоиндуцированного, может включать в себя и резко выраженный синергизм реакции популяции на хроническое воздействие радиационных (малой интенсивности) и нерадиационных факторов, присутствующих на техногенно загрязненных радионуклидами участках. Этот эффект одновременно может отражать и различную реакцию сравниваемых групп семян на высеивание их в пострадиационном поколении на плодородную почву, являющуюся для популяции опытных семян дополнительным стрессорирующим фактором и т.д.

Приведенные выше величины позволяют дать комплексную оценку влияния всех этих факторов. Степень загрязненности участка №1 примерно в 14 раз  $((311:20+390:27+930:70):3 = (15,6+14,4+13,3):3)$  превышает уровень загрязненности участка № 2, в то время как по уровням внешнего гамма-излучения эти участки отличаются друг от друга в 6 раз  $(2500 \text{ мкР/час}:400 \text{ мкР/час})$ , по уровню содержания  $^{226}\text{Ra}$  в семенах в 13,7 раз  $(1,81 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы}: 0,132 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы})$ . Для сравнения приведем другие различия в степени загрязненности участков и произрастающих на них растений: по уровню содержания радионуклидов в почве - в 25 раз  $(162 \cdot 10^{-7} \text{ г/г золы}: 6,48 \cdot 10^{-7} \text{ г/г золы по } ^{238}\text{U}$  и в 57 раз  $(25 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы}: 0,44 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы})$  по  $^{226}\text{Ra}$ ; в вегетативных частях растений - в 24 раза  $(75,2 \cdot 10^{-7} \text{ г/г золы}: 3,14 \cdot 10^{-7} \text{ г/г золы})$  по  $^{238}\text{U}$  и в 13,3 раза  $(10,0 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы}: 0,75 \cdot 10^{-11} \text{ г/г золы})$  по  $^{226}\text{Ra}$ . Физическая характеристика загрязненности участков по содержанию загрязнителей в почве, следовательно, не соответствует биологической оценке степени их загрязненности. По-видимому, основным дозообразующим радионуклидом для популяции горошка мышиного является  $^{226}\text{Ra}$  в семенах и вегетативной части растения.

Таким образом, предлагаемая модель может быть успешно использована при биологической оценке антропогенных загрязнений и, в конечном счете, полезна при решении

вопросов радиозэкологического нормирования, тесно связанного с проблемой комбинированного воздействия факторов. В случаях с радиоактивными загрязнениями, когда в качестве эталонного фактора выбраны ионизирующие излучения, с помощью данной модели возможна оценка радиочувствительности популяций, обитающих на этих территориях.

Использование модели комбинированного воздействия факторов дало возможность установить, что длительное произрастание популяции дикорастущего травянистого растения *V. scacca* L. в условиях урано-радиевого загрязнения приводит к значительному повышению чувствительности семян горошка мышиного к воздействию  $\gamma$ -излучений в высоких дозах.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Генетические последствия действия ионизирующих излучений на популяции / Н.П.Дубинин, В.А.Шевченко, В.А.Кальченко и др. // Мутагенез при действии физических факторов. - М.: Наука, 1980. - С.265-281.
2. Кутлахмедов Ю.А. Роль процессов восстановления в радиобиологическом эффекте на разных уровнях интеграции растительного организма // Радиобиология. - 1986. - Вып.32. - С. 49-50.
3. Попова О.Н., Коданева Р.П., Шершунова В.И. Анализ силы роста семян природных популяций горошка мышиного *V. scacca* L. для оценки их радиочувствительности // Радиобиология. - 1985. - Т. 25. - Вып.5. - С.700-703.
4. Изменчивость популяции *V. scacca* L. на территории, имитирующей урано-радиевое загрязнение / О.Н.Попова, В.И.Шершунова, Р.П.Коданева, А.И.Таскаев. - Сыктывкар, 1985. - 33 с. (Сер. препринтов "Науч.докл." /АН СССР, Коми фил.; Вып. 127).
5. Анализ выживаемости потомства *Vicia scacca* L., полученного из хронически облучающегося фитоценоза / О.Н.Попова, В.И.Шершунова, А.И.Таскаев, В.И.Сусликов // Радиобиология. - 1986. - Т.26. - Вып.3. - С. 360-364.
6. Шевченко В.А., Померанцева М.Д. Генетические последствия действия ионизирующих излучений. - М.: Наука, 1985. - 276 с.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение . . . . .	3
Маслова К.И. О радиочувствительности и радиорезистентности природных популяций мелких млекопитающих . . . . .	5
Материй Л.Д. Некоторые подходы к изучению чувствительности <i>Microtus oeconomus</i> Pall., отловленных на участках с различным гамма-фоном . . . . .	16
Кичигин А.И. Особенности реакции периферической крови в различных внутривидовых группах красной полевки на острое облучение . . . . .	27
Кудяшева А.Г. Роль тиолов и дегидрогеназ в радиочувствительности <i>Microtus oeconomus</i> Pall. . . . .	33
Шишкина Л.Н., Бурлакова Е.Б. Роль антиокислительной активности липидов и эндогенных тиолов в обеспечении радиорезистентности организма . . . . .	43
Кривошукский Д.А., Викторов А.Г., Филлипова М.В. Радиочувствительность дождевых червей и энхитреид . . . . .	52
Ракин А.О. Уровень доминантных леталей в популяциях дрозофилы, подвергнутых длительному (хроническому) воздействию солей урана, тория и свинца . . . . .	66
Ермакова О.В., Ткачев А.В. Некоторые аспекты радиочувствительности щитовидной железы . . . . .	74
Фролова Н.П., Таскаев А.И., Фролов Ю.М. Изменение радиочувствительности <i>Rhaphonticum carthamoides</i> (Willd.) Jlin. при повторных острых облучениях семенного материала . . . . .	82
Зайнуллин В.Г. "Доза-эффект" в исследовании эффектов малых доз радиации . . . . .	93

Сусликов В.И., Зайнуллин Вал.Г., Бородкин П.А., Башлыкова Л.А. Моделирование радиационного воздействия на генетический аппарат клетки с целью определения относительной эффективности компоненты с высокой ЛПЭ по отношению к компоненте с низкой ЛПЭ в пределах одного вида излучения . . . . . 98

Зайнуллин Вал.Г., Сусликов В.И., Шершунова В.И., Попова О.Н., Таскаев А.И. Оценка радиочувствительности популяций (организма) в условиях радиоактивного загрязнения с помощью модели комбинированного действия факторов . . . . . 112

УДК 577.391:599.32

О РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ И РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТИ ПРИРОДНЫХ ПОПУЛЯЦИЙ МЕЛКИХ МЛЕКОПИТАЮЩИХ. Маслова К.И.

//Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 5-15. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

На основании литературных и собственных данных автор делает попытку обосновать методические подходы к определению понятия радиочувствительности популяций на примере диких видов грызунов. Подчеркивается сложность решения вопроса при оценке радиочувствительности природных популяций биогеоценозов с повышенной естественной радиоактивностью.

УДК 591.5:599.324.4:611.018.5:577.124

НЕКОТОРЫЕ ПОДХОДЫ У К ИЗУЧЕНИЮ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ MICROTUS OECONOMUS PALL. Материй Л.Д. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988.

- С. 16-26. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

С помощью двух биохимических показателей (уровень сахара в крови и гликогена в лейкоцитах) прослежена изменчивость радиочувствительности полевков-экономок в зависимости от пола, возраста, фазы популяционного цикла и уровня радиоактивности среды обитания.

УДК 599.323.4:574.24:612.014.482.4

ОСОБЕННОСТИ РЕАКЦИИ ПЕРИФЕРИЧЕСКОЙ КРОВИ В РАЗЛИЧНЫХ ВНУТРИПОПУЛЯЦИОННЫХ ГРУППАХ КРАСНОЙ ПОЛЕВКИ НА ОСТРОЕ ОБЛУЧЕНИЕ. Кичигин А.И. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышением естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 27-32. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Сравнивается реакция периферической крови на острое облучение различных внутрипопуляционных групп красной полевки: 1) перезимовавших, активно размножающихся особей, 2) неполовозрелых сеголеток, 3) активно размножающихся сеголеток. Анализируется пострадиационная динамика

количества лейкоцитов, эритроцитов и ретикулоцитов в периферической крови отловленных в природе особей. Делается предположение, что неполовозрелые сеголетки наиболее радиочувствительны.

УДК 577.121.4:599.323.4:612.014.482

РОЛЬ ТИОЛОВ И ДЕГИДРОГЕНАЗ В РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ MICROTUS OECONOMUS PALL. Кудяшева А.Г. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 33-42. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Представлены экспериментальные данные, характеризующие количественные сдвиги активности дегидрогеназ цикла Кребса, гликолиза и содержания тиолов в тканях полевков-экономок, обитающих в условиях повышенного в 10-100 раз гамма-фона. У молодых полевков обнаружено снижение процессов дегидрирования и содержания небелковых тиолов, что свидетельствует об их более высокой радиочувствительности.

УДК 577.391:599.32:577.115

РОЛЬ АНТИОКИСЛИТЕЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ ЛИПИДОВ И ЭНДОГЕННЫХ ТИОЛОВ В ОБЕСПЕЧЕНИИ РАДИОРЕЗИСТЕНТНОСТИ ОРГАНИЗМА. Шишкина Л.Н., Бурлакова Е.Б. // Радиочувствительность животных и растений биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 43-51. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

В работе на основании анализа собственных и литературных данных обосновывается роль эндогенных тиолов и величины антиокислительной активности (АОА) липидов в обеспечении радиорезистентности организма. Показано, что уровни АОА липидов и эндогенных тиолов отражают разные стороны клеточного метаболизма и обеспечивают устойчивость организма к действию радиации по разным метаболическим путям.

УДК 577.391:595.142.3

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ ДОЖДЕВЫХ ЧЕРВЕЙ И ЭНХИТРЕИД.

Криволицкий Д.А., Викторов А.Г., Филиппова М.Ф. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С.52-65. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Выявлена относительно высокая устойчивость почвенных олигохет к радиационному стрессу. Одновременно установлено, что на начальных стадиях онтогенеза эти животные более чем на порядок чувствительнее к воздействию радиации, чем во взрослом состоянии.

УДК 575:577.57.04:595.773.4

УРОВЕНЬ ДОМИНАНТНЫХ ЛЕТАЛЕЙ В ПОПУЛЯЦИЯХ ДРОЗОФИЛЫ, ПОДВЕРГНУТЫХ ДЛИТЕЛЬНОМУ ХРОНИЧЕСКОМУ ВОЗДЕЙСТВИЮ СОЛЕЙ УРАНА, ТОРИЯ И СВИНЦА. Ракин А.О. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 66-73. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Прослежена динамика изменения уровня доминантных леталей в экспериментальных ящичных популяциях дрозофилы, подвергаемых хронической обработке нитратами свинца, тория и урана. Показана прямая дозовая зависимость выраженности эффекта от концентрации в пищевой среде затравки. Генетическая адаптация популяций к сублетальным воздействиям радионуклидов и свинца происходит к десятому поколению, причем основной вклад в дестабилизацию генома вносит, в отличие от радиационного, токсический фактор.

УДК 577.391:591.147.1

НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ. Ермакова О.В., Ткачев А.В. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 74-81. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Показано, что щитовидная железа является весьма радиочувствительным объектом. При воздействии малых доз

радиации реакция тиреоидной паренхимы отличается от таковой при острой лучевой болезни: происходит перегруппировка секреторных элементов посредством вклинивания и образования новых фолликулов, но полноценного восстановления тиреоидных клеток не происходит.

УДК 577.391.58.039.1

ИЗМЕНЕНИЕ РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ RHARONTICUM SARTNAMOIDES (WILLD.) ILJIN ПРИ ПОВТОРНЫХ ОСТРЫХ ОБЛУЧЕНИЯХ СЕМЕННОГО МАТЕРИАЛА. Фролова Н.П., Таскаев А.И., Фролов Ю.М. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С. 82-92. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Представлены экспериментальные данные, характеризующие состояние продуктивности модельных популяций многолетнего травянистого поликарпического вида - рапонтика сафлоровидного - при последовательном двукратном остром облучении семенного материала. Показано, что по такому критерию радиочувствительности, как ростовая реакция, на начальных этапах онтогенеза проростки семян данного радиорезистентного вида из двукратно облученных в различном режиме популяций реагировали по-разному на дополнительное провокационное облучение в зависимости от дозы.

УДК 577:575

"ДОЗА-ЭФФЕКТ" В ИССЛЕДОВАНИИ ЭФФЕКТОВ МАЛЫХ ДОЗ РАДИАЦИИ. Зайнуллин В.Г. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. С. 93-97. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

На основе анализа данных литературы и собственных результатов рассматривается возможная реализация биологического эффекта (рецессивные летальные мутации у дрозофилы) при облучении в сверхмалых и малых дозах.

УДК 575.3:612.014.482

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАДИАЦИОННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ГЕНЕТИЧЕСКИЙ АППАРАТ КЛЕТКИ С ЦЕЛЮ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ КОМПОНЕНТЫ С ВЫСОКОЙ ЛПЭ ПО ОТНОШЕНИЮ К КОМПОНЕНТЕ С НИЗКОЙ ЛПЭ В ПРЕДЕЛАХ ОДНОГО ВИДА ИЗЛУЧЕНИЯ. Сусликов В.И., Зайнуллин Вал.Г., Бородкин П.А., Башлыкова Л.А. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С.98-111. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

Доказано уменьшение доли гиподиплоидных клеток костного мозга полевок-экономок, обитающих на территориях, в разной степени техногенно загрязненных радиоактивными изотопами. Предложена модификация понятия ОБЭ. Величина модифицированной ОБЭ не должна зависеть от уровня радиобиологического эффекта. Для аппроксимации экспериментальных данных предложены три феноменологические модели механизма цитогенетического действия радиации с учетом постоянства величины модифицированной ОБЭ.

УДК 577.391:58.03:539.16.04

ОЦЕНКА РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПОПУЛЯЦИЙ (ОРГАНИЗМА) В УСЛОВИЯХ РАДИОАКТИВНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ С ПОМОЩЬЮ МОДЕЛИ КОМБИНИРОВАННОГО ДЕЙСТВИЯ ФАКТОРОВ. Зайнуллин Вал.Г., Сусликов В.И., Шершунова В.И., Попова О.Н., Таскаев А.И. // Радиочувствительность растений и животных биогеоценозов с повышенным естественным фоном радиации. Сыктывкар, 1988. - С.112-121. (Тр. Коми научного центра УрО АН СССР, №97).

На основе модели комбинированного действия радиационных и сопутствующих им на техногенно загрязненных территориях нерадиационных факторов изложен один из подходов к проблеме комплексной количественной оценки как степени антропогенных загрязнений, так и изменения чувствительности популяции к действию эталонного радиационного фактора в результате их длительного пребывания в этих условиях.

РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ РАСТЕНИЙ И ЖИВОТНЫХ  
БИОГЕОЦЕНОЗОВ.  
С ПОВЫШЕННЫМ ЕСТЕСТВЕННЫМ ФОНОМ РАДИАЦИИ

Редактор Л.П. Мосунова  
Техн. редактор М.А. Сазанская  
Оператор С.Ю. Петрова

Подписано в печать 25.05.88. Ц02028. Формат 60x90 1/16.  
Бум, типографская №1. Печать офсетная. Уч.-изд.л. 6,5.  
Усл.печ.л. 8. Тираж 500. Заказ № 389. Цена 40 к.

167610, г. Сыктывкар, ул. Коммунистическая, 24  
Ротапринт Коми научного центра УрО АН СССР