

## БИОЛОГИЧЕСКИЕ НАУКИ

---

### *Физико-химическая биология*

УДК 577.3:539.16.04

#### **Биологические эффекты малых доз ионизирующих излучений (обзор)**

А.Н. Журавская

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск*

*Проблема малых доз ионизирующих излучений была и остаётся наиболее сложной, имеющей не только радиобиологическое, но и социально-экономическое значение. В настоящее время известны обширные данные о негативном и позитивном действии малых доз ионизирующей радиации на биоту, в том числе, на человека. Выявлен ряд феноменов, возникающих под действием доз природной радиации. С одной стороны – это стимулирующее действие на метаболические процессы растительных и животных организмов, за счет активации клеточных систем восстановления, приводящее к повышению радиостойчивости к острому облучению (радиоадаптация). С другой – к значительному повышению радиочувствительности, за счет накопления в геноме организмов хромосомных перестроек, приводящих к образованию абберрантных клеток, отличающихся пониженной устойчивостью к вторичному воздействию  $\gamma$ -излучений в высоких дозах. Представленные собственные и литературные факты позволяют заключить, что радиобиологи обладают весьма солидными знаниями о действии на организмы высоких доз ионизирующего излучения, но не имеют ни достаточных данных, ни теоретических представлений о влиянии на окружающий нас мир живой природы природного и техногенного повышенного радиационного фона в области малых доз радиации.*

Ключевые слова: малые дозы ионизирующего излучения, синдром дефицита облучения, радиоадаптация, радиационный гормезис, радиочувствительность.

#### **Biological Effects of Small Doses of Ionizing Radiation (Review)**

A.N. Zhuravskaya

*Institute for Biological Problems of Cryolithozone SB RAS, Yakutsk*

*It is known that the problem of small doses of ionizing radiation was and still remains the most difficult, having not only radio biological, but also social and economic value. Now there are extensive data on negative and positive action of small doses of the ionizing radiation on a biota including on the person. A series of phenomena, arising under the influence of doses of natural radiation is revealed. On the one hand it is a stimulating action on metabolic processes of plant and animal organisms, due to the activation of cellular systems of restoration resulting in radioresistance to acute radiation (radioadaptation). On the other hand – it cause a substantial increase of radiosensitivity, due to accumulation in a genome of organisms of the*

---

ЖУРАВСКАЯ Алла Николаевна – д.б.н., проф., г.н.с., e-mail: jan@mail.ru.

*chromosomal reorganizations leading to generation of the aberration cells differing in the lowered stability to secondary influence of  $\gamma$ -radiations in high doses. The presented own and literary facts allow to conclude that radio biologists have very solid knowledge of action on organisms of high doses of ionizing radiation, but have no, neither sufficient data, nor theoretical ideas of influence on the world of wildlife of the natural and technogenic raised background radiation surrounding us in the field of small doses of radiation.*

Key words: small doses of ionizing radiation, syndrome of deficiency of radiation, radiation adaptation, radiation hormesis, radiosensitivity of plants.

Вопрос о малых дозах ионизирующего излучения и их биологических эффектах, особенно проблема их количественной оценки (как и любых иных факторов малой интенсивности), продолжает оставаться предметом многочисленных дискуссий и противоположных мнений по поводу их опасности в отношении биоты, в том числе, и для человека. Понятие «малые дозы» не имеет единого определения. Поэтому Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) рекомендовал дозы в 200 мГр и ниже относить к малым дозам, а мощность дозы 0,1 мГр/мин и ниже – к малым мощностям доз [1]. Например, в Якутии находится Эльконский урановорудный район, расположенный в центральной части Алданского щита (Южная Якутия) [2]. В ходе радиэкологических работ были обследованы территории некоторых участков горных выработок, расположенных на водоразделе рек Русская, Акин и Курунг. Проведенная  $\gamma$ -съемка показала, что мощность экспозиционной дозы (МЭД) горных пород по  $\gamma$ -компоненте варьировала от 4 до 100 мкР/ч и более (общепринятая норма – от 4 до 20 мкР/ч [3]). Повышенный  $\gamma$ -фон характерен на выходах гранитов, а пониженный – для метаморфизованных и осадочных пород. В отвалах складированных горных пород и руд МЭД  $\gamma$ -излучения на поверхности изменялась от 15 до 3000 мкР/ч [4]. В настоящее время урановые месторождения Эльконского района являются наиболее крупными из известных потенциальных источников уранового сырья России, способными при изменении конъюнктуры цен на уран обеспечить их ведущую роль. Негативными факторами для отработки этих месторождений являются – относительно невысокие содержания урана в рудах (0,10–0,15%) и глубокое их залегание (более 300 м от поверхности) [5].

Природа естественной радиоактивности. Проблема малых доз ионизирующих излучений (ИИ) была и остаётся наиболее сложной, имеющей не только радиобиологическое, но и социально-экономическое значение. Растительные и животные организмы в процессе эволюции жизни на Земле подвергаются постоянному внутреннему и внешнему облучению от естественных источников радиации. В отдельных

регионах с повышенным содержанием радионуклидов в земной коре и на больших высотах доза превышает среднюю в 10 и более раз. Облучению от естественных источников радиации подвергается любой живой организм. Доза облучения зависит от места обитания (проживания) человека, животных и растений. Следует отметить, что выделяют два вида облучения: внешнее и внутреннее. Внешнее облучение создается за счет космических лучей, которые приходят к нам из глубины Вселенной, но некоторая часть их рождается на Солнце во время солнечных вспышек. Нет на Земле такого места, куда бы не падал этот невидимый космический душ [6]. Другая составляющая внешнего облучения – земная радиация, за счет встречающихся в горных породах Земли ряда радиоактивных элементов, включенных в ее состав с самого ее возникновения. Это калий-40, рубидий-87 и члены радиоактивных семейств, берущих начало от урана-238 и тория-232. Внутреннее облучение осуществляется за счет поступления радиоактивных веществ в организм с пищей, водой и воздухом. Прежде чем попасть в организм человека радиоактивные вещества проходят сложный путь по цепочке питания в окружающей среде. Например, такие радиоактивные изотопы как  $^{40}\text{K}$ , нуклиды радиоактивного ряда  $^{238}\text{U}$  и  $^{232}\text{Th}$  ( $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$ ) поступают в организм человека с пищей даров моря (рыба, моллюски). На Крайнем Севере, где в рационе людей преобладает мясо оленя, преимущественно питающегося лишайниками, которые концентрируют значительное количество  $^{210}\text{Pb}$  и  $^{210}\text{Po}$ , дозы внутреннего облучения местного населения могут превышать средний уровень в 35 и более раз [7].

О биологическом значении естественного радиационного фона (ЕРФ) Земли существуют противоречивые суждения. Согласно одним моделям фоновое облучение вредно, согласно другим – оно является необходимым фактором возникновения и эволюции жизни на Земле [8,9]. На Земле имеются районы (Индия, Бразилия, Китай, Иран, Франция, Кавказ и др.), где ЕРФ в 10 и более раз превышает среднепланетарный (>0,1 бэр/год) [10]. Многочисленные комплексные медицинские исследования не выявили до-

полнительных нарушений в состоянии здоровья местного населения по сравнению с регионами со среднепланетарным уровнем ЕРФ, в том числе по таким показателям, как уровень онкологической заболеваемости, состояние репродуктивного здоровья и др. [11]. Наоборот, жители этих районов, как правило, имеют более высокую среднюю продолжительность жизни и меньше болеют раком. Более того, у жителей Хиросимы и Нагасаки, получивших во время атомной бомбардировки малую дозу радиации, не отмечено роста заболеваемости злокачественными опухолями. Оценивая опасность малых доз ионизирующего излучения, следует учитывать, что во внешней среде кроме радиации имеется много других вредных агентов физической, химической и биологической природы, многие из которых являются канцерогенами, и опасность их воздействия значительно выше опасности малых доз радиации.

Феномены малых доз ионизирующего излучения. В настоящее время накоплен достаточный объем фактического материала и опубликовано большое количество работ о влиянии повышенных уровней естественного радиационного излучения на организмы, входящие в состав популяций [10,12–19]. Силами сотрудников Коми НЦ УрО АН СССР проведено большое количество наблюдений и экспериментов в районе месторождения уранорудных руд. С одной стороны, были выявлены факты, указывающие на негативное действие повышенного естественного радиационного фона (ПЕРФ) на жизненные показатели организмов растений и животных. Например, было отмечено, что длительное произрастание популяции *Vicia cracca* L. в условиях уранорудного загрязнения приводит к значительному повышению радиочувствительности, за счет накопления в геноме проростков семян мышиного горошка хромосомных перестроек, приводящих к образованию аберрантных клеток, отличающихся пониженной устойчивостью семян этого растения к вторичному воздействию  $\gamma$ -излучений в высоких дозах [20–22]. Это согласуется с результатами Б.И. Груздева [1978], который на примере семян дикорастущих злаков, произрастающих в условиях ПЕРФ, отмечал повышение их радиочувствительности к острому облучению [23]. Эксперименты с *Vicia faba* L. показали, что при их произрастании на почвах, в которых содержание U и Ra повышено в 10 раз по сравнению с фоном, отмечаются морфологические и физио-

логические изменения растений (задержка верхушечного роста стебля, новообразования у листьев, уменьшение общебиологической продуктивности и урожая) [24–26]. Было также установлено, что проживание полевых-экономок в зоне уранорудного месторождения вызывает у них повышенную аллергическую реакцию к другим факторам среды: уменьшается продолжительность жизни, сокращается их плодовитость [27]. У мышевидных грызунов были отмечены также существенные отклонения в поведенческих реакциях, влияющие, в основном, на молодую часть популяции. Раннее половое созревание грызунов и смещение гормональной активности приводит к появлению неполноценного потомства и уменьшению плодовитости [28]. Комплекс подобных признаков получил название синдрома дефицита облучения. В его основе лежит угнетение процессов клеточной пролиферации. Также обнаружен ряд феноменов, характерных для хронически облучаемых популяций (на примере арабидопсиса и василька): повышенная радиостойчивость (радиоадаптация) и мутагенез облучаемых популяций, появление аномальных кариотипов и др. [29]. Предполагается, что причиной этого является стимуляция всех метаболических процессов [17].

Вместе с тем, проведенные нами эксперименты на семенах ольховника кустарникового показали, что семенное потомство растений, длительное время произрастающих в условиях разных МЭД ПЕРФ, было более радиостойчиво к острому облучению  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  (по значениям  $Dq$  – длина плеча и  $\text{tg}\alpha$  угла наклона кривой «доза-эффект»; таблица).

Ранее нами был предложен метод анализа кривой «доза-эффект» по натурально-логарифмическим анаморфозам выживаемости одномесячных проростков на стадии листообразования (рис. 1) [17].

Дозовая кривая в этих координатах была разделена на две части. Первая часть («АВ», плечо дозовой кривой) – диапазон доз, в котором сохраняется способность организма поддерживать гомеостаз и функциональную активность генетического аппарата (за счет систем антиоксидантной защиты и ДНК-репарирующих систем), несмотря на усиливающееся действие радиационного фактора. Проецируя длину плеча (L) на

Т а б л и ц а

Значения дозы перегиба ( $Dq$ , Гр) семенного потомства ольховника кустарникового в зависимости от МЭД ПЕРФ произрастания материнских растений

МЭД, мкР/ч	20±0,2	50±0,5	100±1,0	150±1,5	300±3,0	500±5,0	800±8,0	1000±10,0
$Dq$ , Гр	15,0±1,5	18,0±1,8	20,0±2,0	12,0±1,2	30,0±3,0	17,0±1,7	15,0±1,5	10,0±1,0

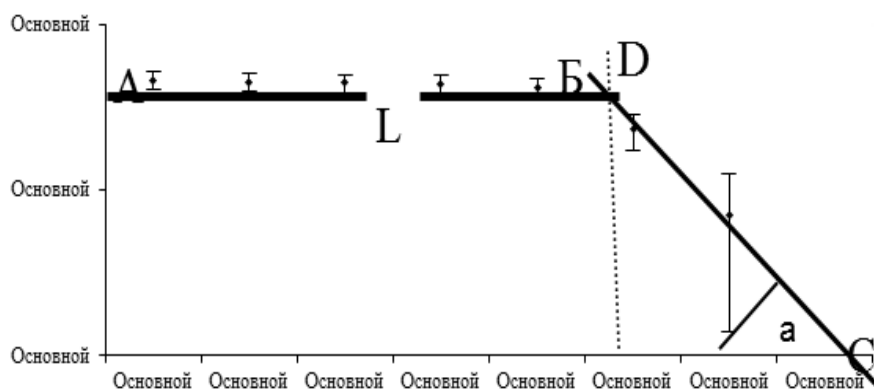


Рис. 1. Кривая «доза-эффект», выполненная в логарифмических координатах: по оси абсцисс – ln дозы; по оси ординат – ln значений наблюдаемых параметров

ось абсцисс, получали важную количественную характеристику – значение пороговой дозы ( $D_q$ , Гр). Мерой способности организма противостоять нарастающему облучению (за счет антиоксидантных, ДНК-репарационных и других защитных или восстановительных систем), сохраняя гомеостаз, является значение пороговой дозы. Вторая часть дозовой кривой – «BC» характеризовалась обратно пропорциональной зависимостью изучаемого критерия от величины дозы облучения. Количественно эту зависимость оценивали по тангенсу угла наклона ( $tg\alpha$ ) второго участка дозовой кривой, величина которого была тем больше, чем быстрее снижались наблюдаемые физиолого-биохимические показатели в интервале больших доз радиации. Наклонный участок дозовой кривой характеризует второй вид устойчивости – резистентность самих приспособительных (геномных) систем.

Таким образом, ПЕРФ выступает в качестве «мягкого, тренирующего» стресс-фактора по отношению к растительным и животным организмам, что выражается в изменении морфологических, физиологических и биохимических стандартов организма. Биота адаптировалась к слабому действию ионизирующих излучений. Выработалась и генетически закрепились система восстановления и элиминации повреждённых молекул и клеток (репарация повреждений ДНК, мембран, регуляция межклеточных отношений, апоптоз и др.). Радиационный фон, таким образом, является стимулятором деления клеток, и, следовательно, процессов роста, обновления и восстановления тканей, одним из механизмов поддержания структурного гомеостаза. Изучение генетических процессов у организмов, получающих малые дозы радиации, привело к открытию феномена радиоадаптации [14,30,31]. Устойчивость к острому облучению

при этом возрастает. Она может происходить за счет адаптации на уровне генома или индуцибельной активации синтеза метаболитов, часто оказывающих радиопротекторный эффект [9,32,33].

С другой стороны, эксперименты, проведённые с лабораторными животными, растениями и микроорганизмами, длительное время находившимися в условиях пониженного в несколько раз радиационного фона, показали тесную связь процессов жизнедеятельности и влияющего на них ионизирующего излу-

чения. При этом замедлялся рост животных, они теряли в весе, становились менее активными и менее сообразительными. Отмечались признаки анемии и выраженного иммунодефицита, который сопровождался развитием инфекционных процессов и злокачественных опухолей. Морфологически в их тканях обнаруживались атрофические изменения, аналогичные ускоренному старению. Продолжительность жизни сокращалась. Более радикально подошел к решению вопроса о роли естественного радиоактивного фона в жизнедеятельности организмов французский исследователь Г. Планель в 1966 г. на III Международном конгрессе по радиационным исследованиям в Кортино Д'Ампеццо (Италия), где он впервые сообщил о своих экспериментах по наблюдению за темпом размножения простейшего организма парамеции (*Paramecium caudatum*) при экранировании от естественного фона радиации. Для экранирования он применил свинцовые пластины толщиной в 5 и 10 см. Измерение активности  $\gamma$ -лучей сцинтилляционным счетчиком в области от 0 до 2 МэВ показало, что толщина свинца в 5 см снижает естественный фон облучения в 10 раз, в 10 см – примерно в 25 раз. В этих условиях за 10 дней наблюдения Планель с сотрудниками отметил снижение размножения парамеций. Оно было уже достоверно при 5 см свинца, и эффект увеличивался при защите толщиной в 10 см. Эти результаты позволяют сделать вывод о том, что естественный радиоактивный фон не просто небезразличен, а совершенно необходим для нормального течения жизненных процессов на нашей планете. Описанные факты заставляют более внимательно относиться к гипотезе, сформулированной еще в 1932 г. А.Г. Гурвичем – талантливым советским исследователем, открывшим митогенетические излучения в биоло-

гии. Гурвич, обнаружив ускорение деления клеток при облучении коротковолновым ультрафиолетом (190–220 нм) очень малой интенсивности (порядка нескольких квантов), пришел к выводу, что деление клетки обусловлено двумя факторами: во-первых, метаболическими процессами, приводящими клетку в состояние, готовое к делению, и, во-вторых, пусковым фактором, роль которого выполняют высокоэнергетичные кванты ультрафиолета. По-видимому, роль «пусковых факторов» могут играть и кванты ионизирующей радиации, что хорошо объясняет результаты опытов, описанных выше [34].

Радиационный гормезис. В последнее время появились многочисленные данные о стимулирующем действии малых доз, сравнимых с дозами, которые получает организм в условиях ПЕРФ [14,15]. Небольшое повышение ЕРФ воспринимается организмом как явление благоприятное, однако его резкое увеличение снижает жизнеспособность организма, может привести к его гибели. Такая инверсия радиационного эффекта получила в работах А. М. Кузина [14,16] название «радиационного гормезиса» [35]. При дозах в пределах до 10– и даже 100–кратного превышения над фоном (в среднем в 5–10 раз) повреждающее влияние радиации на организм человека не прослеживается. Напротив, отмечается выраженное биостимулирующее действие, то есть повышается жизнеспособность организма под влиянием малых доз ионизирующей радиации. Например, проведенные нами исследования состояния здоровья и иммунного статуса людей, постоянно проживающих и работающих в зоне ураноториевого месторождения Южной Якутии, показало, следующую картину. У людей, у которых реактивность неспецифических защитных сил организма и иммунитета сформировались до приезда в зону ПЕРФ и не были нарушены в результате хронических заболеваний, многолетнее облучение малыми дозами ионизирующего излучения привело к улучшению состояния здоровья, дополнительной стабилизации неспецифической адаптивной реакции и иммунных показателей (концентрация иммуноглобулинов А, М, G, уровень R-белков, содержание естественных антител в сыворотке крови), к началу процесса радиоадаптации. А у группы лиц с изначально сниженной активностью защитных систем наблюдалось ухудшение состояния здоровья при длительном проживании в этом районе [36].

Радиационный гормезис был установлен в ряде мест на Земле, где  $\gamma$ -фон превышает в 2–10 раз средний по планете. В этих районах смертность от злокачественных новообразований соответствует среднему уровню в популяции и

даже ниже. Несомненно, что живые организмы в процессе жизни на Земле адаптировались к ЕРФ. Оригинально поставленные эксперименты показали достоверное замедление развития высших растений при снижении ЕРФ [9]. То есть биота на нашей планете использует малые дозы радиации и нуждается в них [16,37]. Этот вывод, с одной стороны, хорошо согласуется с многочисленными работами, показавшими, что  $\gamma$ -облучение в небольших дозах стимулирует развитие растений [9,35,38], а с другой – находится в противоречии с общепринятым положением в радиобиологии о вредности любой дозы радиации для биоты. В свете имеющихся фактов по радиационному гормезису, вредное действие радиации, благодаря актам ионизации, начинается, видимо, действовать на организмы при достижении определенного уровня мощности и дозы облучения, которое на несколько порядков выше даже ПЕРФ. Из-за этого и сформировалось мнение о вредном действии радиации, даже если она действует в малых дозах. При малых дозах целостный организм с его способностью к репарации, регенерации, элиминации малых различных повреждений ликвидирует последствия ионизации, и ведущее значение в наблюдаемой стимуляции жизненных процессов приобретает возбуждение молекул, в первую очередь биополимеров – ДНК и белков. Предполагается, что при  $\gamma$ -облучении семян растений в малых дозах, в их биополимерах (ДНК и белках) возникают поляритоны, которые дают вторичное когерентное излучение малой интенсивности, обладающее стимулирующей биологической активностью [14,15].

Радиочувствительность растений. Для различных живых организмов малые дозы неодинаковы. Для человека малые поглощенные дозы – 4-5 рад (эту дозу человек получает за всю жизнь в условиях ЕРФ). «Малая доза» тем выше, чем более радиорезистентны организмы. Значительной радиорезистентностью обладают обитатели степей и пустынь, например, песчанки (грызуны) и скорпионы. Растения очень высокоустойчивы к радиации (полулетальная доза для них измеряется сотнями и тысячами Гр), в особенности это относится к сухим семенам растений, некоторым водорослям, а также спорам бактерий и грибам, переносимым без заметного вреда до 10 Гр и более. Другими словами, малая доза поглощенной радиации для растений является абсолютно смертельной для всех животных и человека.

Известно, что северные экосистемы обладают, в целом, пониженной общей стрессоустойчивостью [39], в том числе и ионизирующему излучению. Само по себе действие ПЕРФ явля-

ется низкоинтенсивным, но на фоне стрессирующего действия экстремальных климатических факторов Якутии оно может вызвать резкую реакцию биоты, приводящую к изменению степени ее устойчивости. Наряду с токсическим действием тяжелых естественных радионуклидов и ПЕРФ на организмы, в них происходят процессы адаптации к комплексу экстремальных нерадиационных и радиационных воздействий. Интегральная реакция организмов на комплекс воздействий будет зависеть от уровня мощности экспозиционной дозы ПЕРФ и от адаптивных (или деструктивных) изменений активности защитных и репарационных систем клетки и организма [40]. Ряд видов растений, произрастающих в течение длительного времени в условиях разных мощностей экспозиционных доз ПЕРФ (Эльконский горст), были исследованы для выявления их физиолого-биохимических адаптаций, формирующих лучевую реакцию при остром дополнительном воздействии  $\gamma$ -квантами. Среди растений, выросших на техногенных отвалах, наиболее подробно и полно исследован ольховник кустарниковый. Этот вид заселил каменистые отвалы более 60 лет назад, отличается высокой плотностью произрастания и обильным плодоношением. Кроме этого, ольховник кустарниковый произрастает при разнообразных мощностях экспозиционных доз (от 20 до 1000 мкР/ч), которые формировались за счет вкраплений в субстрат отвалов урансодержащих минералов (бранерит и урановая слюдка). Семена ольховника кустарникового, сформированные в условиях разных МЭД, получили острое предпосевное дополнительное облучение  $\gamma$ -квантами  $^{60}\text{Co}$  в диапазоне доз от 5 до 500 г. Результаты, приведенные в табл. 1. показывают, что радиочувствительность семян этого вида, характеризуемая пороговой дозой ( $D_q$ , Гр), изменяется нелинейно, по мере увеличения МЭД ПЕРФ. Было установлено, что между суммарной антиоксидантной защитой, характеризуемой нормированным показателем  $k_{\text{аоз}}$  и радиостойкостью семян ольховника кустарникового ( $D_q$ ) имеется нелинейная зависимость (рис. 2).

Полученные результаты позволили выявить ряд механизмов биохимических адаптаций ольховника кустарникового к разным МЭД ПЕРФ, а также их влияние на радиочувствительность его семян и выживаемость 30-ти дневных проростков. Установлено, что при значениях МЭД от 50 до 500 мкР/ч относительное сохранение (и даже повышение) жизнеспособности и радиостойкости проростков и семян ольховника кустарникового к дозам острого облучения обеспечивается за счет повышения суммарной

антиоксидантной защиты, сформированной как адаптация к ПЕРФ с максимумом при мощности экспозиционной дозы ПЕРФ 300 мкР/ч.

Длительное существование материнских растений в условиях экспозиционных доз 100, 150 и 300 мкР/ч привело к наложению антиоксидантной радиоадаптации на радиационную стимуляцию внутриклеточных метаболических процессов. Однако последнее сопровождается увеличением степени диспергированности и, следовательно, повышением уязвимости хроматина к действию излучения. При этом сохранение (иногда и повышение) жизнеспособности проростков и высокой радиостойкости семян, созревших в условиях ПЕРФ, обеспечивается за счет активации систем репарации генома (рис. 3.) [18]. То есть, наблюдался эффект радиационной стимуляции всех метаболических процессов,

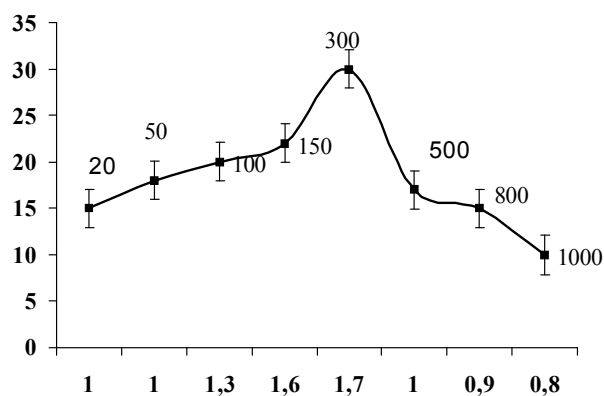


Рис. 2. Значения  $D_q$  и суммарной антиоксидантной защиты проростков ольховника кустарникового: по оси абсцисс – суммарная антиоксидантная защита; по оси ординат – значения  $D_q$ , Гр; цифрами указаны значения МЭД ПЕРФ, мкР/ч

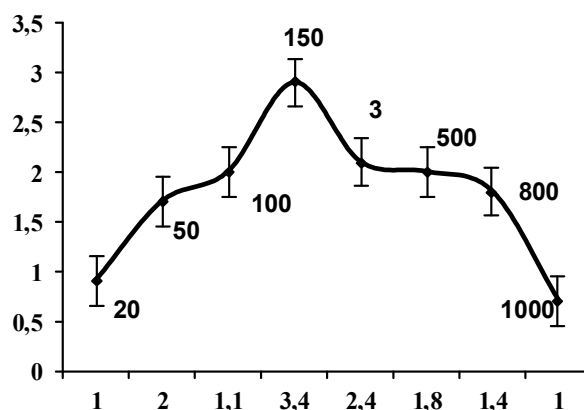


Рис. 3. Значения  $tg\alpha$  и общая активность генома клеток корневой меристемы проростков ольховника кустарникового: по оси абсцисс – общая активность генома (расчет); по оси ординат – значения  $tg\alpha$ ; цифрами указаны значения МЭД ПЕРФ, мкР/ч

особенно на уровне антиоксидантной системы [17].

Полезны или вредны малые дозы ионизирующего излучения? В последние годы российская и зарубежная наука уделяет все большее внимание изучению действия малых доз различных физических факторов на человека. В отечественных и зарубежных журналах появились научные публикации о влиянии малых и сверхмалых доз радиации на человека. В связи с испытанием ядерного оружия в середине XX века, использования атомной энергии, ионизирующего излучения в народном хозяйстве произошло увеличение радиационного фона на планете. Поэтому стали больше уделять внимания исследованиям действия радиации в относительно малых дозах. Биологические эффекты облучения малыми дозами радиации, близкими к ЕРФ, у организмов зависят от величины полученной дозы. Часто с увеличением дозы облучения увеличивается положительный эффект, например, наблюдается ускоренное прорастание и улучшение всхожести семян и др., на фоне снижения скорости деления клеток. В диапазоне сверхмалых и малых доз установить зависимость «доза-эффект» – крайне затруднительно. Для определения достоверности эффектов малых доз радиации необходимо в тысячи раз увеличить количество экспериментальных организмов, которые были бы однородной популяцией в однородных (единообразных) условиях окружающей среды, чего достичь крайне трудно. Учитывая сказанное, можно сделать вывод, что экспериментальная проверка беспороговой или пороговой концепции действия радиации на организм является крайне сложной и на сегодня нерешенной. Несомненно, в области выяснения эффектов влияния малых доз на живые системы нас ждут новые открытия. Одно из направлений таких открытий становится ясным сейчас: эффекты взаимодействия радиации с другими факторами риска, порознь, не так опасны. Оказалось, например, что малые количества пестицидов могут усиливать действие радиации. То же самое происходит при действии радиации в присутствии небольших количеств ртути. Недостаток селена в организме усиливает тяжесть радиационного поражения. Известно, что у курьшиков, подвергающихся облучению в эквивалентной дозе 15 мЗв/год (максимально допустимая эффективная дозарadiации – 150 мЗв/год), риск заболеть раком легких возрастает более чем в 16 раз по сравнению с некурящими. Известно также, что на фоне небольшого по величине хронического облучения разовое кратковременное дополнительное облучение дает эффект, много более значимый, чем при про-

стом суммировании этих доз [41]. Другое быстро развивающееся направление изучения влияния малых доз облучения – работы школы профессора Е.Б. Бурлаковой, которыми на многих объектах убедительно доказывается резкое нарушение монотонной зависимости «доза-эффект», а именно в зоне сверхмалых доз облучения происходит до конца непонятное по механизмам, но устойчиво повторяющееся резкое возрастание чувствительности организмов к облучению. Например, при облучении эквивалентными дозами до 0,1 Зв число смертельных лейкозов оказывается столь же значительным, как при облучении многократно большими дозами. Установлено также, что повреждения хромосом и злокачественная трансформация клеток при малых дозах примерно на порядок выше, чем можно было бы ожидать при экстраполяции влияния высоких доз в диапазон малых. Возможно, эффект такого взаимодействия радиации с другими факторами риска основан на сенсibilизации (повышении чувствительности) организма, испытавшего воздействие малых доз облучения к химическим мутагенам и канцерогенам [42].

Радиобиологи обладают весьма солидным багажом знаний о действии на биомолекулы, клетки, организмы высоких доз ионизирующего излучения, но не имеют достаточных ни данных, ни теоретических представлений о влиянии на окружающий нас мир живой природы природного и техногенного повышения радиационного фона, например, всего в 2–4 раза.

*Обзор выполнен в рамках НИР VI. 56. 1. 5. «Физиолого-биохимические механизмы формирования адаптивного потенциала, устойчивости и продуктивности растительных компонентов экосистем Южной и Центральной Якутии» (№ госрегистрации – 01201282194).*

### Литература

1. *Ионизирующие излучения: источники и биологические эффекты: доклад на Генеральной Ассамблее ООН. – 1988. – Т. 1. – 882 с.*
2. *Наумов С.С. Урановые месторождения Алдана / С.С. Наумов, М.В. Шумилин // Отечественная геология. – 1994. – № 11/12. – С. 20–23.*
3. *Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ-99): 2.6.1. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность СП 2.6.1. 799–99 –М.: Минздрав России, 2000. – 98 с.*
4. *Собакин П.И. Радиоэкологические исследования в горно-таежных ландшафтах Эльского урановорудного района / П.И. Собакин, И.В. Молчанова, В.Е. Ушницкий, А.П. Чевычелов // Радиационная безопасность Республики*

Саха (Якутия). – Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. – 472 с.

5. Наумов С.С. Годы и открытия: очерк истории урановой геологии России / С.С. Наумов, М.В. Шумилин // Отеч. геология. – 1995. – № 4. – С. 5–10.

6. Василенко И.Я. Радиация. Источники. Нормирование облучения // Природа. – 2001. – № 4. – С. 10–16.

7. Радиация. Дозы, эффекты, риск. – М.: Мир, 1988. – 79 с.

8. Бурлакова Е. Б. Особенности биологического действия малых доз облучения / Е.Б. Бурлакова, А.Н. Голощапов, Н.В. Горбунова и др. // Радиационная биология. Радиобиология. – 1996. – Т. 36. – С. 35–38.

9. Кузин А.М. Стимулирующее действие ионизирующих излучений на биологические процессы. – М., 1977. – 275 с.

10. Гродзинский Д.М. Радиобиология растений. – Киев: Наукова думка, 1989. – 380 с.

11. Алексахин Р.М. К вопросу о малых дозах ионизирующих излучений / Р.М. Алексахин, В.А. Книжникова, А.И. Тоскаева // Радиобиология. – М. – 1986. – Т. 26, вып. 3. – С. 292–295.

12. Semerdzhian S.P. Role of thiols in determining the X radiosensitivity of wheat seeds / S.P. Semerdzhian, N.G. Nor-Arebian, D.O. Oganessian // Radiobiologia. – 1973. – № 2. – P. 303–306.

13. Гродзинский Д.М. Формирование радиобиологической реакции растений / Д.М. Гродзинский, К.Д. Коломиец, И.Н. Гудков. – Киев: Наукова думка, 1984. – 216 с.

14. Кузин А.М. Проблема малых доз и идеи гормезиса в радиобиологии // Радиобиология. – 1991. – Т. 31, вып. 1. – С. 16–21.

15. Кузин А.М. Возможные механизмы участия природного радиационного фона (ПРФ) в стимуляции деления клеток // Радиационная биология. Радиозэкология. – 1994. – Т. 34. – С. 398–401.

16. Радиоактивность среды обитания как необходимый фактор нормального существования и развития растений // Физиология растений. – 1998. – Т. 45, №3. – С. 472–474.

17. Журавская А.Н. Адаптация к экстремальным условиям среды и радиочувствительность растений Якутии. – Новосибирск: Наука, 2011. – 104 с.

18. Журавская А.Н. Повышенный естественный радиационный фон и растение / А.Н. Журавская, С.Ю. Артамонова. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2014. – 153 с.

19. Mironenko N.V. Intraspecific variation in gamma-radiation resistance and genomic structure in the filamentous fungus *Alternaria alternata*: a case study of strains inhabiting Chernobyl reactor

№ 4 / N.V. Mironenko, I.A. Alekhina, N.N. Zhdanova, S.A. Bulat // *Ecotoxicol Environ Saf.* – 2000. – № 2. – P. 177–187.

20. Радиация как экологический фактор при антропогенном загрязнении // Тр. Коми филиала АН СССР. – Сыктывкар, 1984. – № 67. – 128 с.

21. Радиочувствительность растений и животных биоеценозов с повышенным радиационным фоном // Тр. Коми НЦ УрО АН СССР. – Сыктывкар, 1988. – № 97. – 217 с.

22. Радиозэкология биоеценозов с повышенным фоном естественной радиоактивности // Тр. Коми филиала АН СССР. – Сыктывкар, 1987. – № 81. – 178 с.

23. Груздев Б.М. Действие повышенной естественной радиации на радиорезистентность семян дикорастущих злаков // Инф. бюл. АН СССР, Научный совет по проблемам радиобиологии. – 1978. – Вып. 24. – С. 63–64.

24. Владимиров Ю.А. Перекисное окисление липидов в биологических мембранах / Ю.А. Владимиров, А.И. Арчаков. – М.: Наука, 1972. – 335 с.

25. Гаркави Л.Х. Антистрессорные реакции и активационная терапия / Л.Х. Гаркави, Е.Б. Квакина, Т.С. Кузьменко. – М.: ИМЕДИС, 1998. – 656 с.

26. Надежность и гомеостаз биологических систем // Сб. науч. тр. – Киев: Наукова думка, 1987. – 215 с.

27. Маслова К.И. Влияние экологического фактора повышенной естественной радиоактивности на организм мышевидных грызунов // Радиозэкология позвоночных животных. – М.: Наука, 1978. – С. 33–59.

28. Маслова К.И. Биологическое действие повышенной радиоактивности на организм животных в природной среде / К.И. Маслова, И.Н. Верховская // Проблемы радиозэкологии и биологического действия малых доз ионизирующей радиации. – М.: Наука, 1978. – С. 33–59.

29. Шевченко В.В. Генетические эффекты в популяциях растений, произрастающих в зоне Кыштымской и Чернобольской аварий / В.В. Шевченко, В.А. Кальченко, В.И. Абрамов, А.В. Рубанович, Л.И. Гриних // Радиационная биология. Радиозэкология. – 1999. – Т. 39, № 1. – С. 162–176.

30. Лучник Н.В. Биофизика цитогенетических поражений и генетический код. – Л.: Медицина, 1968. – 295 с.

31. Позолотин А.А. К вопросу о влиянии предварительного гамма-облучения на последующую радиочувствительность семян гороха / А.А. Позолотин, Л.К. Альшиц // Радиобиология. – 1974. – № 14, Вып. 1. – С. 154–156.



32. Dicke R.H. Coherence in Spontaneous Radiation Processes // Phys. Rev. – 1954. – Vol. 93. – P. 99–100.
33. Li K.H. Coherence in Physics and Biology / K.H. Li // Recent Advances in Biophoton Research; Tds Popp [et al.]. – Singapore: World Sci. Publ., 1992. – P. 113–156.
34. Кузин А.М. Невидимые лучи вокруг нас. – М.: Наука, 1979. – 151 с.
35. Luchkey T.D. Hormesis with Ionizing Radiation. – Boca Raton: CRC Press Inc., – 1980. – 169 p.
36. Кершенгольц Б.М. К вопросу о влиянии естественной радиации на иммунный статус и здоровье человека в Якутии / Б.М. Кершенгольц, А.Н. Журавская, П.Г. Петрова, Д.А. Захарова, Н.В. Радзевичуте // Радиационное загрязнение территории РС(Я): проблемы радиационной безопасности. – Якутск, 1993. – С. 61–63.
37. Report of the United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. – N.Y.: United Nations, 1958. – P. 49–60.
38. Гераськин С.А. Концепция биологического действия малых доз ионизирующего излучения на клетки // Радиационная биология. Радиоэкология. – 1995. – Т. 35, вып. 5. – С. 571–580.
39. Ларионов В. П. Главный приоритет – новые технологии / В.П. Ларионов, В.Е. Михайлов, А.М. Иванов // Наука и образование. – 1998. – № 4. – С. 10–13.
40. Журавская А.Н. Влияние биохимических адаптаций ольхи кустарниковой (*Duschecia fruticosa* (Rupr)) к повышенному естественному радиационному фону на выживаемость проростков и радиочувствительность ее семян / А.Н. Журавская, Э.В. Филиппов, Б.М. Кершенгольц // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2000. – Т. 40, № 3. – С. 254–260.
41. Бурлакова Е.Б. Воздействие химических агентов в сверхмалых дозах на биологические объекты / Е.Б. Бурлакова, А.А. Кондратов, И.В. Худяков // Изв. РАН. Сер. Биол. – 1990. – № 2. – С. 184–193.
42. Бурлакова Е.Б. Действие сверхмалых доз биологически активных веществ и низкоинтенсивных физических факторов / Е.Б. Бурлакова, А.А. Кондратов, Е.Л. Мальцева // Химическая физика. – 2003. – Т. 22, № 2. – С. 21–40.

Поступила в редакцию 24.03.2016

УДК: 576.3.08:633.88

## Влияние малых концентраций ионов тяжелых металлов на цитологические характеристики проростков ромашки лекарственной (*Matricaria chamomilla* L.)

Г.В. Филиппова, А.А. Шеин, И.А. Прокопьев, Э.В. Филиппов

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН, г. Якутск*

*Исследовано действие ионов свинца и кадмия в концентрациях  $3 \div 120$  мкМ на цитологические характеристики апикальной меристемы корешков проростков ромашки лекарственной (*Matricaria chamomilla* L.) сорта «Подмосковная». Установлена тенденция к возрастанию дестабилизации структур хромосом в клетках апикальной меристемы корешков ромашки лекарственной (число клеток с микроядрами составляло от 0,2 до 2,3%) на ранних стадиях прорастания при увеличении концентрации ионов  $Pb^{2+}$ ,  $Cd^{2+}$  и их совместного присутствия, при этом частота формирования микроядер в изученном диапазоне концентраций  $Pb^{2+}$  и  $Cd^{2+}$  имела бимодальный характер. Отмечено снижение митотического индекса во всем диапазоне микромолярных концентраций свинца (кроме концентрации 3 мкМ) и стимуляционное действие ионов  $Cd^{2+}$  в концентрациях 30 и 60 мкМ на деление меристематических клеток корня.*

Ключевые слова: *Matricaria chamomilla* L., ионы свинца и кадмия, апикальная меристема, митотический индекс, микроядра.

---

ФИЛИППОВА Галина Валерьевна – к.б.н., с.н.с.; e-mail: nureeva@yandex.ru; ШЕИН Алексей Анатольевич – к.б.н., уч. секр., e-mail: bg98saa@yandex.ru; ПРОКОПЬЕВ Илья Андреевич – к.б.н., с.н.с., e-mail: ilya.a.prokopiev@gmail.com; ФИЛИППОВ Эдуард Васильевич – к.б.н., с.н.с., e-mail: Edy73@mail.ru.