

## РАДИОЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ СЕМЯН РАСТЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ К ОСТРОМУ ГАММА-ОБЛУЧЕНИЮ

Э.В. Филиппов, Е.И. Троева

*Институт биологических проблем криолитозоны СО РАН,  
677980, Якутск, просп. Ленина, 41, e-mail: Edy73@mail.ru*

Изучена радиочувствительность семян 21 вида растений, относящихся к представителям 10 семейств высших сосудистых растений Центральной Якутии, из них для 18 видов определена впервые. Показана таксономическая дифференциация радиостойчивости семян по семействам растений. Выявлена изменчивость радиочувствительности, обусловленная температурно-влажностными условиями вегетации и созревания семян в год сбора.

**Ключевые слова:** семена, острое гамма-облучение, выживаемость, проростки, радиочувствительность, классификация, Центральная Якутия.

## RADIOSENSIBILITY OF PLANT SEEDS TO ACUTE GAMMA IRRADIATION IN CENTRAL YAKUTIA

E.V. Filippov, E.I. Troeva

*Institute for Biological Problems of Cryolitozone, SB RAS,  
677980, Yakutsk, Lenin str., 41, e-mail: Edy73@mail.ru*

Radiosensibility of seeds of 21 plant species belonging to 10 families and growing in Central Yakutia was studied. Among them, 18 species were examined for the first time. The taxonomical differentiation by families in respect to resistance of seeds to gamma irradiation was shown. The variability in radiosensibility was stated to be dependant on temperature-humidity conditions during vegetation and seed ripening.

**Key words:** seeds, acute gamma irradiation, survival, seedlings, radiosensibility, classification, Central Yakutian.

### ВВЕДЕНИЕ

Изучение адаптационных возможностей растений к различным по своей природе стресс-факторам актуально для прогнозирования устойчивости функционирования экосистем в условиях нестабильной среды, при возрастающей антропогенной нагрузке в целом и радиации в частности. Растительный мир Якутии с этой точки зрения уникален не только с позиции биоразнообразия в условиях резко континентального климата, но и с позиции устойчивости растений к воздействию стресс-факторов (Алексеев, 1994).

Известно, что покоящиеся семена растений более устойчивы к действию ионизирующих излучений, чем взрослые растения (Преображенская, 1971). Однако выживаемость популяции в целом будет определяться именно сохранением жизнеспособности семян растений. Большое количество работ посвящено исследованию радиочувствительности организмов (Преображенская,

1971; Кузин, 1972; Гродзинский, 1989). Основное внимание уделяется культурным видам, вместе с тем радиочувствительность семян дикорастущих видов растений, произрастающих на Северо-Востоке России и являющихся важным компонентом биосферы, до сих пор остается недостаточно изученной. Так, в работах А.Н. Журавской и др. (1997) и Э.В. Филиппова (2000) приведена сравнительная радиочувствительность семян 50 видов дикорастущих растений Центральной Якутии, где показана специфика устойчивости семян аборигенных видов к острому гамма-облучению, что, конечно, недостаточно с точки зрения количества изученных видов для региона, имеющего самую большую по площади территорию в России.

Цель настоящей работы – изучить радиочувствительность семян наиболее распространенных видов дикорастущих растений Центральной Якутии к острому гамма-облучению.

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Сбор семян исследуемых видов растений осуществлялся с августа по сентябрь 2014 г. в соответствующие для каждого вида сроки созревания. Место сбора – разнотравно-злаковые луга долины Туймаада Центральной Якутии. Исследовали 21 вид растений, относящихся к 10 семействам.

Семена дикорастущих растений были просушены в сухом проветриваемом темном помещении. Предпосевное облучение семян проводили на установке “ГУР-120” гамма-квантами ( $Co^{60}$ ) (ВНИИСХРАЭ, г. Обнинск, Россия). Мощность дозы источника составляла 60 Гр/ч. Облучали в дозах: 0.5; 1; 5; 10; 50; 100; 250; 500 Грэй (Гр). В качестве контроля использовали необлученные семена. Облученные и контрольные семена проращивали в чашках Петри на увлажненных фильтрах в четырех повторностях по 50–100 штук в каждой в зависимости от размеров семян. Проращивание проводили в климатических камерах KBF-240 и KBF-720 (Binder, Германия) при температуре 20 °С, влажности 65 % и 16-часовом фотопериоде. При проращивании семян для части видов применяли методы холодной и механической скарификации в соответствии с рекомендациями по проращиванию покоящихся семян растений (Николаева, 1985).

Основным критерием оценки радиочувствительности семян была выживаемость проростков (%) на стадии образования настоящего листа – 30-й день. На этой стадии активно функционируют меристемы – критические ткани растений и наиболее ярко проявляются отдаленные послед-

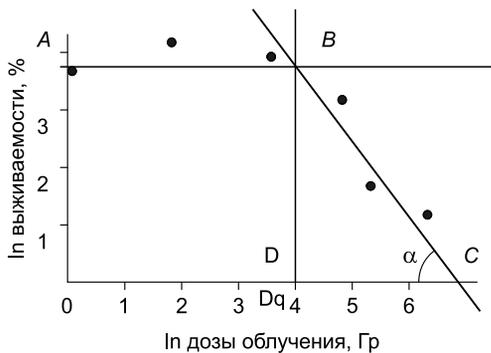
ствия облучения семян, вплоть до массовой гибели проростков (Гродзинский, 1989). Растительные организмы, преодолевшие этот барьер, с высокой степенью вероятности доживают до конца вегетации.

Радиоустойчивость семян анализировали по натурально-логарифмическим анаморфозам дозовых кривых выживаемости проростков растений на стадии листообразования (см. рисунок). Этот подход отражает общебиологическое свойство логарифмической (экспоненциальной) зависимости ответной реакции любых организмов от интенсивности (дозы) действующего раздражителя (Гаркави и др., 1979).

Дозовая кривая в этих координатах была разделена на две части. Первая часть (плечо дозовой кривой – АВ) – диапазон доз, в котором сохраняется способность организма поддерживать гомеостаз, несмотря на усиливающееся действие фактора. Проецируя длину плеча ( $L$ ) на ось абсцисс, получали количественную характеристику квазипороговой дозы ( $Dq$ ), или дозы перегиба. Мерой способности организма приспосабливаться к нарастающему облучению, сохраняя гомеостаз, и является величина  $Dq$ . Наличие выраженной двухфазности дозовой кривой в выбранных логарифмических координатах свидетельствует о пороговости данного критерия.

Вторая часть дозовой кривой в натурально-логарифмических координатах (BC) характеризовалась обратно пропорциональной зависимостью интенсивности листообразования от величины дозы облучения. Количественной ее оценкой является тангенс угла наклона ( $tg \alpha$ ), величина которого была тем больше, чем быстрее гибли растения в интервале более высоких доз радиации (Гродзинский, 1989).

Измерения осуществляли в четырех биологических повторностях. Сравнение средних значений выборки проводили методом однофакторного дисперсионного анализа (ANOVA), значимость отличий определяли, используя критерий Даннета для множественных сравнений при уровне  $p \leq 0.05$  (Гланц, 1999). Рассчитывали с помощью пакета AnalystSoft, StatPlus – программы статистического анализа, v.2007. Латинские названия видов приведены по С.К. Черепанову (1995).



Кривая доза–эффект, выполненная в логарифмическом масштабе:

$Dq$  – квазипороговая доза;  $\alpha$  – угол наклона.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Известная в радиобиологии классификация Е.И. Преображенской (1971) использует три группы радиочувствительности семян: радиочувствительные (1–25 Гр); среднерadiочувствительные (25–100 Гр); высокорadiоустойчивые (более 100 Гр). В этой работе изученные виды разделены

нами на четыре группы (табл. 1, 2) в соответствии с классификацией, предложенной ранее (Филиппов, 2000).

*Первая группа* – высокорadiоустойчивые растения, для которых  $Dq > 20$  Гр,  $tg \alpha < 1$ . К этой группе отнесены два вида, принадлежащих семей-

ству *Fabaceae*, – донник белый (*Melilotus albus* Medik.) и люцерна желтая (*Medicago falcata* L.); три вида семейства *Asteraceae* – полынь замещающая (*Artemisia commutata* Bess.), астра альпийская (*Aster alpinus* L.) и чихотник хрящеватый (*Ptarmica cartilaginea* Ledeb. ex Rchb.), а также по одному виду из семейств *Alliaceae* и *Amaranthaceae* – лук душистый (*Allium ramosum* L.) и ширица запрокинутая (*Amaranthus retroflexus* L.) соответственно. Среднее значение квазипороговой дозы по критерию выживаемости на стадии листообразования было достаточно велико и составляло 77 Гр, что, по-видимому, обусловлено способностью адаптационных систем этих видов растений поддержи-

Таблица 1

Средние значения Dq и tg α четырех групп растений Якутии

Группа радиочувствительности	Условие	Dq, Гр	tg α
I	Dq > 20, tg α < 1	77.0 (69.5)	0.8 (0.8)
II	Dq > 20, tg α > 1	81.2 (79.0)	1.4 (2.1)
III	Dq < 20, tg α < 1	7.3 (8.1)	0.7 (0.7)
IV	Dq < 20, tg α > 1	8.2 (10.9)	1.6 (1.7)

Примечание. Цифры в скобках – сравнительные данные (Филиппов, 2000).

Таблица 2

Радиочувствительность семян растений Якутии, оцененная по квазипороговой дозе (Dq) и тангенсу угла наклона (α) кривой доза–эффект в логарифмических координатах

№ п/п	Вид	Dq, Гр	tg α	Группа радиочувствительности
Семейство Гречишные – <i>Polygonaceae</i>				
1	Щавель водный – <i>Rumex aquaticus</i>	10 (80)	1.2 (1.2)	IV
2	Щавель морской – <i>Rumex maritimus</i>	1.2	1.7	IV
Семейство Бобовые – <i>Fabaceae</i>				
3	Донник белый – <i>Melilotus albus</i>	80 (230)	0.8 (1.6)	I
4	Остролодочник беловатый – <i>Oxytropis candicans</i>	93	1.1	II
5	Люцерна желтая – <i>Medicago falcata</i>	220	0.6	I
Семейство Злаки – <i>Poaceae</i>				
6	Овсяница ленская – <i>Festuca lenensis</i>	8	1.3	IV
7	Полевица Триниуса – <i>Agrostis trinii</i>	13	1.7	IV
8	Тонконог гребенчатый – <i>Koeleria cristata</i>	10	0.9	III
9	Мятлик широкометельчатый – <i>Arctopoa subfastigiata</i>	7	1.3	IV
Семейство Астровые – <i>Asteraceae</i>				
10	Гетеропаппус двулетний – <i>Heteropappus biennis</i>	110	1.7	II
11	Полынь замещающая – <i>Artemisia commutata</i>	97	0.7	I
12	Полынь эстрагон – <i>Artemisia dracuncululus</i>	33	1.2	II
13	Астра альпийская – <i>Aster alpinus</i>	47	0.9	I
14	Чихотник хрящеватый – <i>Ptarmica cartilaginea</i>	20	0.5	I
Семейство Луковые – <i>Alliaceae</i>				
15	Лук душистый – <i>Allium ramosum</i>	40	0.6	I
Семейство Подорожниковые – <i>Plantaginaceae</i>				
16	Подорожник прижатый – <i>Plantago depressa</i>	120	1.2	II
17	Подорожник седоватый – <i>Plantago canescens</i>	50	1.9	II
Семейство Норичниковые – <i>Scrophulariaceae</i>				
18	Погремок весенний – <i>Rhinanthus vernalis</i>	2	0.6	III
Семейство Кипрейные – <i>Onagraceae</i>				
19	Кипрей болотный – <i>Epilobium palustre</i>	10	2.6	IV
Семейство Амарантовые – <i>Amaranthaceae</i>				
20	Ширица запрокинутая – <i>Amaranthus retroflexus</i>	35	0.9	I
Семейство Капустные – <i>Brassicaceae</i>				
21	Ярутка полевая – <i>Thlaspi arvense</i>	10 (24)	0.7 (1.6)	III

Примечание. Цифры в скобках – сравнительные данные (Филиппов, 2000).

вать гомеостаз при значительных радиационных нагрузках. Угол наклона дозовой кривой составлял менее  $45^\circ$ , а среднее значение  $\text{tg } \alpha - 0.8$ . Данные показатели характеризуют высокую устойчивость систем, обеспечивающих радиорезистентность, что позволяло сохранять выживаемость проростков при увеличении дозовой нагрузки ионизирующего излучения полученных из семян.

*Вторая группа* – радиоустойчивые растения, для которых  $Dq > 20$  Гр, а  $\text{tg } \alpha > 1$ . Эту группу составляют пять видов растений: остролодочник беловатый (*Oxytropis candicans* (Pall.) DC.) – представитель семейства *Fabaceae*; два вида из семейства *Asteraceae* – гетеропопус двулетний (*Heteropappus biennis* (Ledeb.) Tamamsch. ex Grub.) и полынь эстрагон (*Artemisia dracuncululus* L.), два вида из семейства *Plantaginaceae* – подорожник прижатый (*Plantago depressa* Schlecht.) и подорожник седоватый (*Plantago canescens* Adams). Семена этих видов отличаются достаточно высокой способностью сохранять гомеостаз при воздействии острого облучения ( $Dq - 81.2$  Гр), между тем при дальнейшем увеличении дозы облучения устойчивость растений быстро снижалась, о чем свидетельствует тангенс угла наклона, который составлял 1.4. Известно, что клетки растений, относящихся к этой группе видов, с увеличением дозы облучения достаточно быстро исчерпывают свой потенциал (Журавская и др., 1997).

*Третья группа* – среднерадичувствительные растения, имеющие  $Dq < 20$  Гр и  $\text{tg } \alpha < 1$ . В эту группу вошли представители семейств *Poaceae*, *Scrophulariaceae* и *Brassicaceae* – тонконог гребенчатый (*Koeleria cristata* (L.) Pers.), погребок весенний (*Rhinanthus vernalis* (N. Zing.) Schischk. et Serg.) и ярутка полевая (*Thlaspi arvense*) соответственно. Кривые доза–эффект в логарифмических координатах у проростков семян этих растений имеют короткое плечо ( $Dq = 7.3$  Гр), что, по-видимому, обусловлено нарушением гомеостаза растительных организмов при сравнительно небольших радиационных нагрузках. Тем не менее у представителей этой группы растений система радиорезистентности достаточна устойчива ( $\text{tg } \alpha = 0.7$ ). Полная гибель наблюдалась у проростков из семян, получивших значительные дозы облучения (50–100 Гр).

*Четвертая группа* – радиочувствительные виды ( $Dq < 20$  Гр и  $\text{tg } \alpha > 1$ ), включает шесть видов из числа изученных: щавель водный (*Rumex aquaticus* L.) и щавель морской (*Rumex maritimus* L.) – представители семейства *Polygonaceae*; овсяница ленская (*Festuca lenensis* Drob.), полевица Триниуса (*Agrostis trinii* Turcz.) и мятлик широкометельчатый (*Arctopoa subfastigiata* (Trin.) Prob.) – семейство *Poaceae*; кипрей болотный (*Epilobium palustre* L.) – семейство *Onagraceae*. Семена этих видов растений

утрачивают способность сохранять гомеостаз при небольших дозовых нагрузках ( $Dq = 8.2$ ), их системы резистентности не только малоэффективны, но и очень чувствительны к облучению ( $\text{tg } \alpha = 1.6$ ).

Анализ данных, представленных в табл. 2, показывает, что диапазон квазипороговых доз для семян изученных видов растений Центральной Якутии варьирует от 1.2 до 220 Гр. Наиболее радиоустойчивыми из 21 исследованного вида растений были представители семейств *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Alliaceae*, *Amaranthaceae* и *Plantaginaceae*, а радиочувствительными – представители семейств *Poaceae*, *Scrophulariaceae*, *Brassicaceae*, *Polygonaceae* и *Onagraceae*. Как видно из табл. 1, первая и вторая группы имеют близкие значения квазипороговой дозы  $Dq$ , но отличаются по показателю угла наклона кривой доза–эффект; III и IV группы также имеют сходные значения  $Dq$ , но более низкие, чем у I и II групп, и разные значения  $\text{tg } \alpha$ . Таким образом, для разных видов, относящихся к одному семейству, свойственны близкие по значению параметры порога радиоустойчивости семян, но они могут отличаться устойчивостью к дальнейшему увеличению дозы облучения. Можно предположить, что способность семян растений выдерживать острое гамма-облучение, сохраняя гомеостаз, и характеризуемая по квазипороговой дозе  $Dq$  будут зависеть в первую очередь от онтогенетических показателей видов растений на уровне семейств, классов и т. д. Данное предположение согласуется с результатами некоторых работ. Так, Б.И. Сарапульцевым, С.А. Гераськиным (1989) проведен анализ радиорезистентности 99 видов высших растений в фазе покоящихся семян и показано существование трех дискретных кластерных решений, соответствующих филогенезу растений от голосеменных (радиотаксон 3) до однодольных (радиотаксон 2) и двудольных (радиотаксон 1) покрытосеменных видов. Авторы указали на принципиальное совпадение результатов классификации на независимых выборках большого числа видов высших растений в фазах вегетации и покоящихся семян. Отмечается феномен видовой дифференциации по радиорезистентности как среди организмов, принципиально отличающихся по структурной организации генома, так и в рамках кариотаксона среди высших семенных растений. Также ими отмечено (Сарапульцев, Гераськин, 1993), что радиотаксономия высших растений на основе объема генома объясняет дифференциацию по радиоустойчивости между отделами, классами и семействами высших растений, но неэффективна на уровне рода и вида.

Необходимо отметить, что средние значения  $Dq$  и крутизны наклонного участка ( $\text{tg } \alpha$ ) кривой доза–эффект для каждой группы исследованных

нами видов растений были сходны со средними показателями соответствующих групп ранее классифицированных 50 видов (Филиппов, 2000), что может свидетельствовать об информационной прогностической ценности данной классификации радиочувствительности (см. табл. 1).

Известно, что температурно-влажностные условия вегетации растений и периода созревания могут оказывать существенное влияние на радиоустойчивость семян. В работе (Журавская, 2012) показано, что радиоустойчивость растений изменяется в зависимости от климатогеографических условий произрастания. Так, у одних и тех же видов растений, сформированных в условиях криоаридного и аридного климата (Якутск, Севастополь) по сравнению с умеренным (Йошкар-Ола, Екатеринбург, Алдан), наблюдается, с одной стороны, более длинное плечо  $Dq$ , но с другой – более резкий склон кривой доза–эффект. В монографии была рассмотрена также прямая корреляционная зависимость между значением  $Dq$  и коэффициентом экстремальности ( $k_{\text{экстр}}$ ) условий произрастания ( $r = 0.75$ ), а также между значением  $\text{tg } \alpha$  и  $k_{\text{экстр}}$  ( $r = 0.78$ ).

По результатам нашей работы установлено, что радиочувствительность семян одних и тех же видов растений, собранных в разные годы, может в некоторой степени различаться. Так, щавель водный, донник белый и ярутка полевая, семена которых были собраны и исследованы летом 1999 г., имели значения  $Dq$  больше 20 Гр и, соответственно, входили во вторую группу радиочувствительности (см. табл. 2), тогда как для семян этих же видов, собранных и исследованных в 2014 г.,

характерны более низкие значения  $Dq$ . При сравнительном анализе температурно-влажностных условий в указанные годы выяснилось, что в течение вегетационного периода 1999 г. средняя температура воздуха была 16.5 °С, сумма осадков составляла 71 мм, а в 2014 г. – 18.3 °С и 85 мм соответственно. Таким образом, в 2014 г. температурно-влажностные условия были более благоприятными, что, вероятно, и могло повлиять на радиочувствительность семян, снизив, с одной стороны, их устойчивость по показателю величины пороговой дозы ( $Dq$ ), с другой – наряду с уменьшением длины плеча дозовой кривой у донника белого и ярутки полевой, наклон дозовой кривой стал более пологим, и  $\text{tg } \alpha$  уменьшился в 2 раза. Это может свидетельствовать о компенсаторных механизмах увеличения устойчивости самих систем резистентности (Гродзинский, 1989). Вероятно, радиочувствительность семян может изменяться в определенных диапазонах – в зависимости от температурно-влажностных условий в вегетационный период. Это предположение также согласуется с результатами работы В.В. Стогния (2001), где отмечается, что при засухе устойчивость семян к острому воздействию гамма-излучения может увеличиваться более чем в 2 раза. Следует отметить, что диапазон изменения радиочувствительности семян дикорастущих растений будет иметь различный характер, обусловленный принадлежностью к определенному семейству. Определение радиоустойчивости семян дикорастущих растений Якутии, безусловно, требует продолжения исследований с расширением видового многообразия растений в пределах изучаемых семейств.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, диапазон пороговых доз для семян 21 вида дикорастущих растений, произрастающих в Центральной Якутии, составлял от 1.2 до 220 Гр. Показана таксономическая дифференциация радиоустойчивости семян, обусловленная принадлежностью к определенному семейству высших растений. Наиболее радиоустойчивыми были представители семейств *Fabaceae*, *Asteraceae*, *Alliaceae*, *Amaranthaceae* и *Plantaginaceae*, а радиочувствительными – представители семейств *Poaceae*, *Scrophulariaceae*, *Brassicaceae*, *Polygonaceae* и *Onagraceae*. Для 18 видов растений радиочувствительность семян определена впервые.

На примере трех видов растений выявлено, что температурно-влажностные условия вегетации и периода созревания семян могут оказывать влияние на радиочувствительность семян дикорастущих растений.

Выражаем благодарность д.б.н. А.Н. Журавской за помощь при постановке эксперимента.

Работа выполнена в рамках НИР VI.56.1.5. “Физиолого-биохимические механизмы формирования адаптивного потенциала, устойчивости и продуктивности растительных компонентов экосистем Южной и Центральной Якутии, № 01201282194.

## ЛИТЕРАТУРА

Алексеев В.Г. Устойчивость растений в условиях Севера: эколого-биохимические аспекты. Новосибирск, 1994. 152 с.

Гаркави Л.Х., Квакина Е.Б., Уколова М.А. Адаптационные реакции и резистентность организмов. Ростов н/Д, 1979. 120 с.

- Гланц С.А.** Медико-биологическая статистика. М., 1999. 459 с.
- Гродзинский Д.М.** Радиобиология растений. Киев, 1989. 380 с.
- Журавская А.Н.** Радиочувствительность растений Якутии. Saarbrücken, 2012. 138 с.
- Журавская А.Н., Позолотина В.Н., Кершенгольц Б.М.** Радиочувствительность семян растений Якутии // Экология. 1997. № 1. С. 111–117.
- Кузин А.М.** Молекулярные механизмы стимулирующего действия ионизирующего излучения на семена растений // Радиобиология. 1972. № 12, вып. 5. С. 635–643.
- Николаева М.Г., Разумова М.В., Гладкова В.Н.** Справочник по проращиванию семян / Отв. ред. М.Ф. Данилова. Л., 1985. 348 с.
- Преображенская Е.И.** Радиоустойчивость семян растений. М., 1971. 232 с.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А.** Радиотаксономия высших растений в фазе покоящихся семян // Радиобиология. 1989. Т. 29, № 1. С. 94–99.
- Сарапульцев Б.И., Гераськин С.А.** Генетические основы радиорезистентности и эволюция. М., 1993. 208 с.
- Стогний В.В.** Влияние климатогеографических условий на устойчивость к острому воздействию гамма-излучения и антиоксидантный статус семян дикорастущих травянистых растений: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск, 2001. 22 с.
- Филиппов Э.В.** Физиолого-биохимическая оценка устойчивости генома дикорастущих растений к воздействию радиационных и нерадиационных стресс-факторов в Якутии: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Якутск, 2000. 20 с.
- Черепанов С.К.** Сосудистые растения России и сопредельных государств (в пределах бывшего СССР). СПб., 1995. 992 с.