

УДК 556:[546.795 + 544.77]

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПУНКТА ХРАНЕНИЯ МОНАЦИТОВОГО КОНЦЕНТРАТА****Майстренко Т.А., Рачкова Н.Г., Белых Е.С., Рыбак А.В.***ФГБУН Институт биологии Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук, Сыктывкар, e-mail: roginat@mail.ru*

Выполнены радиоэкологические исследования в импактной зоне пункта хранения монацитового концентрата. Показано, что параметры радиационной обстановки соответствуют установленным требованиям радиационной безопасности нормативам. Тем не менее, территория вблизи объекта характеризуется более высоким, чем окрестные ландшафты, уровнем радиационного фона и высокой вариабельностью содержания естественных радионуклидов в почве и донных осадках в сочетании с повышенными в 2,5–10 раз по сравнению с контрольными площадками удельными активностями <sup>226</sup>Ra в дренажных водах. Результаты биоиндикационных исследований свидетельствуют о достоверно более низкой выживаемости проростков семян *Cirsium setosum* и *Alisma plantago-aquatica*, собранных с экспериментальных участков, находящихся в зоне воздействия радиоактивно загрязнённой промплощадки, чем семян этих растений с фонового участка. Причиной наблюдаемого токсического эффекта может являться сочетанное действие естественных радионуклидов, содержание которых не выходит за пределы установленных нормативов, но превышает фоновое, и иных экологических факторов.

**Ключевые слова:** монацит, техногенно повышенный радиационный фон, торий, уран, радий, хроническое облучение, биологические эффекты, растения, природные популяции, жизнеспособность

**RADIOECOLOGICAL RESEARCHES ON THE TERRITORY NEAR A MONAZITE CONCENTRATE STORAGE CELL****Maystrenko T.A., Rachkova N.G., Belykh E.S., Rybak A.V.***Institute of Biology, Komi Scientific Centre, Ural Branch, RAS, Syktyvkar, e-mail: roginat@mail.ru*

Results of radioecological investigation on a territory near a monazite concentrate storage cell showed radiation situation to satisfy radiation safety norms. But radiation background on the territory near the storage cell was found to be higher and radionuclide concentrations in soil and sediments were more variable than on neighboring landscapes. Also <sup>226</sup>Ra activity concentrations in drainage waters were 2.5–10 times higher as compared with reference ones. Bioindication studies results give evidences on significantly lower viability of *Cirsium setosum* and *Alisma plantago-aquatica* seedlings obtained from seeds sampled on experimental sites located within the storage cell impact zone as compared with those from reference site. The toxic effect observed possibly caused by the combine exposure of natural origin radionuclides with activity concentrations satisfying the safety norms, but higher than the reference ones, and other environmental factors.

**Keywords:** monazite, anthropogenically enhanced radioactive background, uranium, thorium, radium, chronic irradiation, biological effects, plants, natural population, viability

Актуальность исследований в области защиты окружающей среды от воздействия ионизирующих излучений обусловлена недостаточной разработкой теоретических и научно-методических основ оценки последствий для биологических систем хронического облучения и связана с обеспечением радиоэкологической безопасности ядерной энергетики, обращением с радиоактивными отходами, а также реабилитацией загрязнённых территорий [1]. Одной из основных задач в данном направлении является установление взаимосвязи уровня радиационного воздействия и биологических эффектов у растений и животных из природных популяций. Наряду с климатом и почвой растительность определяет облик наземных экосистем, поэтому изучение реакции растений в естественной среде их обитания необходимо для разработки более реалистичных экологических моделей.

Цель исследования – на основе комплексного анализа физико-химических характеристик абиотических компонентов окружающей среды и оценки жизнеспособности семян дикорастущих растений оценить радиоэкологическую обстановку вблизи пункта хранения монацитового концентрата.

**Материалы и методы исследования**

Исследования проводили вблизи территории промышленной площадки размещения базы хранения предназначенного для переработки и последующего использования в ядерно-топливном цикле атомных реакторов концентрата естественного радиоактивного минерала монацита и образованного в результате вскрытия монацита ториевого остатка. По данным [4], с 1960 г. на объекте было размещено около 82 тыс. т монацитового концентрата, представленного безводной смесью ортофосфатов редкоземельных металлов (Th, Gd, Er, Dy и др.) с примесью оксидов урана до 1%. Согласно выполненным в 1992 г. оценкам ВНИИПромтехнологии, складированный мате-

риал при удельной активности  $217 \pm 15$  Бк/г содержал в среднем 5,4% ThO<sub>2</sub>, 0,2% UO<sub>2</sub>, 54% оксидов редких земель [4].

Для исследования выбрали три пары экспериментальных площадок – R1/R6, R2/R5 и R3/R4, расположенных на низинном частично заболоченном участке размером 200×700 м. Мощность амбиентного эквивалента дозы составляла соответственно  $0,24 \pm 0,06$ ,  $0,47 \pm 0,01$  и  $0,78 \pm 0,03$  мкЗв/ч при характеристических для района значениях 0,06–0,12 мкЗв/ч [4]. На участках в конце вегетационного сезона собирали семена дикорастущих растений, а также осуществляли отбор образцов почвы, воды и донных отложений из дренажной канавы для последующего определения методами альфа- и гамма-спектрометрии удельной активности тяжёлых естественных радионуклидов.

Семена *Cirsium setosum* хранили в течение девяти месяцев после сбора в сухом тёмном месте при 20 °С, *Alisma plantago-aquatica* – от четырёх до девяти месяцев при 4 °С и влажности 100%. Затем посевной материал проращивали на дистиллированной воде при температуре  $24 \pm 2$  °С, световом периоде 10 ч и освещённости 3000 лк. Жизнеспособность семян оценивали по выживаемости проростков, которую регистрировали на 13-е сутки эксперимента. При анализе антропогенного воздействия учитывали загрязнение территории химическими токсикантами, в том числе тяжёлыми металлами. В качестве контроля использовали семена растений из природных популяций с территории, находящейся за границами крупных населённых пунктов и локально загрязнённых радионуклидами или тяжёлыми металлами территорий.

### Результаты исследования и их обсуждение

Рекогносцировочная оценка экологической ситуации на исследуемом участке указывала на проведение в прошлом рекультивационных мероприятий, о чём свидетельствовала однородная рыхлая структура и равномерная окраска верхней 30-сантиметровой толщи почвы. Также могло проводиться гипсование почвы, поскольку поверхностные воды и грунты к моменту пробоотбора содержали повышенные относительно фоновых показателей концентрации кальция и сульфатов. Кратность превышения для последних достигала 15 раз. Максимальное содержание сульфатов в водах составляло около 300 мг/л. Отчасти именно концентрациями сульфатов и кальция была обусловлена высокая минерализация дренажных вод, имеющих удельную электропроводность до 800 мкСм/см при фоновой величине не более 250 мкСм/см. По данным полевых измерений, значения водородного показателя для вод, почв и донных осадков соответствовали слабощелочной или щелочной среде. Физико-химический анализ этих объектов не выявил для большинства исследованных образцов превышений значений ПДК тяжёлых металлов I–III классов опасности. Исклю-

чением явились концентрации в воде Cu, кратность превышения ПДК которых во всех пробах, включая контрольную, составила 1,2–1,7 раз, а также Mo и Zn в образце R6, которые оказались в 2,4 и 5 раз больше ПДК соответственно. Во всех пробах почв, в том числе контрольной, отмечены концентрации As, в 2,0–2,6 раза превосходящие гигиенические нормативы, а в образце почвы R6 в 2,9 раза превышена концентрация Mn. Значения суммарного показателя загрязнения почв токсичными элементами для экспериментальных площадок R1–R5 варьировали от 1,2 до 1,9, для почв участка R6 зарегистрировано максимальное значение показателя загрязнённости, равное 4,1.

Удельные активности радиоактивных элементов природного происхождения (<sup>228</sup>Th, <sup>230</sup>Th, <sup>232</sup>Th, <sup>234</sup>U, <sup>235</sup>U, <sup>238</sup>U, <sup>226</sup>Ra, <sup>210</sup>Po, <sup>210</sup>Pb) в пробах воды находились в пределах установленных нормативных показателей (таблица). Мы не выявили также зависимости содержания этих радионуклидов в донных отложениях и почве от геохимических особенностей места отбора и удалённости его от базы хранения радиоактивных материалов. Таким образом, результаты анализа образцов дренажных вод, почвы и донных отложений свидетельствовали об отсутствии радиоактивного загрязнения исследованной почвенной толщи. Однако для всех исследованных проб воды регистрировали повышенные относительно фоновых значений (менее 0,1 мБк/л) концентрации <sup>226</sup>Ra, варьирующие в диапазоне величин от 200 до 350 мБк/л, что в 1,4–2,5 раза ниже уровня вмешательства, установленного для удельной активности радионуклида в питьевых водах. При этом отмечали высокую вариабельность показателей удельной активности радионуклидов в абиотических компонентах окружающей среды, наиболее выраженную для почв и донных отложений. Так, значения крайних членов вариационного ряда концентраций разных изотопов Th в седиментах отличались друг от друга в 50–75, а <sup>210</sup>Pb и <sup>210</sup>Po – до 20 раз. Эти элементы не склонны к водной миграции, поэтому источником их поступления в верхний 20-сантиметровый слой донных отложений и грунта могла быть погребённая почва с повышенным содержанием радионуклидов. Отсутствие в образцах почв выявленных по результатам радиохимического анализа техногенных источников ионизирующего излучения также, вероятно, обусловлено более глубоким, чем 30 см, залеганием загрязнённого грунта в толще

почвы. Эти предположения подтвердились при сравнении коэффициентов распределения радионуклидов между водой и грунтом. Диапазоны их варьирования для  $^{226}\text{Ra}$  и урана имели узкие пределы и соответствовали средним величинам  $45 \pm 1$  л/кг. В то же время вариабельность коэффициентов распределения изотопов тория была чрезвычайно широка. В частности, для радионуклида  $^{232}\text{Th}$  она соответствует ряду значений от 8 до 680 тысяч, для  $^{228}\text{Th}$ , представляющему тот же ряд распада, – от

8 до 155 тысяч (рис. 1). Ещё одним важным признаком возможного радиоактивного загрязнения исследуемой территории являлись значения радиоактивного фона, уровень которого в 2,5–10 раз превышал характерный для данного геохимического района и снижался при удалении от складов монацита. Всё это позволяет усомниться в обоснованности опубликованных в работах [4, 5] выводов об отсутствии очагов радиоактивного загрязнения в зоне влияния пункта хранения.

Удельные активности тяжёлых естественных радионуклидов в объектах окружающей среды зоны влияния базы хранения монацитового концентрата

Радионуклид	Удельные активности радионуклидов в объектах окружающей среды					
	вода ( $n^* = 3$ ), мБк/л		донные отложения ( $n = 5$ ), мБк/г**		почва ( $n = 6$ ), мБк/г**	
	R1 – R6	К	R1 – R6	К	R1 – R6	К
$^{234}\text{U}$	1,9–18,5	$7 \pm 1$	0,3–3,9	$3,1 \pm 0,5$	0,4–1,2	$1,4 \pm 0,2$
$^{235}\text{U}$	0,2–1,1	$0,6 \pm 0,2$	0,1–0,4	$0,40 \pm 0,05$	0,1–0,3	$0,10 \pm 0,02$
$^{238}\text{U}$	2,9–26,0	$2,2 \pm 0,5$	0,4–3,2	$1,9 \pm 0,3$	0,3–1,9	$1,0 \pm 0,1$
$^{228}\text{Th}$	0,1–0,3	$0,43 \pm 0,02$	0,3–16,5	$6,7 \pm 0,8$	2,0–15,8	$9 \pm 1$
$^{230}\text{Th}$	1,2–13,0	$28 \pm 3$	2,0–150	$59 \pm 7$	30,4–130	$79 \pm 10$
$^{232}\text{Th}$	0,02–0,4	$0,6 \pm 0,2$	0,3–14,6	$5,2 \pm 0,7$	2,0–11,0	$5,5 \pm 0,8$
$^{226}\text{Ra}$	180–350	$0,10 \pm 0,06$	8,0–13,9	$18 \pm 6$	8,0–11,5	$15 \pm 10$
$^{210}\text{Pb}$	16,9–25,3	$17 \pm 2$	6,8–61,3	$48 \pm 7$	4,5–85,3	$45 \pm 7$
$^{210}\text{Po}$	0,9–5,4	$1,7 \pm 0,2$	2,0–30,8	$21 \pm 3$	2,5–30,6	$4,8 \pm 0,7$

Примечание. \*  $n$  – количество образцов, \*\* воздушно-сухие образцы почв и донных отложений.

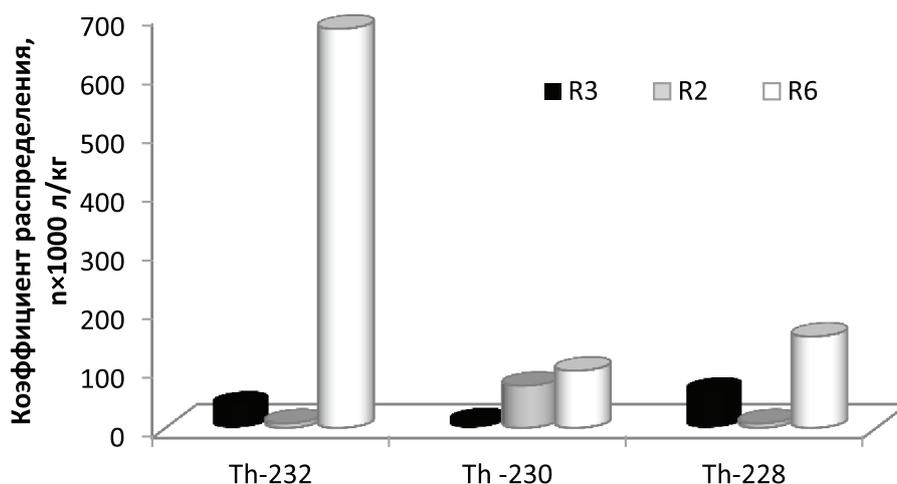


Рис. 1. Коэффициенты распределения изотопов тория между водой и донным материалом ( $n \times 1000$  л/кг) в местах пробоотбора, расположенных вдоль границы пункта хранения монацитового концентрата

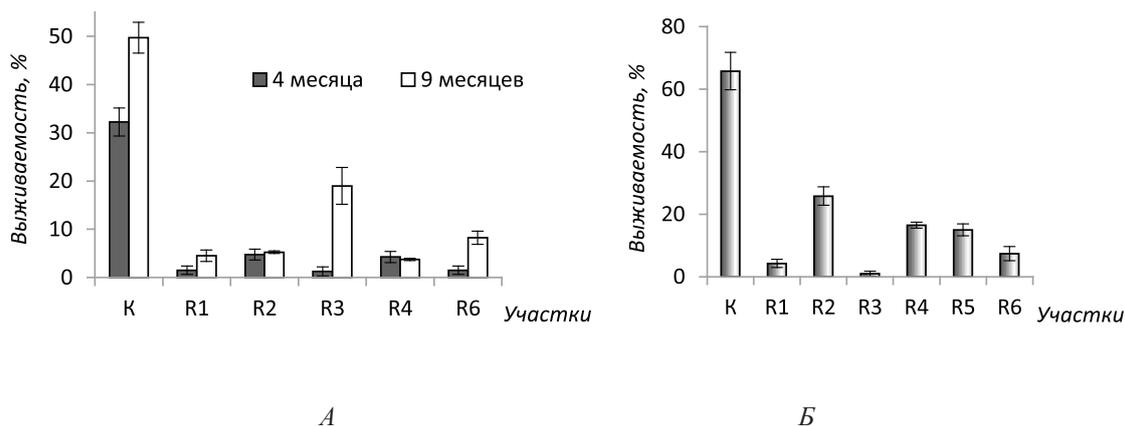


Рис. 2. Выживаемость проростков семян растений *Cirsium setosum* (Б) и *Alisma plantago-aquatica* при различной продолжительности периода покоя семян (А). Условные обозначения участков: К – контрольный; R1–R6 – участки импактной территории

Одним из методов, позволяющих оценить степень загрязнения экосистем, в том числе радионуклидами, являются биоиндикационные исследования [6, 7]. Поэтому наряду с проведением физико-химического анализа абиотических компонентов окружающей среды мы изучили репродуктивную способность дикорастущих растений, населяющих участки с нормальным и повышенным радиационным фоном.

Поскольку всхожесть семян растений зависит от условий и длительности фазы их покоя, жизнеспособность семян растений *A. plantago-aquatica* оценивали при разной продолжительности хранения семян во влажной среде при низкой температуре. Значения выживаемости проростков, определённые через четыре и девять месяцев холодной стратификации семян, варьировали (рис. 2, А) от 1–19% в точках R3 и R4 с наибольшей мощностью дозы внешнего облучения до 2–8% – в точках R1 и R6 с близким к контрольным значениям радиационным фоном. Невысокая всхожесть семян, наблюдаемая нами для растений *A. plantago-aquatica* при длительности периодов покоя четыре и девять месяцев, была характерна для всех экспериментальных участков, за исключением стратифицированных в течение девяти месяцев семян с участка R3, не отличающегося от других площадок по концентрациям радиоактивных элементов, тяжёлых металлов, макроионов в воде и донных отложениях. При этом продолжительность стратификации, наиболее близкая [2] к естественному периоду покоя (9 месяцев), привела к до-

стоверному увеличению выживаемости проростков семян *A. plantago-aquatica* как контрольной популяции ( $p < 0,01$ ), так и с экспериментальных участков R3 и R6 ( $p < 0,05$ ). Последний из них отличается повышенным содержанием в воде Zn и Cu.

Определённая через девять месяцев после сбора выживаемость проростков для семян *C. setosum*, собранных на импактных площадках (рис. 2, Б), оказалась ниже ( $p < 0,001$ ), чем для семян с контрольного участка. Семенное потомство растений с площадок R1 и R3 имело практически нулевые показатели всхожести и выживаемости: первые проростки у 20% образцов семян с площадки R1 отмечены только на 9-й, 20% – на 15-й день; в 40% образцов с площадки R3 единичные проростки зарегистрированы только на 15-й день наблюдений.

Хотя репродуктивный успех изученных растений во многом зависит от особенностей погодных условий сезона вегетации и степени колебаний уровня обводнения местообитания [2, 8], мы нашли, что определённая для разных условий и периодов покоя выживаемость проростков *C. setosum* и *A. plantago-aquatica*, собранных с радиоактивно загрязнённых площадок R1–R6 экспериментального участка, была достоверно ( $p \leq 0,001$ ) более низкой, чем семян с фонового участка (К). Оценка всхожести семян при разной продолжительности периода покоя показала, что низкие значения показателя прорастания семян коррелировали с низкой выживаемостью проростков в дальнейшем. При этом максимальное значение всхожести для кривых пророста-

ния семян *A. plantago-aquatica* с контрольного и импактных участков при условиях стратификации в течение четырёх и девяти месяцев регистрировали начиная с 6–7 дня проращивания.

Изучение всхожести семян и выживаемости проростков *C. setosum* после 9-месячного периода покоя, близкого по продолжительности к естественным срокам, также выявило значительную дифференциацию выживаемости проростков с разных участков. Значения показателя варьировали от 1–4% для семян с участков R1 и R3 до 25% – с участка R2, но все были ниже ( $p \leq 0,001$ ) величины, рассчитанной для контрольного участка. Выживаемость семян с фоновой территории была наибольшей (рис. 2, Б) и составила  $66 \pm 6\%$ .

Таким образом, выживаемость проростков семян растений с импактных территорий достоверно снижалась относительно контрольных значений, несмотря на то, что содержание естественных радионуклидов в почве, донных осадках и дренажных водах не превышало нормативы, установленные требованиями радиационной безопасности. Наблюдаемый токсический эффект может быть обусловлен сочетанным действием повышенных относительно фоновых значений концентраций радионуклидов в среде обитания растений и других экологических факторов. Схожий токсический эффект наблюдали ранее при биотестировании вод с повышенным содержанием естественных радионуклидов из природных источников окрестностей пос. Водный (Республика Коми) [3].

### Выводы

1. Результаты проведённого исследования указывают на неоднозначность опубликованных данных [4, 5] о радиационной обстановке в импактной зоне базы хранения монацитового концентрата, а также отражают сложное влияние эндогенных факторов и условий среды на репродуктивную способность растений, населяющих техногенно нарушенные территории. Для выявления возможных скрытых очагов радиационного загрязнения в погребённом на глубину более 30 см грунте и корректной оценки экологической ситуации на исследуемом объекте необходимо изучение радиального распределения радионуклидов.

2. Установлено, что параметры радиационной обстановки соответствуют установленным требованиям радиационной

безопасности нормативам. Однако территория вблизи пункта хранения монацитового концентрата характеризуется более высоким уровнем радиационного фона, чем значения этого показателя, определённые для окрестных ландшафтов. Для исследованных участков установлена высокая вариабельность содержания естественных радионуклидов в почве и донных осадках в сочетании с повышенными в 2,5–10 раз по сравнению с контрольными площадками удельными активностями  $^{226}\text{Ra}$  в дренажных водах.

3. Результаты биоиндикационных исследований свидетельствуют о достоверно более низкой выживаемости проростков семян *Cirsium setosum* и *Alisma plantago-aquatica*, собранных с экспериментальных участков в зоне воздействия загрязнённой радионуклидами промплощадки, чем семян этих растений с фоновой территории. Наблюдаемый токсический эффект может быть обусловлен сочетанным влиянием естественных радионуклидов, содержание которых не выходит за пределы установленных санитарно-гигиенических нормативов, но превышает фоновое, и иными экологическими факторами.

### Список литературы

1. Алексахин Р.М. Новейшие результаты исследований в области радиоэкологии // Вестник Российской Академии Наук. – 2015. – Т. 85, № 4. – С. 373–376.
2. Васильева Н.В. Особенности прорастания семян частухи подорожниковой (*Alisma plantago-aquatica* L.) в лабораторных условиях // Биология внутренних вод. – 2001. – № 1. – С. 46–49.
3. Евсеева Т.И., Гераскин С.А., Шуктомова И.И., Храмова Е.С. Комплексное изучение радиоактивного и химического загрязнения водоемов в районе расположения хранилища отходов радиового промысла // Экология. – 2003. – № 3. – С. 176–183.
4. Екидин А.А., Кирдин И.А., Шустов А.М., Михеев А.А. Исследования радиационной ситуации на базе хранения монацитового концентрата / Урал. Радиация. Реабилитация. Отв. ред.: В.Н. Чуканов. – Екатеринбург: УрО РАН, 2004. – С. 252–294.
5. Министерство природных ресурсов и экологии Свердловской области: офиц. сайт [Электронный ресурс]. Дата обновления 23.12.2016. URL: <http://www.minpri.midural.ru/novosti/1265> (дата обращения: 15.02.2017).
6. Цветнова О.Б., Щеглов А.И., Столбова В.В. К вопросу о методах биодиагностики в условиях радиоактивного загрязнения // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2014. – Т. 54, № 4. – С. 423–431.
7. Geras'kin S.A., Dikarev V.G., Oudalova A.A., Vasiliev D.V., Dikareva N.S., Evseeva T.I. Bioindication approach for an assessment of technogenic impact on the environment // Strategies to Enhance Environmental Security in Transition Countries. NATO Security Through Science Series. Springer, 2007. – P. 315–328.
8. Laubhan M.K., Shaffer T.L. Seed germination of *Cirsium arvense* and *Lepidium latifolium*: implications for management of montane wetlands // Wetlands. – 2006. – V. 26. – № 1. – P. 69–78.