

УДК 574.9 (575.2)

Калдыбаев Б.К., Кененова Ж.К.

ИГУ им. К.Тыныстанова

**РАДИОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА УРАНОВОГО
ХВОСТОХРАНИЛИЩА КАДЖИ-САЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
КОМПЬЮТЕРНОЙ ПРОГРАММЫ ERICA TOOL 1.2.**

Представлены расчеты и содержания радионуклидов для растений, животных и других живых организмов, а также дозы радиоактивного облучения и возможные радиоэкологические риски с использованием компьютерной программы Erica tool 1.2.

The calculations and the content of radionuclides to plants, animals and other living organisms, as well as the doses of radiation and radio-ecological potential risks with Erica tool 1.2 software.

Ключевые слова: Радионуклиды, доза облучения, хвостохранилище, радиоэкология, программы Erica tool 1.2.

Компьютерные программы и математическое моделирование в настоящее время широко используются в радиоэкологическом мониторинге окружающей среды. Программа Erica tool 1.2. это программное обеспечение, которое используется для оценки радиационной опасности для наземных, пресноводных и морских экосистем. Зная содержания радиоактивных элементов в почве или в воде, программа производит расчеты и моделирует их содержания для растений, животных и других организмов, а также дает оценку доз радиоактивного облучения. Программа Erica tool 1.2. включает в себя следующий алгоритм действий (рис. 1).

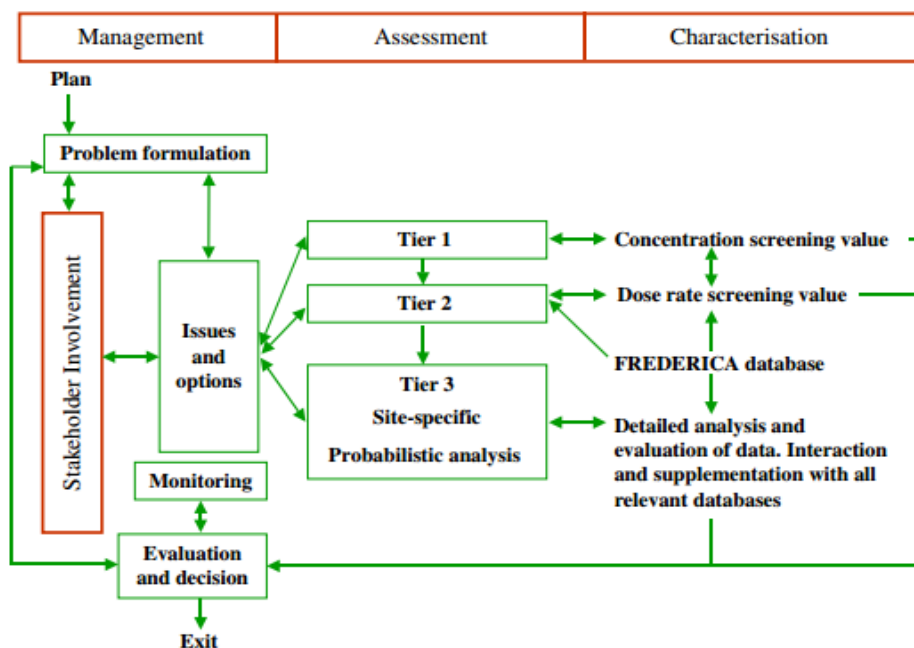


Fig. 1. Structure of the ERICA Integrated Approach.

Рис.1. Алгоритм программы Erica tool 1.2.

Элемент оценки состоит из трех разделов, если значение радиационного фактора незначительно, то можно ограничиться разделом 1. Если значение радиационного фактора повышено, то действие рекомендуется продолжить в разделе 2. Для более детальной оценки радиационного фактора на живые организмы применяется раздел 3.

Раздел 1. Оценка фактора риска

Таблица 1. Ввод данных содержаний радионуклидов в грунте Каджи-Сайского хвостохранилища

| Isotopes | Activity Concentration in soil or air [Bq kg ⁻¹ d.w. or Bq m ⁻³] |
|----------|---|
| U-238 | 3152 |
| U-234 | 154 |
| Th-230 | 15513 |
| Ra-226 | 10643 |
| Pb-210 | 12100 |
| Th-228 | 46 |

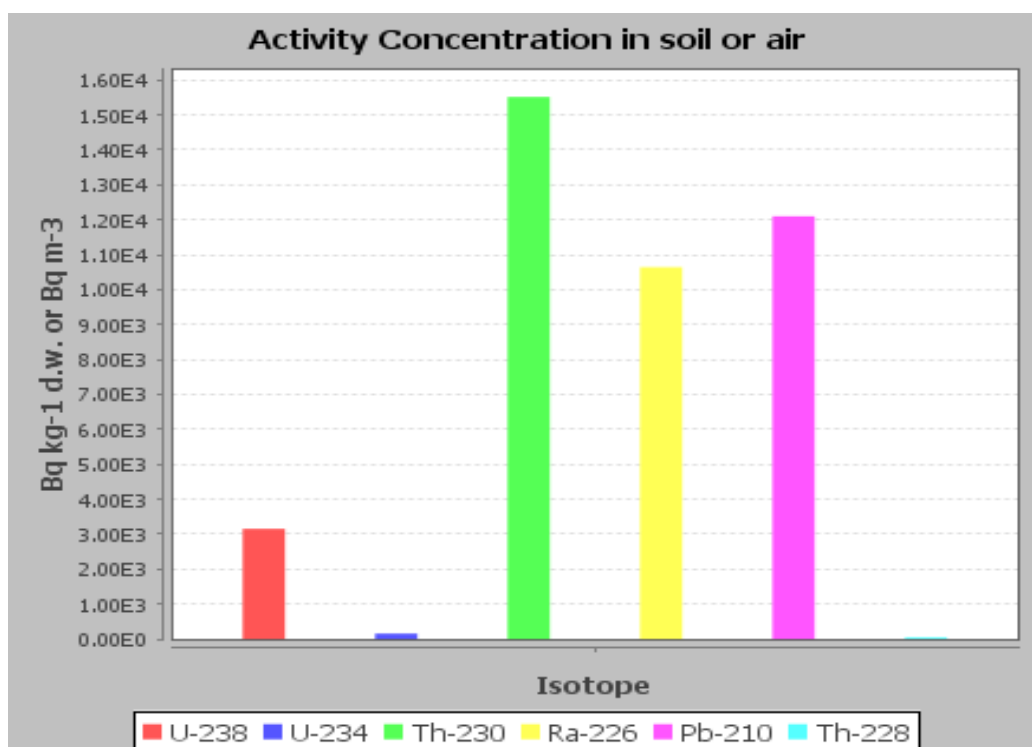


Рис.2. Содержание радионуклидов в грунте хвостохранилища Каджи-Сай

Таблица 2. Максимальная концентрация радионуклидов для наземных экосистем в почве (ERICA)

| Isotope | Terrestrial Environmental Media Concentration Limit (ERICA) [Bq kg ⁻¹ or Bq m ⁻³] |
|---------|--|
| U-238 | 132,9787 |
| U-234 | 117,096 |
| Th-230 | 265,9574 |
| Ra-226 | 27,70083 |
| Pb-210 | 6250 |
| Th-228 | 38,61004 |

Таблица 3. Фактор риска для организмов

| Isotopes | Isotopes |
|----------------|----------|
| U-238 | 23,70304 |
| U-234 | 1,31516 |
| Th-230 | 58,32888 |
| Ra-226 | 384,2123 |
| Pb-210 | 1,93936 |
| Th-228 | 1,1914 |
| Risk Quotients | 470,6901 |

В таблице представлена оценка фактора риска по каждому радионуклиду. Фактор риска определяется как измеренная концентрация радионуклида в почве, деленная на средний предел концентрации радионуклида в окружающей среде по базе данных (ERICA).

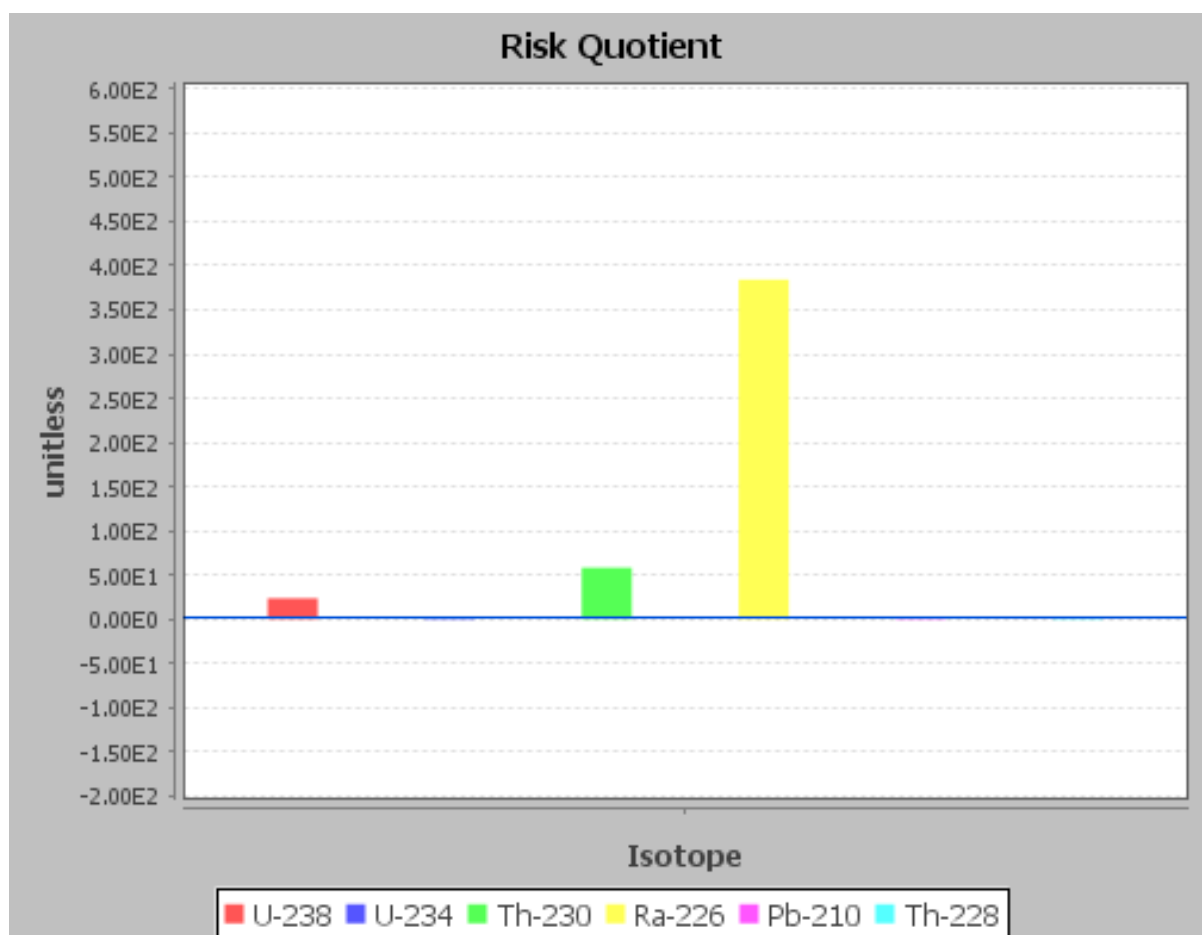


Рис.3. Повышенный фактор риска по радионуклидам (^{238}U , ^{230}Th , ^{226}Ra).

Раздел 2.

Таблица 4. Внешняя мощность дозы облучения организмов

| External Dose Rate [μGy h ⁻¹] Isotope | Amphibian | Annelid | Arthropod - detritivorous | Bird | Flying insects | Grasses & Herbs | Lichen & Bryophytes | Mammal - large | Mammal - small-burrowing | Mollusc - gastropod | Reptile | Shrub | Tree |
|---|-----------|----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| U-238 | 0,000378 | 0,000378 | 0,00041 | 0,000151 | 0,000158 | 0,000315 | 0,000157 | 3,15E-05 | 0,000315 | 0,000154 | 0,000274 | 0,000126 | 2,17E-05 |
| U-234 | 2,62E-05 | 2,62E-05 | 2,77E-05 | 1,06E-05 | 1,09E-05 | 2,16E-05 | 1,1E-05 | 2,62E-06 | 2,31E-05 | 1,09E-05 | 2E-05 | 9,09E-06 | 2,77E-06 |
| Th-230 | 0,003103 | 0,003258 | 0,003258 | 0,001086 | 0,001117 | 0,002172 | 0,001116 | 0,000388 | 0,002792 | 0,001117 | 0,002637 | 0,00121 | 0,000683 |
| Ra-226 | 9,47227 | 9,5787 | 9,68513 | 3,61862 | 3,72505 | 3,51219 | 3,675623 | 1,91574 | 9,04655 | 3,72505 | 8,72726 | 3,40576 | 2,87361 |
| Pb-210 | 0,00703 | 0,007273 | 0,007394 | 0,003394 | 0,003515 | 0,004848 | 0,003523 | 0,000933 | 0,006303 | 0,003515 | 0,005697 | 0,002424 | 0,001576 |
| Th-228 | 0,03588 | 0,03634 | 0,03634 | 0,01334 | 0,01334 | 0,01288 | 0,013408 | 0,00736 | 0,03404 | 0,01334 | 0,03312 | 0,01242 | 0,01058 |

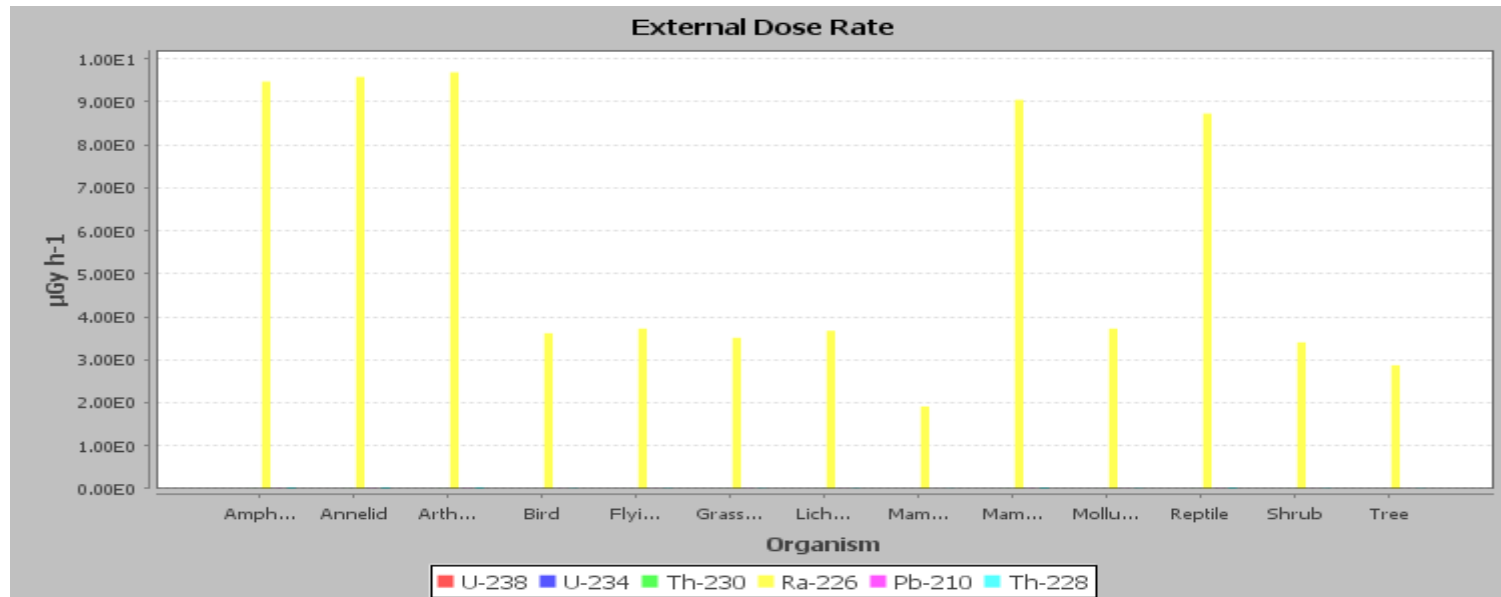


Рис.4. Графическое изображение внешней мощности дозы облучения организмов

Таблица 5. Внутренняя мощность дозы облучения

| Internal Dose Rate [$\mu\text{Gy h}^{-1}$] Isotope | Amphibian | Annelid | Arthropod – detritivorous | Bird | Flying insects | Grasses & Herbs | Lichen & Bryophytes | Mammal – large | Mammal – small-burrowing | Mollusc – gastropod | Reptile | Shrub | Tree |
|---|-----------|----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| U-238 | 0,413885 | 2,550116 | 0,78527 | 0,095124 | 0,78527 | 9,673876 | 69,28459 | 0,413885 | 0,413885 | 2,550116 | 0,392271 | 4,614528 | 0,499196 |
| U-234 | 0,023592 | 0,145359 | 0,044761 | 0,005422 | 0,044761 | 0,551419 | 3,847611 | 0,023592 | 0,023592 | 0,145359 | 0,02236 | 0,263032 | 0,028455 |
| Th-230 | 0,162933 | 3,842234 | 2,124532 | 0,162933 | 2,124532 | 67,01616 | 158,8695 | 0,056754 | 0,056754 | 3,842234 | 0,909723 | 25,54991 | 0,529513 |
| Ra-226 | 63,62453 | 62,8404 | 62,77588 | 55,12322 | 62,77588 | 261,2303 | 1046,552 | 65,62341 | 63,69053 | 69,18395 | 63,62453 | 478,9222 | 17,30556 |
| Pb-210 | 0,3623 | 1,393609 | 0,956588 | 0,191729 | 1,057281 | 0,332794 | 5,988158 | 0,117723 | 0,113014 | 0,020165 | 0,119045 | 0,887451 | 0,219509 |
| Th-228 | 0,003308 | 0,07801 | 0,043534 | 0,003277 | 0,043135 | 1,360643 | 3,240889 | 0,001179 | 0,001142 | 0,07801 | 0,018299 | 0,518745 | 0,011107 |

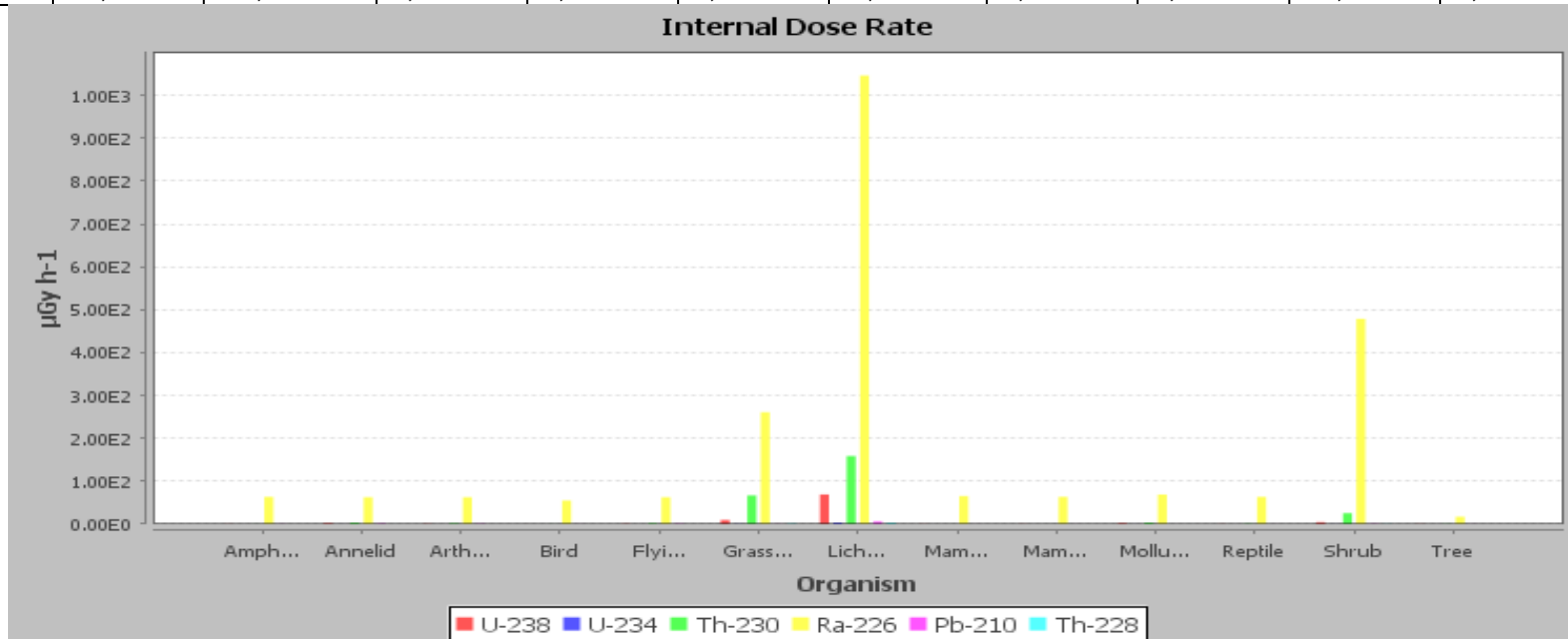


Рис.5. Графическое изображение внутренней дозы облучения организмов

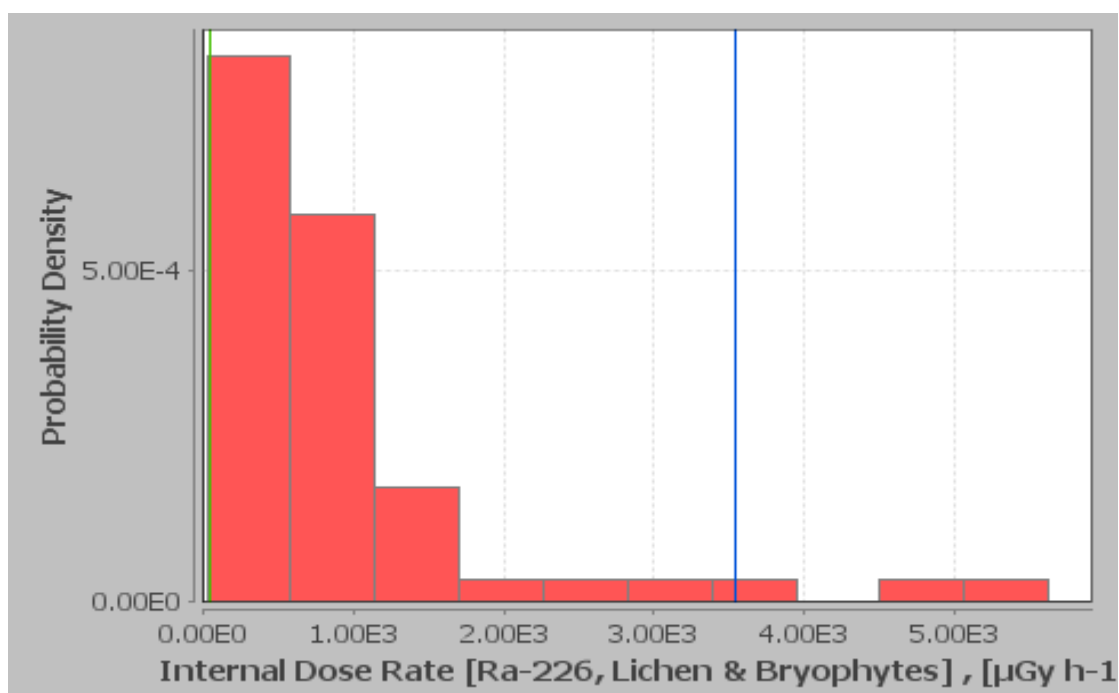


Рис.6. Внутренняя доза облучения для лишайников и мхов ^{226}Ra (мкГр/ч)

Статистические показатели:

Среднее значение – 914 мкГр/час

Минимальное значение – 18,9 мкГр/час

Максимальное значение – 5630 мкГр/час

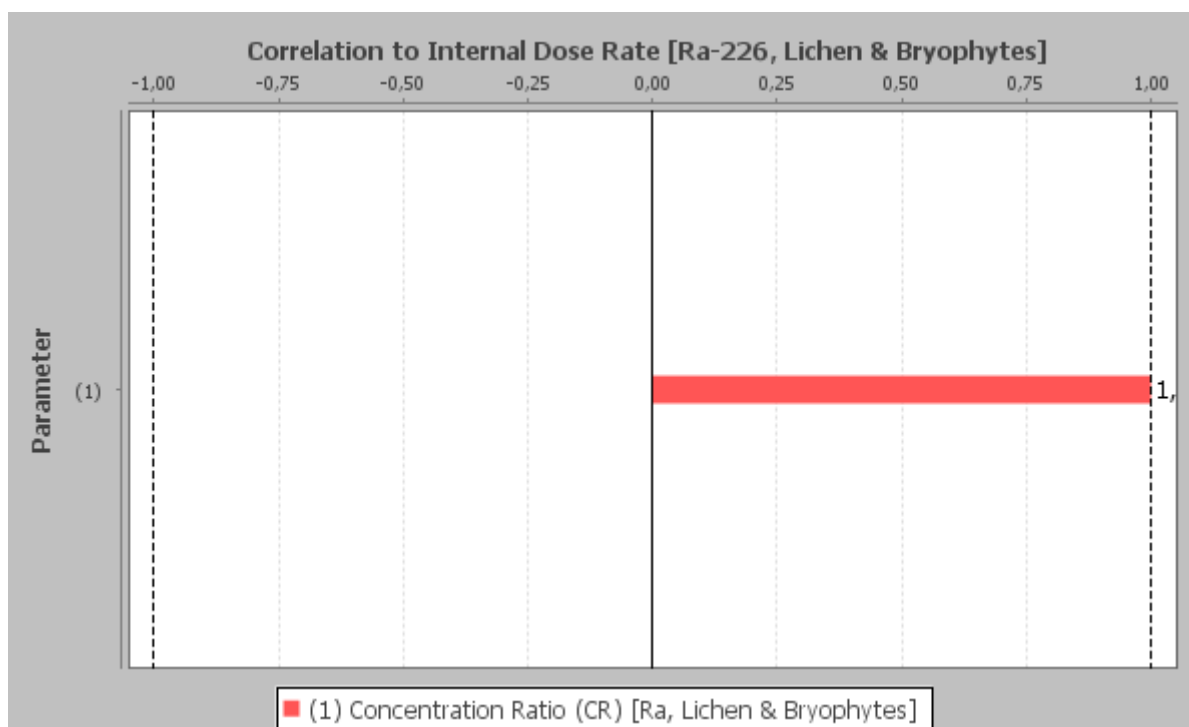


Рис.7. Коэффициент корреляции внутренней дозы облучения ^{226}Ra для лишайников и мхов

Таблица 6. Общая мощность дозы облучения

| Total Dose Rate [μGy h ⁻¹] Isotope | Amphibian | Annelid | Arthropod – detritivorous | Bird | Flying insects | Grasses & Herbs | Lichen & Bryophytes | Mammal - large | Mammal - small-burrowing | Mollusc – gastropod | Reptile | Shrub | Tree |
|--|-----------|----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------|----------|----------|
| U-238 | 0,414264 | 2,550494 | 0,78568 | 0,095276 | 0,785428 | 9,674191 | 69,28475 | 0,413917 | 0,414201 | 2,55027 | 0,392545 | 4,614654 | 0,499217 |
| U-234 | 0,023618 | 0,145385 | 0,044789 | 0,005433 | 0,044772 | 0,551441 | 3,847622 | 0,023594 | 0,023615 | 0,14537 | 0,02238 | 0,263041 | 0,028457 |
| Th-230 | 0,166036 | 3,845492 | 2,12779 | 0,164019 | 2,125649 | 67,01833 | 158,8706 | 0,057142 | 0,059547 | 3,843351 | 0,912361 | 25,55112 | 0,530196 |
| Ra-226 | 73,0968 | 72,4191 | 72,46101 | 58,74184 | 66,50093 | 264,7425 | 1050,227 | 67,53915 | 72,73708 | 72,909 | 72,35179 | 482,328 | 20,17917 |
| Pb-210 | 0,36933 | 1,400882 | 0,963982 | 0,195123 | 1,060797 | 0,337643 | 5,991681 | 0,118656 | 0,119317 | 0,02368 | 0,124742 | 0,889875 | 0,221085 |
| Th-228 | 0,039188 | 0,11435 | 0,079874 | 0,016617 | 0,056475 | 1,373523 | 3,254298 | 0,008539 | 0,035182 | 0,09135 | 0,051419 | 0,531165 | 0,021687 |

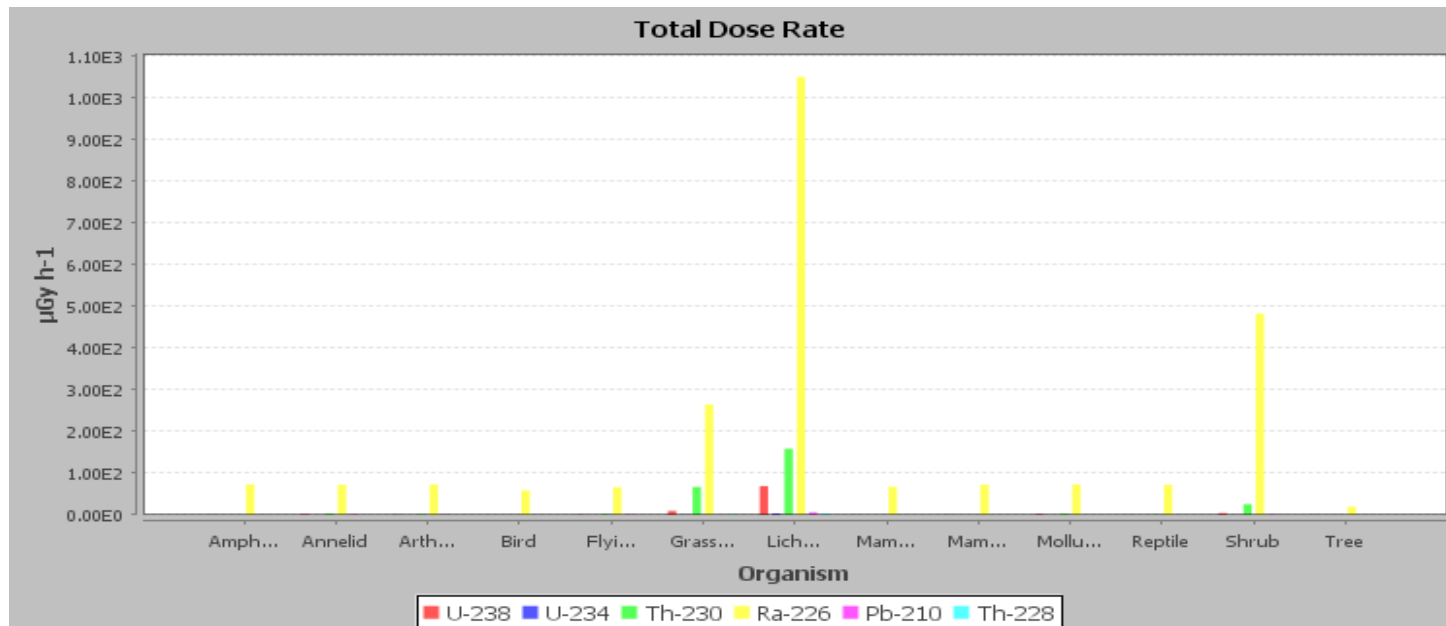


Рис.8. Графическое изображение общей дозы облучения организмов

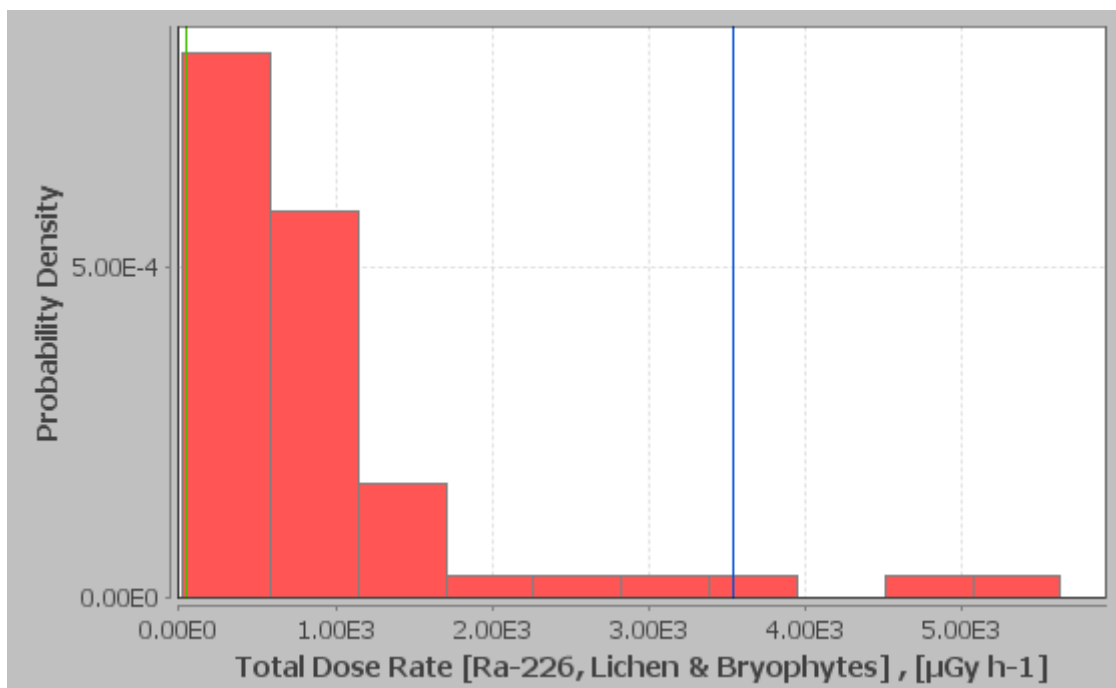


Рис.9. Общая доза облучения для мхов и лишайников ^{226}Ra (мкГр/ч)

Статистические показатели:

Среднее значение – 918 мкГр/час

Минимальное значение – 22,6 мкГр/час

Максимальное значение – 5630 мкГр/час

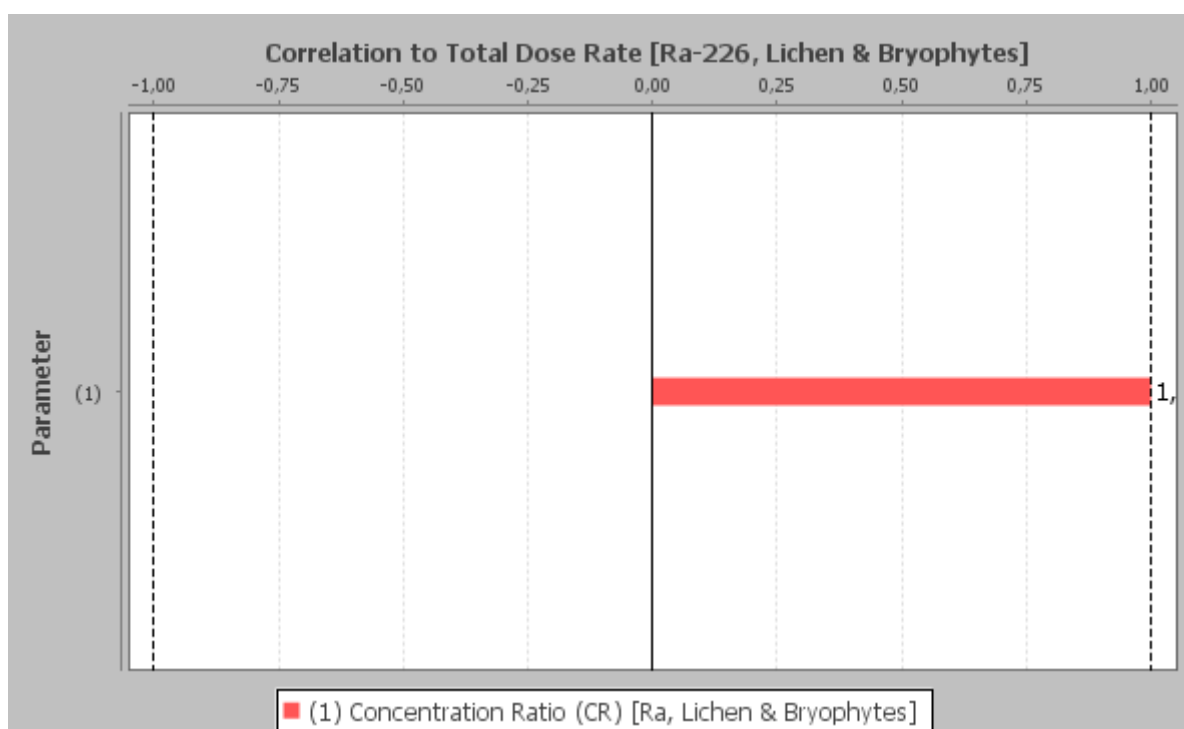


Рис.10. Коэффициент корреляции внутренней дозы облучения ^{226}Ra для лишайников и мхов

Таблица 7. Содержание радионуклидов в организме

| Activity Concentration in organism [Bq kg ⁻¹ f.w.] Isotope | Amphibian | Annelid | Arthropod – detritivorous | Bird | Flying insects | Grasses & Herbs | Lichen & Bryophytes | Mammal - large | Mammal - small-burrowing | Mollusc - gastropod | Reptile | Shrub | Tree |
|--|-----------|----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------|---------|----------|
| U-238 | 17,24523 | 106,2548 | 32,71959 | 3,963516 | 32,71959 | 403,0782 | 2868,32 | 17,24523 | 17,24523 | 106,2548 | 16,34461 | 192,272 | 20,79982 |
| U-234 | 0,842565 | 5,191385 | 1,59861 | 0,193649 | 1,59861 | 19,69354 | 140,14 | 0,842565 | 0,842565 | 5,191385 | 0,798563 | 9,394 | 1,016235 |
| Th-230 | 6,034557 | 142,305 | 78,68636 | 6,034557 | 78,68636 | 2482,08 | 5894,94 | 2,102012 | 2,102012 | 142,305 | 33,69346 | 946,293 | 19,61159 |
| Ra-226 | 471,4325 | 460,8419 | 460,8419 | 384,8043 | 460,8419 | 1915,74 | 7556,53 | 471,4325 | 471,4325 | 507,884 | 471,4325 | 3512,19 | 123,1275 |
| Pb-210 | 1451,522 | 5826,125 | 4841,032 | 737,421 | 4841,032 | 1454,52 | 31514,6 | 452,7806 | 452,7806 | 88,13514 | 476,9418 | 3878,72 | 844,2668 |
| Th-228 | 0,017894 | 0,421971 | 0,233325 | 0,017894 | 0,233325 | 7,36 | 17,48 | 0,006233 | 0,006233 | 0,421971 | 0,09991 | 2,806 | 0,058153 |

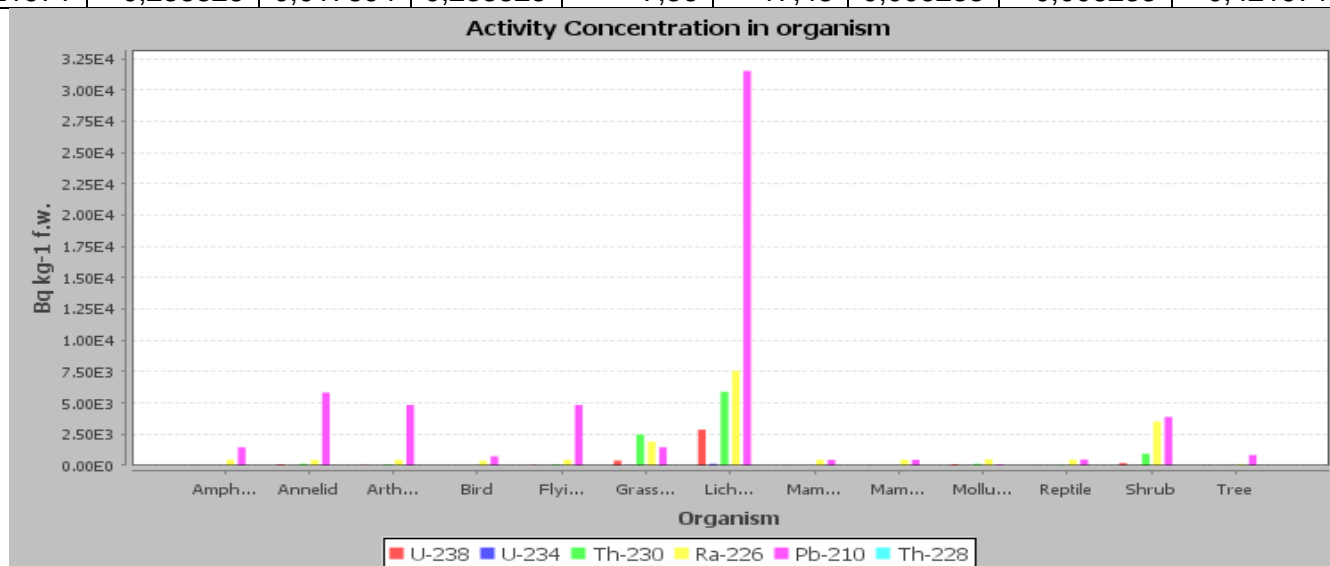


Рис.11. Графическое изображение содержания радионуклидов в организмах

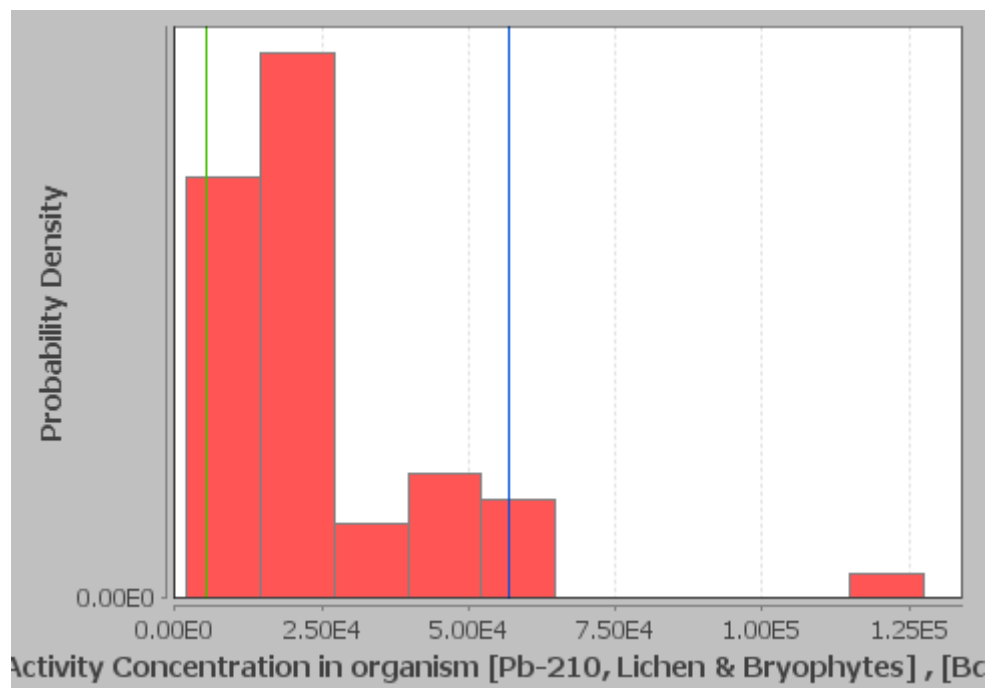


Рис. 12. Содержание ^{210}Pb в мхах и лишайниках

Статистические показатели:

Среднее значение – 24300 Бк/кг

Минимальное значение – 2000 Бк/кг

Максимальное значение – 127000 Бк/кг

Таблица 5. Коэффициент риска

| Organism | Risk Quotient [unitless] |
|---------------------------|--------------------------|
| Amphibian | 7,410924 |
| Annelid | 8,04757 |
| Arthropod - detritivorous | 7,646313 |
| Bird | 5,921831 |
| Flying insects | 7,057405 |
| Grasses & Herbs | 34,36976 |
| Lichen & Bryophytes | 129,1476 |
| Mammal - large | 6,816099 |
| Mammal - small-burrowing | 7,338894 |
| Mollusc - gastropod | 7,956302 |
| Reptile | 7,385524 |
| Shrub | 51,41778 |
| Tree | 2,147982 |

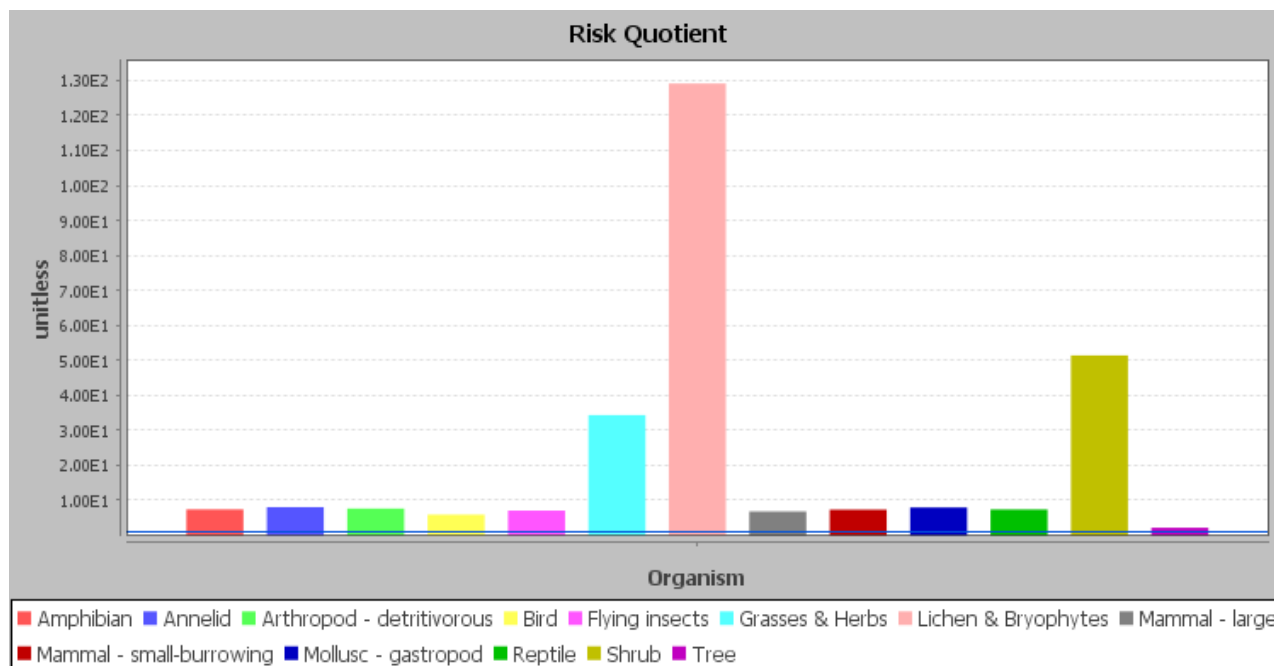


Рис. 13. Графическое изображение коэффициента риска для организмов

Таблица 8. Общая мощность дозы

| Organism | Total Dose Rate per organism [$\mu\text{Gy h}^{-1}$] |
|---------------------------|--|
| Amphibian | 74,10924 |
| Annelid | 80,4757 |
| Arthropod - detritivorous | 76,46313 |
| Bird | 59,21831 |
| Flying insects | 70,57405 |
| Grasses & Herbs | 343,6976 |
| Lichen & Bryophytes | 1291,476 |
| Mammal - large | 68,16099 |
| Mammal - small-burrowing | 73,38894 |
| Mollusc - gastropod | 79,56302 |
| Reptile | 73,85524 |
| Shrub | 514,1778 |
| Tree | 21,47982 |

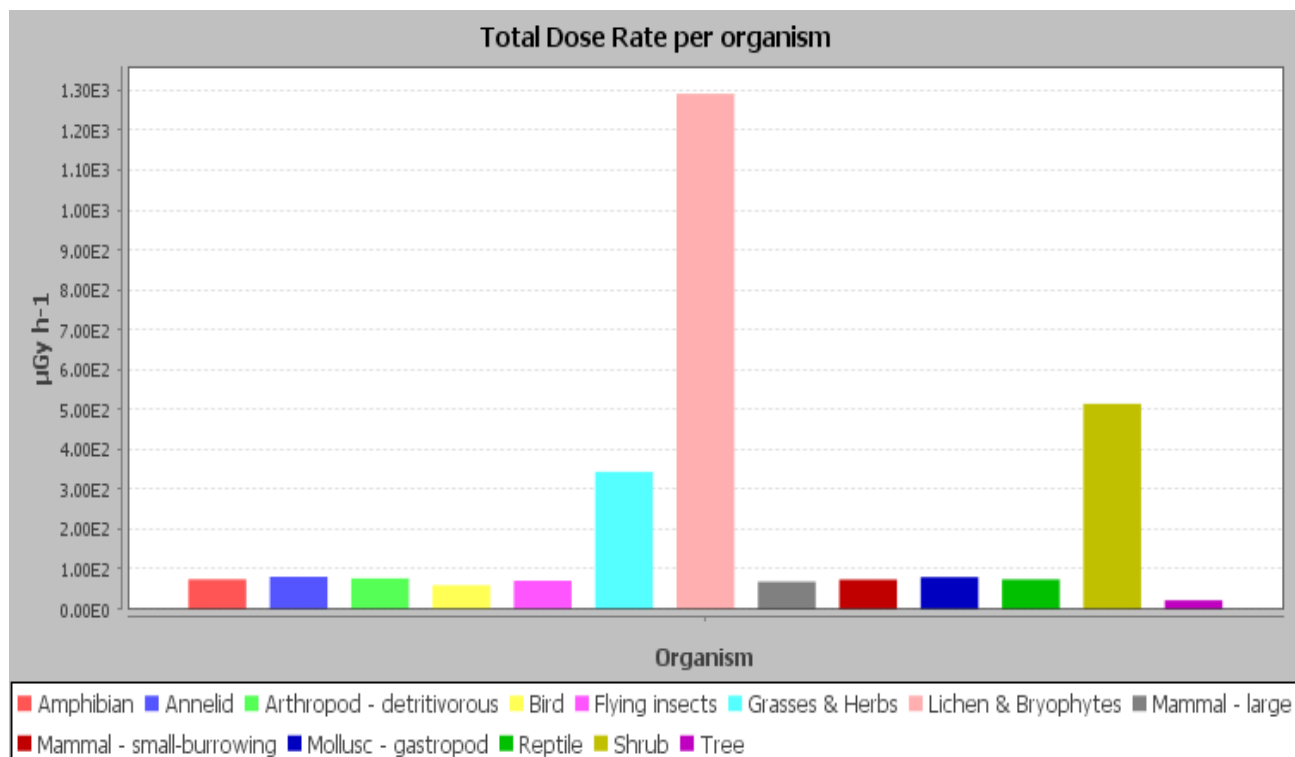


Рис.14. Общая мощность дозы облучения для организмов

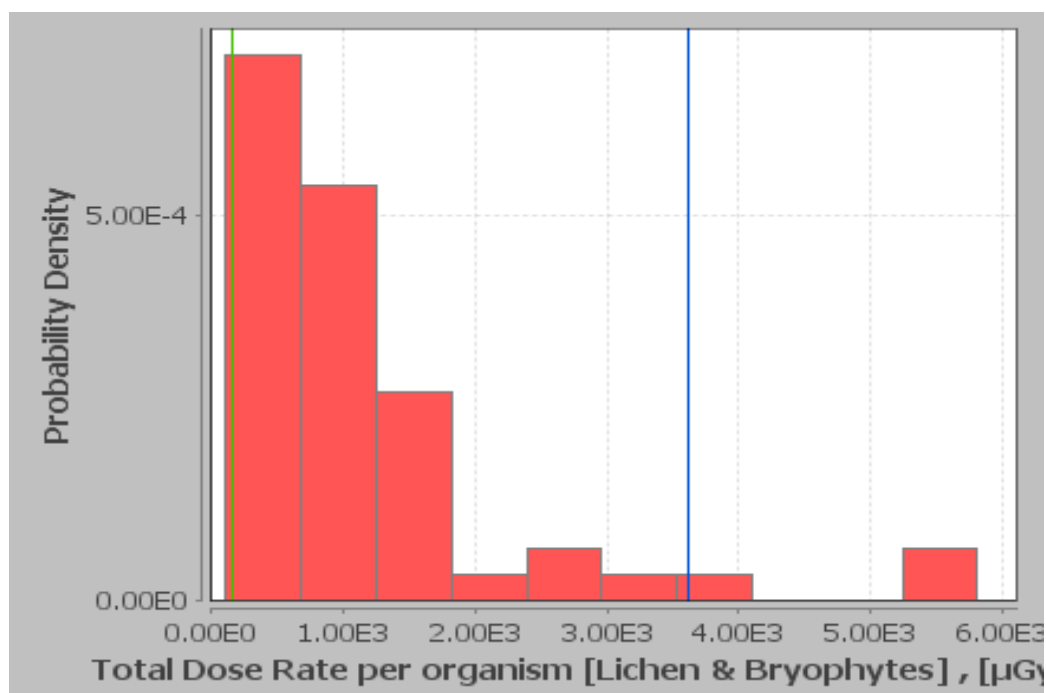


Рис.15. Общая доза облучения для лишайников и мхов

Статистические показатели:

Среднее значение – 1130 Бк/кг

Минимальное значение – 107 Бк/кг

Максимальное значение – 5810 Бк/кг

Таблица 9. Коэффициент концентрации

| Concentration Ratio (CR) [Bq kg ⁻¹ (f.w.) per Bq kg ⁻¹ soil (d.w.) or Bq m ⁻³ air for H, C, S & P]-Nuclide | Amphibian | Annelid | Arthropod – detritivorous | Bird | Flying insects | Grasses & Herbs | Lichen & Bryophytes | Mammal - large | Mammal - small-burrowing | Mollusc - gastropod | Reptile | Shrub | Tree |
|---|-----------|----------|---------------------------|----------|----------------|-----------------|---------------------|----------------|--------------------------|---------------------|----------|-------|----------|
| U | 0,005471 | 0,03371 | 0,010381 | 0,001257 | 0,010381 | 0,12788 | 0,91 | 0,005471 | 0,005471 | 0,03371 | 0,005185 | 0,061 | 0,006599 |
| Th | 0,000389 | 0,009173 | 0,005072 | 0,000389 | 0,005072 | 0,16 | 0,38 | 0,000136 | 0,000136 | 0,009173 | 0,002172 | 0,061 | 0,001264 |
| Ra | 0,044295 | 0,0433 | 0,0433 | 0,036156 | 0,0433 | 0,18 | 0,71 | 0,044295 | 0,044295 | 0,04772 | 0,044295 | 0,33 | 0,011569 |
| Pb | 0,119753 | 0,480664 | 0,399392 | 0,060838 | 0,399392 | 0,12 | 2,6 | 0,037355 | 0,037355 | 0,007271 | 0,039348 | 0,32 | 0,069653 |

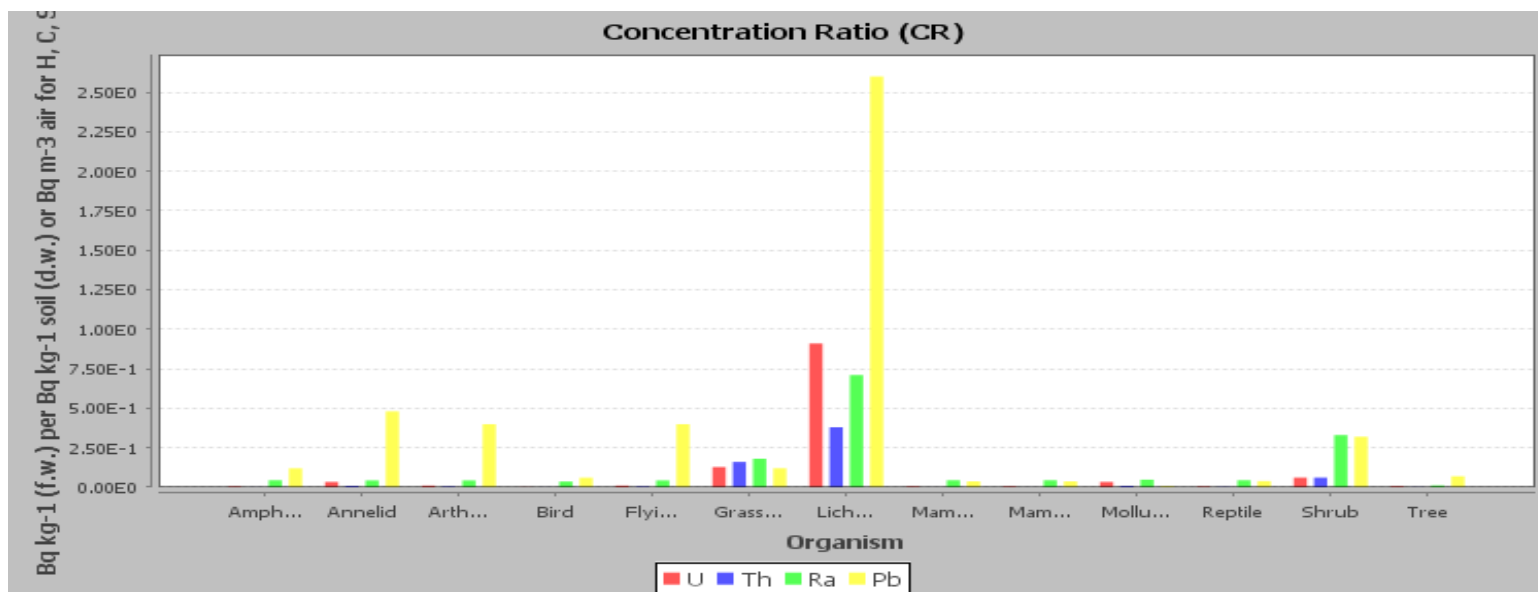


Рис.16. Графическое изображение коэффициента концентрации радионуклидов для организмов

Раздел 3

Таблица 10. Возможные радиобиологические эффекты по базе данных программы Erics tool 1.2:

| | Dose rate range [μGy h-1] | Effect |
|---------------------------|----------------------------------|---|
| Амфибии | 0-50 | Нет данных для радиобиологических эффектов, наблюдаемых в этом диапазоне мощности поглощённой дозы. |
| Кольчатые черви | 0-50 | Нет статистически значимого влияния на показатели выживаемости организмов в этом диапазоне мощности поглощённой дозы. |
| Членистоногие-детритофаги | 50-100 | Нет данных для радиобиологических эффектов, наблюдаемых в этом диапазоне мощности поглощённой дозы. |
| Птицы | 50-100 | 1. Нет статистически значимого влияния на вес птиц. 2. Увеличение инвазии с паразитами перьев. 3. Нет статистически значимого влияния на физиологические функции размножения. |
| Летающие насекомые | 50-100 | Нет статистически значимого влияния на уровни рецессивных сцепленных с полом летальных мутаций. |
| Злаки, травы | 200-400 | <u>Одуванчик</u> . Снижение всхожести семян. Умеренное сокращение количества растений с листьями (22%). Увеличение числа хромосомных aberrаций (3, 4 - раз). <u>Дикая вика</u> . Основное снижение выживаемости в конце первого вегетационного периода от максимального количества проросших растений (54% контрольное значение). Умеренное увеличение числа хромосомных aberrаций (1,75 раза). <u>Скерда</u> . Значительное увеличение частоты aberrантных клеток в анализе анафазы (в 2,7 раза), но не оказывает воздействия на увеличение aberrантных клеток в анализе метафазы. <u>Ячмень</u> . Умеренный рост растений с аномалиями (1,6 раза) и восковой реверсий (1,89 раза). <u>Горох</u> . Не статистически значимой разницы по массе семян. |
| Мхи и лишайники | 1000-5000 | Нет статистически значимого влияния на плотность видов |

| | | |
|-----------------------|--------|--|
| Большие млекопитающие | 50-100 | <u>Собаки</u> . Умеренное снижение продолжительности жизни (30% уменьшение). |
| Мелкие млекопитающие | 50-100 | <u>Полевки</u> . Заражение эктопаразитами и низкая упитанность полевок в популяции (3-кратное увеличение). <u>Мыши</u> . Умеренное снижение плодовитости. Основное снижение мужской фертильности. |
| Брюхоногие моллюски | 50-100 | Нет статистически значимого влияния на частоту аномальных личинок независимо от температуры выращивания (20, 24 и 28 ° C). |
| Рептилии | 50-100 | Нет данных для радиобиологических эффектов, наблюдаемых в этом диапазоне мощности поглощённой дозы. |
| Деревья | 0-50 | <u>Сосна</u> . Пожелтение в сосновых иголок (48% по сравнению с 0% в контроле). Сокращение длины иглы (40% контрольное значение). Увеличение аномальной частоты наследования локусов ферментных препаратов в эндоспермов (3,6 раза). Значительное увеличение частоты мутаций в аллозимных локусов и покрытосеменных с мутациями в ферментной локусов (3 раза). Значительное увеличение частоты хромосомных aberrаций в хвое (в 2,4 раза). Основное снижение семенной массы (снижения до 55% контрольной величины). |

Выводы

1. Общий фактор риска составил 470,7. По радионуклидам высокий фактор риска наблюдается у ^{226}Ra – 384,2; ^{230}Th – 58,3; ^{238}U – 23,7.
2. Во внешнюю дозу облучения организмов среди радионуклидов основной вклад вносит ^{226}Ra особенно для амфибий (9,47 мкГр/час), кольчатых червей (9,58 мкГр/час), членистоногих (9,69 мкГр/час), мелких мышевидных грызунов (9,05 мкГр/час), рептилий (8,73 мкГр/час).
3. Во внутреннюю дозу облучения организмов среди радионуклидов основной вклад вносит ^{226}Ra особенно для мхов и лишайников (1050 мкГр/час).
4. Наиболее высокую поглощенную дозу облучения получают следующие организмы: мхи и лишайники (1291,476 мкГр/час), кустарники (514,1778 мкГр/час), травянистые растения (343,6976 мкГр/час).
5. Мхи и лишайники способны накапливать радионуклиды больше чем другие организмы ^{210}Pb – 31500 Бк/кг, ^{226}Ra – 7560 Бк/кг, ^{230}Th – 5890 Бк/кг, ^{238}U – 2870 Бк/кг. Коэффициент риска для них составил 34,37.
6. Согласно базы данных радиобиологических эффектов программы Erica tool 1,2 облучение живых организмов в данных диапазонах поглощенных доз не вызывает летальных эффектов, однако способствует увеличению уровня морфофизиологических

нарушений.

Литература:

1. Быковченко Ю.Г. Техногенное загрязнение ураном биосферы Кыргызстана. – Бишкек, 2005. – 169 с.
2. Васильев И.А. Оценка экологической опасности хранилищ радиоактивных отходов // Радиозэкологические и смежные проблемы уранового производства. – Бишкек, 2008. – Ч.5. – С.101-103.
3. Воротницкая И.Е. Биогенная миграция урана в озере Иссык-Куль. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – М.: МГУ, 1988. – 17 с.
4. Дженбаев Б.М. Биогеохимия природных и техногенных экосистем Кыргызстана. – Бишкек: Илим, 2012. – 404 с.
5. Дженбаев Б.М., Калдыбаев Б.К., Жолболдиев Б.Т. Проблемы радиозэкологии и радиационной безопасности бывших урановых производств в Кыргызстане // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2013. – Т.53, № 4. – С.428-431.
6. Дженбаев Б.М., Жолболдиев Б.Т., Калдыбаев Б.К. Современное состояние Иссык-Кульской урановой радиобиогеохимической провинции // Радиационная биология. Радиозэкология. – 2013. – Т.53, № 4. – С.432-440.
7. Калдыбаев Б.К., Дженбаев Б.М. Радиозэкологические исследования прибрежной зоны биосферной территории «Иссык-Куль». Экология и биогеохимия горных таксонов биосферы. Lap Lambert Academic Publishing, Germany 2015, с. 122.
8. Карпачев Б.М., Менг С.В. Радиационно-экологические исследования в Кыргызстане – Бишкек, 2000. – 56 с.
9. Ковальский В.В. Геохимическая экология: Очерк / В.В.Ковальский. – М.: Наука, 1974. – 300 с.
10. Ковальский В.В., Воротницкая И.Е., Лекарев В.С. и др. Урановые биогеохимические пищевые цепи в условиях Иссык-Кульской котловины // Тр.Биогеохим.лаб. – М.: Наука, 1968. – Т.ХII. – С.25-53.
11. Торгоев И.А, Алешин Ю.Г. Геоэкология и отходы горнопромышленного комплекса Кыргызстана. – Бишкек: Илим, 2009. – 240 с. Тыныбеков А.К., Хамби Д.М.. Радиологическая характеристика южного побережья оз. Иссык-Куль. Сб.тр. ин-та Менеджмента, Бизнеса и Туризма. – 1999. – Вып.2. – С.9-17.
13. B.Djenbaev, V.Kaldybaev, T.Toktoeva, A.Kenjebaeva. Radiobiogeochemical Assessment of the Soil Near the Issyk-kul Region. Journal of Geological Resource and Engineering (USA) 1 (2016) p.39-43.