

DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-706

УДК 574.64:58.084.1



Научная статья | Экология

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РАЗНЫХ МОДИФИКАЦИЙ ALLIUM-ТЕСТА ДЛЯ ОЦЕНКИ РАДИОТОКСИЧНОСТИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЕКИ ЕНИСЕЙ

*А.Я. Болсуновский, Е.А. Трофимова*

**Обоснование.** Донные отложения реки Енисей (ДО) содержат ксенобиотики химической и радиационной природы, которые могут оказывать негативное воздействие на жизнедеятельность водных организмов. Ранее проведенное тестирование проб ДО с использованием лукового теста (*Allium-test*) показало противоречивый отклик индикаторных параметров лукавицы (стимуляция и ингибирование) на химический и радионуклидный состав ДО. Луковый биотест с пророщенными семенами ранее не использовали для тестирования проб ДО р. Енисей, но этот тест-объект ранее показал чувствительность к малым дозам гамма-облучения.

**Цель исследований** – оценить возможность использования двух модификаций лукового биотеста (луковицы и семена *A. сера*) для определения токсичности проб ДО реки Енисей с относительно высоким содержанием техногенных радионуклидов.

**Материалы и методы.** Для лабораторных токсикологических экспериментов использовали три пробы ДО р. Енисей с высоким содержанием техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ ; в качестве контроля служили искусственные ДО, приготовленные по стандартному протоколу. Удельную активность радионуклидов ДО измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США). В экспериментах в качестве тест-объекта использовали репчатый лук (*Allium сера L.*) сорта Штуттгартер ризен (луковицы и семена). В качестве индикатора токсичности ДО оценивали рост корней.

**Результаты.** При тестировании радиоактивных ДО р. Енисей индикаторные показатели лука в модификации с луковицами показали достоверный эффект стимуляции роста корней, а в модификации с семенами лука – ин-

гибирование роста. Ранее эффект стимуляции роста корней наблюдался у луковиц при тестировании ДО р. Енисей с более низким содержанием  $^{137}\text{Cs}$ . Впервые был получен эффект ингибирования роста корней проростков лука при тестировании ДО с содержанием  $^{137}\text{Cs}$  в широком диапазоне.

**Заключение.** Сравнение двух модификаций лукового теста (луковицы и семена) для оценки токсичности ДО показало, что только рост корней проростков лука как индикаторный параметр обладает достаточной чувствительностью к содержанию техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в ДО и позволяет оценить биологические эффекты влияния радиоактивности.

**Ключевые слова:** донные отложений реки Енисей; техногенные радионуклиды; луковый биотест (*Allium-test*); длина корня; токсичность; стимулирование роста

**Для цитирования.** Болсуновский А.Я., Трофимова Е.А. Использование разных модификаций *Allium*-теста для оценки радиотоксичности донных отложений реки Енисей // *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*. 2024. Т. 16, №1. С. 27-45. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-706

Original article | Ecology

## USING DIFFERENT MODIFICATIONS OF THE ALLIUM TEST TO EVALUATE RADIOTOXICITY OF BOTTOM SEDIMENTS OF THE YENISEI RIVER

*A. Ya. Bolsunovsky, E. A. Trofimova*

**Background.** Bottom sediments (BS) of the Yenisei River contain xenobiotics of the chemical and radiation origins, which may adversely affect life functions of aquatic organisms. Previous assays of BS samples using the *Allium* test showed contradictory responses of the endpoints of onion bulbs (stimulation and inhibition) to the chemical and radionuclide composition of the BS. The *Allium* test with germinated seeds has not been used so far to test samples of the Yenisei BS, although previous studies showed sensitivity of this test object to exposure to low-dose gamma radiation.

**Purpose.** The purpose of the study was to assess the possibility of using two modifications of the *Allium* test (*A. cepa* bulbs and seeds) to evaluate toxicity of samples of the Yenisei River BS containing relatively high activity concentrations of artificial radionuclides.

**Material and Methods.** Toxicological laboratory experiments were conducted using three samples of the Yenisei BS containing high activity concentrations of

the artificial radionuclide  $^{137}\text{Cs}$ ; artificial BS prepared according to the standard protocol were used as the control. Activity concentrations of BS radionuclides were measured using a gamma-spectrometer coupled to a hyper-pure germanium detector (Canberra, U.S.). The test object was onion *Allium cepa* L. cv. Stuttgarter Riesen (bulbs and seeds). Root growth was chosen as the endpoint to determine BS toxicity.

**Results.** Experiments with radioactive BS from the Yenisei River demonstrated significant stimulation of root growth in the modification with onion bulbs and inhibition of root growth in the modification with onion seeds. In previous research, stimulation of root growth was observed in onion bulbs exposed to Yenisei BS containing lower activity concentrations of  $^{137}\text{Cs}$ . For the first time, inhibition of root growth of onion seedlings was observed in assays with BS containing a wide range of  $^{137}\text{Cs}$  activity concentrations.

**Conclusion.** Comparison of two modifications of the *Allium* test (bulbs and seeds) for assessing the toxicity of BS showed that only the growth of onion seedling roots used as an endpoint has sufficient sensitivity to the content of the artificial radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  in BS and makes it possible to evaluate the biological effects of radioactivity.

**Keywords:** bottom sediments of the Yenisei River; artificial radionuclides; *Allium* test; root length; toxicity; stimulation of growth

**For citation.** Bolsunovsky A. Ya., Trofimova E.A. Using Different Modifications of the *Allium* Test to Evaluate Radiotoxicity of Bottom Sediments of the Yenisei River. *Siberian Journal of Life Sciences and Agriculture*, 2024, vol. 16, no. 1, pp. 27-45. DOI: 10.12731/2658-6649-2024-16-1-706

## Введение

Деятельность промышленных предприятий Красноярского края привела к техногенному загрязнению одной из крупнейших рек мира – р. Енисей. Донные отложения реки (ДО) являются основным депо поллютантов, которые могут оказывать негативное воздействие на жизнедеятельность водных организмов. Кроме химического загрязнения, ДО содержат и техногенные радионуклиды, поступившие в р. Енисей в результате деятельности одного из производственных комплексов г. Железногорска [1, 4, 11, 13, 28]. В зоне радиационного загрязнения ДО реки Енисей массово развиваются водные растения, в биомассе которых был зарегистрирован широкий перечень техногенных радионуклидов [2, 15]. Ранее нами выявлен повышенный уровень хромосомных нарушений в ана-телофазных клетках корневой меристемы водного растения *Elodea canadensis*, вегетирующего

в районах повышенного радиационного загрязнения р. Енисей, а также при биотестировании ДО из этих районов в лабораторных условиях [2, 8-9, 15, 26]. При этом была получена положительная корреляция уровня клеток с хромосомными нарушениями в корнях элодеи с содержанием техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  ДО в естественных условиях [8]. Таким образом, ДО р. Енисей в зоне радиационного загрязнения, за счёт своего токсического воздействия, могут нести потенциальную опасность для гидробионтов, обитающих в пределах этой экосистемы. Однако достоверность этого утверждения должна базироваться на результатах не одного, а нескольких биотестов.

Для оценки токсичности воды и почв успешно используется луковый биотест (*Allium-test*) на основе лука репчатого *Allium cepa* [3, 6, 10, 16-17, 21, 27]. Луковый биотест включает в себя как оценку ростовых, так и цитогенетических параметров развития растений [3, 6, 10, 16-17, 21, 27]. Использование нами ранее лукового теста [3] показало отсутствие токсичности тестируемых ДО р. Енисей, отобранных в зоне радиационного загрязнения. В проведенных экспериментах с радиоактивными ДО был получен эффект стимуляции роста корней у луковиц. Также стимуляция роста корней была получена нами в экспериментах по облучению луковиц источником гамма-излучения в малых дозах. В работе [6] также использовали луковый биотест для оценки токсичности ДО реки Енисей, в том числе и для проб с повышенным содержанием техногенных радионуклидов. Авторами исследования [6] была отмечена как стимуляция, так и угнетение индикаторных параметров тест-объекта, однако, авторы не связывают эти результаты с действием радиационного фактора. Возможно это связано с тестированием [3, 6] проб ДО с относительно низким содержанием техногенных радионуклидов (менее 1200 Бк/кг радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ ).

В биотестировании загрязнения окружающей среды кроме луковиц *A. cepa*, так же используют и его семена [7, 12, 14, 19-21, 25]. Использование семян имеет ряд преимуществ перед луковицами при биотестировании, поскольку семена находятся в состоянии биологического покоя и обладают генетической и физиологической однородностью. Ранее биотесты с использованием семян лука показали достоверные результаты при оценке влияния малых доз излучения разного типа, а также почв из зоны отчуждения Чернобыльской АЭС [7, 12, 14, 19, 25]. Однако, для биотестирования проб ДО реки Енисей семена лука ранее не использовали.

В пойме реки Енисей ранее были обнаружены участки с аномальным содержанием техногенных радионуклидов в ДО, достигающего уровня

низкой активности радиоактивных отходов [4, 11]. В корневой меристеме элодеи канадской, произрастающей на некоторых из аномальных участков, был зарегистрирован повышенный уровень хромосомных нарушений, что может указывать на генотоксичность этих ДО [15]. В связи с этим, возникает необходимость проверить токсичность ДО, с более высоким содержанием техногенных радионуклидов, по сравнению с ранее исследованными ДО [3, 6].

Цель работы – оценить возможность использования двух модификаций лукового биотеста (луковицы и семена *A. cepa*) для определения токсичности проб ДО реки Енисей с относительно высоким содержанием техногенных радионуклидов.

### Материалы и методы

Для лабораторных токсикологических экспериментов использовали пробы ДО р. Енисей, отобранные в зоне радиационного загрязнения. Пробы ДО отбирали в двух районах в местах аномального содержания техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ : вблизи с. Балчуг (на удалении 95-105 км от г. Красноярск по течению реки) – пробы № 1 и №3; вблизи с. Стрелка (на удалении 325 км от г. Красноярск по течению реки) – проба № 2. В качестве контроля служили искусственные ДО (К), приготовленные согласно OECD Test Guideline 219 [23] со следующим составом: 5% торф, 20% каолин, 75% песок, влажностью 30%, рН 7, без добавления питательной среды. Удельную активность радионуклидов ДО измеряли на гамма-спектрометре со сверхчистым германиевым детектором (Canberra, США). Спектры анализировали с помощью программного обеспечения Genie-2000 (Canberra, США). Результаты радионуклидного анализа проб ДО приведены в Таблице 1. В радиоактивных пробах (№1, 2 и 3) доминировал техногенный радионуклид  $^{137}\text{Cs}$  с активностью от 4700 до 17300 Бк/кг. В контрольной пробе содержание  $^{137}\text{Cs}$  было на уровне 0.4 Бк/кг. Кроме техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ , в пробах ДО регистрировался природный радионуклид  $^{40}\text{K}$  с активностью 320-500 Бк/кг.

В экспериментах по биотестированию использовали репчатый лук (*Allium cepa* L.) сорта Штуттгартер ризен (луковицы и пророщенные семена). Луковицы предварительно синхронизировали в темноте при 4°C в течении 10 суток. За сутки перед экспериментом луковицы замачивали в воде для активации и выдерживали при температуре 20°C. Для каждого варианта эксперимента использовалась проба ДО объёма 0.5 л, в дальнейшем каждую пробу ДО разделяли на три равные части (по 0.165 л),

которые помещали в стеклянные стаканы объёмом 0.5 л. За неделю до начала эксперимента влажность в активных ДО подводили до 25% дистиллированной водой. Влажные ДО хранили в холодильнике при 4°C до начала эксперимента. В каждый стакан высаживали по 10 луковиц. Пробы экспонировали в темноте, длительность эксперимента составила 5 суток.

Таблица 1.

**Содержание радионуклидов (Бк/кг DW) в пробах донных отложений разных районов р. Енисей, использованных для лукового теста**

Район отбора	Донные отложения			
	Контроль (К)	№1	№2	№3
Суммарная активность радионуклидов, Бк/кг	320±20	5200±200	7500±300	17800±700
Активность техногенных радионуклидов, Бк/кг	0.4±0.1	4700±200	7000±300	17300±700
Активность <sup>137</sup> Cs, Бк/кг	0.4±0.1	4700±200	7000±300	17300±700

В экспериментах по биотестированию использовали репчатый лук (*Allium cepa* L.) сорта Штуттгартер ризен (луковицы и пророщенные семена). Луковицы предварительно синхронизировали в темноте при 4°C в течении 10 суток. За сутки перед экспериментом луковицы замачивали в воде для активации и выдерживали при температуре 20°C. Для каждого варианта эксперимента использовалась проба ДО объёма 0.5 л, в дальнейшем каждую пробу ДО разделяли на три равные части (по 0.165 л), которые помещали в стеклянные стаканы объёмом 0.5 л. За неделю до начала эксперимента влажность в активных ДО подводили до 25% дистиллированной водой. Влажные ДО хранили в холодильнике при 4°C до начала эксперимента. В каждый стакан высаживали по 10 луковиц. Пробы экспонировали в темноте, длительность эксперимента составила 5 суток.

Семена лука проращивали в полипропиленовых контейнерах на ложе из двух слоев фильтровальной бумаги, смоченной в дистиллированной воде, в темноте при температуре 23-25°C. Для эксперимента отбирали проростки лука с длиной первичного корня 0.2 см. В экспериментах с семенами лука, в отличии от эксперимента с луковицами, ДО раскладывали по полипропиленовым контейнерам (объём 0.3 л), по 0.15 л на контейнер, высота слоя ДО составляла 3.2 см. Также за неделю до начала эксперимента подводили влажность в активных ДО и потом хранили в холодильнике до начала эксперимента. Проростки высаживали в ДО по 20 шт. на точ-

ку, в 4 ряда по центру контейнера, расстояние между рядами 1 см, между проростками 0.5 см. Контейнеры с проростками экспонировали при круглосуточном освещении люминесцентными лампами 20 Вт с уровнем освещённости 2.3 – 2.5 клк, в течении 7 суток. По окончании эксперимента растения извлекали из ДО, отмывали в проточной воде от прилипших частичек ДО, измеряли все необходимые параметры.

Основными индикаторными параметрами биотестирования в данной работе служили показатели роста корней, такие как средняя длина корня, суммарная длина корней и число корней на одно растение (луковицу или проросток), а также выживаемость тест-организмов к концу эксперимента.

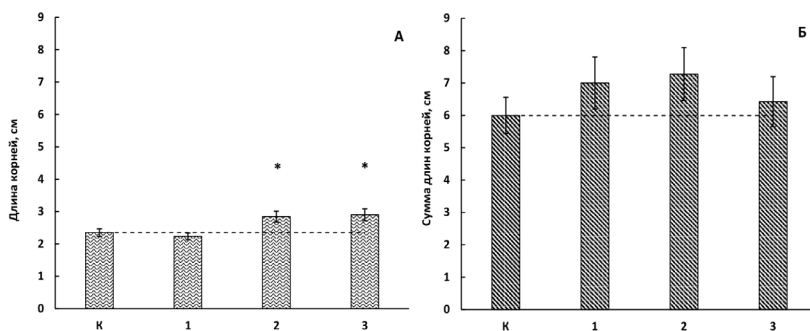
Достоверность различия тестируемых параметров между контролем и экспериментом оценивалась с помощью t-критерия, для установления статистической зависимости между индикаторными параметрами *A. cerea* и активностью  $^{137}\text{Cs}$  в тестируемых донных отложениях использовали корреляционный анализ Пирсона. Различия считались статистически значимыми при  $p < 0,05$ . Статистическая и графическая обработка данных выполнена в Excel для Microsoft office 2013.

### Результаты и обсуждение

В эксперименте, где в качестве тест-объектов использовали луковицы *A. cerea*, выживаемость луковиц на всех ДО варьировала от 93 до 97 %, что может косвенно свидетельствовать об отсутствии значительной разницы в острой токсичности радиоактивных проб и контроля.

На рис. 1 приведены индикаторные показатели лука, такие как параметры роста корней (средняя длина одного корня и суммарная длина корней) для ДО с разным содержанием техногенных радионуклидов. Средняя длина одного корня на луковице в тестируемых пробах ДО варьировала от 2.2 до 2.9 см и для донных отложений №2 и №3 достоверно отличалась от контрольных проб ДО (2.3 см) (рис.1-А). Следовательно, по средней длине одного корня на луковице все пробы ДО могут быть ранжированы в порядке убывания длины следующим образом: ДО № 3 (2.9 см) ~ ДО № 2 (2.8 см) > ДО № 1 (2.2 см) ~ контроль ДО (2.4 см). Суммарная длина всех корней на одной луковице в тестируемых пробах ДО варьировала от 6.4 до 7.3 см и превышала этот параметр в контроле (6.0 см), но разница с контрольными значениями была статистически недостоверна (рис.1-Б). Эти результаты использования лукового теста подтвердили ранее нами полученные данные [3], что радиоактивные пробы ДО р. Енисей, отобранные также в районе вблизи с. Балчуг, не проявили токсичности (угнете-

ния роста) и даже наоборот – была зарегистрирована стимуляция роста длины корней луковиц в тестируемых ДО по сравнению с контролем. Однако в новых токсикологических экспериментах (Рис.1) содержание техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в ДО (от 4700 до 17300 Бк/кг) более чем на порядок превышало содержание  $^{137}\text{Cs}$  (от 130 до 1200 Бк/кг) в ДО ранее проведенных экспериментов [3]. В ряде исследований установлено стимулирующее действие малых доз радиации на индикаторные параметры облученных семян и проростков растений [5, 10, 12, 18, 22, 24]. В отличие от суммарной длины корней (и средней длины одного корня) такой параметр как среднее число корней на одной луковице не показал достоверный эффект стимуляции роста за счет повышенного гамма-облучения. Для луковиц, выросших на ДО №2 и №3 с максимальным содержанием  $^{137}\text{Cs}$ , среднее число корней на одной луковице (21–22 штук) было меньше чем в контроле (24 штуки), но разница была статистически недостоверна. В проведенных экспериментах отсутствует корреляционная зависимость эффекта стимуляции роста длины корней от содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО, но можно отметить возможный пороговый уровень  $^{137}\text{Cs}$  в ДО равный 7000 Бк/кг (проба №2), начиная с которого длина корней достоверно отличается от контроля (рис.1-А).

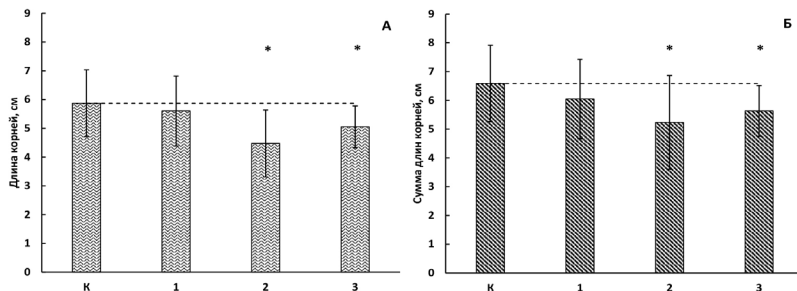


**Рис. 1.** Средняя длина (А) и суммарная длина (Б) корней у луковиц, на донных отложениях с разным содержанием техногенных радионуклидов (№1, 2, 3). Штриховая линия – линия уровня контроля (К). \* – достоверно отличается от контроля при  $p < 0.05$

При проведении биотестирования с использованием проросших семян *A. сера* их выживаемость составляла от 80 до 95 %, что, как и в случае с луковицами может свидетельствовать об отсутствии острой токсичности радиоактивных ДО по сравнению с контролем.



Индикаторные параметры роста корней проростков (средняя длина одного корня и суммарная длина корней) для ДО с разным содержанием техногенных радионуклидов приведены на рис. 2-А и 2-Б. При сравнении параметров роста корней семян (Рис.2) с ростом корней у луковиц (Рис.1) на радиоактивных ДО видна совершенно противоположная картина. Средняя длина одного корня и суммарная длина корней на одном проростке уменьшается при росте на радиоактивных пробах ДО (Рис.2), в отличие от увеличения длины корней у луковиц (Рис.1), относительно контроля. Разница параметров роста корней проростков на радиоактивных ДО №2 и №3 и контрольных проб ДО статистически достоверна (Рис. 2). Тогда, все пробы ДО могут быть ранжированы в порядке убывания длины корней на одном семени следующим образом: Контроль ДО ~ ДО № 1 > ДО № 3 ~ ДО № 2. Следовательно, луковый тест с использованием пророщенных семян демонстрирует эффект токсичности тестируемых ДО, в отличие от эффекта стимуляции при использовании луковиц на ДО с подобным уровнем радиоактивного загрязнения.



**Рис. 2.** Средняя длина (А) и суммарная длина (Б) корней проростков лука, на донных отложениях с разным содержанием техногенных радионуклидов (№1, 2, 3). Штриховая линия – линия уровня контроля (К). \* – отличия от контроля достоверны при  $p < 0.05$

Если для одной луковицы число выросших корней превышало 20, то для одного проростка среднее число корней было менее 2 и поэтому этот параметр не показал никакого достоверного эффекта влияния радиоактивных ДО на пророщенные семена. В экспериментах с семенами лука отсутствует корреляционная зависимость эффекта ингибирования роста корней от содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО, но можно отметить возможный пороговый уровень  $^{137}\text{Cs}$  в ДО равный 7000 Бк/кг (проба №2), начиная с которого длина корней достоверно отличается от контроля (рис. 2), как и в

случае с луковичками (рис.1-А). Только в обоих вариантах с луковичками и проростками проявляются разные отклики ростовых параметров на радиоактивность ДО. Ранее было отмечено негативное влияние малых доз гамма-облучения за счет точечного источника  $^{137}\text{Cs}$  как на ростовые, так и на цитогенетические параметры корней проростков лука [7]. Высокое содержание техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в ДО (до 17300 Бк/кг) в наших экспериментах формирует малые дозы гамма-облучения корней лука и при достижении пороговых значений доз – ингибируют рост корней.

В отмеченной ранее работе [6] также использовали луковый биотест для оценки токсичности ДО реки Енисей, в том числе тестировали пять проб ДО с повышенным содержанием техногенных радионуклидов из зоны радиационного загрязнения. Относительно низкое содержание техногенных радионуклидов в тестируемых авторами ДО (менее 1200 Бк/кг радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ ) не позволило выявить токсичность и генотоксичность радиационного фактора ДО для луковичек, но отмечена положительная корреляция генотоксичности с содержанием меди и нефтепродуктов в ДО. Авторы [6] констатируют, что сильных реакций индикаторных параметров лукового теста на качество исследованных ДО не выявлено из-за низкого уровня техногенного загрязнения исследованных проб, что согласуется с результатами химического анализа ДО. Констатация низкого уровня химического фактора в ДО р. Енисей, сделанная выше, позволяет считать радиационный фактор в используемых нами опытных пробах ДО (высокое содержание радионуклида  $^{137}\text{Cs}$ ) главным фактором проявления токсичности в случае с семенами лука.

Луковый тест используется не только для оценки токсичности на основе роста корней, но и генотоксичности на основе подсчета доли клеток в апикальной корневой меристеме, содержащих аномальные хромосомы [6-7, 10, 14, 16-17, 19-21]. При этом, индикатор генотоксичности (доля клеток с аномальными хромосомами) может проявлять наибольшую чувствительностью к качеству ДО р. Енисей, по сравнению с индикаторами общей токсичности (рост корней) [6]. Стимуляция роста корней у луковичек *A. sepa* при тестировании радиоактивных ДО не позволяет использовать этот тест-объект для оценки токсичности содержания радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в широком диапазоне удельной активности – от 130 до 1200 Бк/кг [3] и до 17300 Бк/кг (Рис.1). Возможно оценка генотоксичности на основе хромосомных нарушений корней у луковичек позволит выявить эффекты повышенного содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО, но при этом активность  $^{137}\text{Cs}$  должна быть существенно выше 1200 Бк/кг [6].

Результаты эксперимента по гамма-облучению пророщенных семян лука малыми дозами от точечного источника  $^{137}\text{Cs}$  показали, что частота встречаемости клеток с хромосомными нарушениями является более чувствительным параметром, по сравнению с длиной корней [7]. Следовательно, биотестирование с использованием в качестве тест-объекта пророщенные семена *A. cepa*, позволяет не только оценить токсичность радиоактивных ДО, но и повысить чувствительность тестирования при дополнительном анализе корней проростков семян на хромосомные нарушения в будущем (оценка генотоксичности).-

### Заключение

В проведенных экспериментах с использованием лукового биотеста (*Allium*-test) оценивали токсичность донных отложений (ДО) реки Енисей с высоким содержанием техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  (до 17300 Бк/кг), превышающим активности  $^{137}\text{Cs}$  в опубликованных ранее токсикологических экспериментах с ДО. Луковый биотест проводили в двух модификациях – с луковицами и пророщенными семенами *A. cepa*. В качестве основных индикаторных параметров оценивали среднюю длину корней и суммарную длину корней, выросших на одном растении (луковице или проростке).

Индикаторные параметры луковиц *A. cepa* при тестировании радиоактивных ДО показали достоверный эффект стимуляции роста корней. Несмотря на то, что в проведенных экспериментах отсутствует корреляционная зависимость эффекта стимуляции роста длины корней от содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО, можно отметить возможный пороговый уровень  $^{137}\text{Cs}$  в ДО равный 7000 Бк/кг, начиная с которого длина корней достоверно отличается от контроля. Ранее подобный эффект стимуляции роста корней наблюдался у луковиц при тестировании ДО р. Енисей с более низким содержанием  $^{137}\text{Cs}$  (до 1200 Бк/кг).

Индикаторные параметры пророщенных семян *A. cepa* (ранее для биотестирования ДО р. Енисей не использовались) при тестировании радиоактивных ДО впервые показали достоверный эффект угнетения роста корней, т.е. проявление токсичности ДО. В этих экспериментах также отсутствует корреляционная зависимость эффекта ингибирования роста корней от содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО, но можно отметить возможный пороговый уровень  $^{137}\text{Cs}$  в ДО равный 7000 Бк/кг, начиная с которого длина корней достоверно отличается от контроля.

Использование для оценки токсичности радиоактивно загрязнённых ДО р Енисей двух модификаций лукового теста (луковицы и семена *A.*

се́ра) показало, что только рост корней проростков лука как индикаторный параметр обладает достаточной чувствительностью к содержанию техногенного радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  в ДО и позволяет оценить биологические эффекты влияния радиоактивности. Использование в дальнейшем индикатора генотоксичности (доля клеток с аномальными хромосомами) позволит повысить чувствительность лукового теста в широком диапазоне содержания  $^{137}\text{Cs}$  в ДО.

**Информация о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование.** Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ (проект № 0287-2021-0019).

**Благодарности.** Авторы благодарят старшего научного сотрудника Дементьева Д.В. за помощь в гамма-спектрометрии проб донных отложений.

**Conflict of interest statement.** The authors have no conflicts of interest to declare.

**Funding.** The study was funded by State Assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0287-2021-0019).

**Acknowledgements.** The authors are grateful to Dementyev D.V., Senior Researcher, for his help in conducting gamma-spectrometric measurements of bottom sediment samples.

### Список литературы

1. Болсуновский А.Я., Ермаков А.И., Мясоедов Б.Ф., Новиков А.П., Соболев А.И. Новые данные по содержанию трансурановых элементов в донных отложениях реки Енисей // Доклады Академии наук. 2002. Т. 387, № 2. С. 233-236.
2. Болсуновский А.Я., Муратова Е.Н., Суковатый А.Г., Пименов А.В., Санжараева Е.А., Зотина Т.А., Корнилова М.Г. Радиоэкологический мониторинг реки Енисей и цитогенетические характеристики водного растения *Elodea canadensis* // Радиационная биология. Радиоэкология. 2007. Т. 47, № 1. С. 63-73.
3. Болсуновский А.Я., Трофимова Е.А., Зуева А.В., Дементьев Д.В. Первые данные по использованию Allium-теста для оценки химической и радиационной токсичности донных отложений реки Енисей // Доклады Академии наук. 2016. Т. 469, № 4. С. 513–517.

4. Болсуновский А.Я., Дементьев Д.В., Вахрушев В.И. Масштабный перенос техногенных радионуклидов по течению реки Енисей во время экстремального паводка 1966 года // Доклады Академии наук. Науки о Земле, 2021, Т. 498, № 2. С. 189–194.
5. Гераськин С.А., Чурюкин Р.С., Казакова Е.М. Модификация развития ячменя на ранних этапах онтогенеза при воздействии гамма-излучения не семена // Радиационная биология. Радиоэкология. 2015. Т. 55. № 6. С. 607–615.
6. Зотина Т.А., Трофимова Е.А., Александрова Ю.В., Анищенко О.В. Оценка качества донных отложений среднего участка р. Енисей с помощью *Allium* теста // Сибирский экологический журнал. 2019. Т. 3. С. 327-340. <https://doi.org/10.1134/S1995425519030120>
7. Зуева А. В., Трофимова Е. А., Дементьев Д. В., Болсуновский А. Я. Действие  $\gamma$ -излучения в малых дозах на цитогенетические параметры проростков семян лука *Allium cepa* в экспериментах разной длительности // Радиационная биология. Радиоэкология. 2021. Т. 61(2). С. 175-184.
8. Медведева М.Ю., Болсуновский А.Я., Зотина Т.А. Цитогенетические нарушения у водного растения *Elodea canadensis* в зоне техногенного загрязнения р. Енисей // Сибирский экологический журнал. 2014. Т. 21, № 4. С. 561-572. <https://doi.org/10.1134/S1995425514040088>
9. Муратова Е.Н., Горячкина О.В., Корнилова М.Г., Пименов А.В., Седельникова Т.С., Болсуновский А.Я. Цитогенетическое изучение водных растений акватории Енисея в зоне радиационного загрязнения // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2014. № 5. С. 510-517. <https://doi.org/10.1134/S1062359014050094>
10. Синовец С.Ю., Пяткова С.В., Козьмин Г.В. Экспериментальное обоснование использования Аллиум-теста в радиоэкологическом мониторинге // Изв. ВУЗов. Ядерная энергетика. 2009. № 1. С. 32-38.
11. Сухоруков Ф.В., Дегерменджи А.Г., Белолипецкий В.М., Болсуновский А.Я., Ковалев С.И., Косолапова Л.Г., Мельгунов М.С., Рапута В.Ф. Закономерности распределения и миграции радионуклидов в долине реки Енисей. Новосибирск, Изд-во СО РАН. Филиал “Гео”. 2004. 286 с.
12. Трофимова Е.А., Дементьев Д.В., Болсуновский А.Я. Влияние  $\gamma$ -излучения на развитие растений из облученных семян и проростков *Allium cepa* L. // Радиационная биология. Радиоэкология. 2019. Т. 59. № 3. С. 293-299.
13. Bolsunovsky A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River // Chem. Ecol. 2010. V. 26 (6). P. 401–409. <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.504668>
14. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu, Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa* L.) by gamma radiation // Radiat. Environ. Biophys. 2010. V. 52. P. 101–108. <https://doi.org/10.1007/s00420-009-1210-0>

- lium cepa*) by gamma-radiation // Journal of Environmental Radioactivity. 2019. V. 207. P. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
15. Bolsunovsky A., Dementyev D., Trofimova E. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants // Journal of Environmental Radioactivity. 2020. Vol. 211. № 106100. P. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106100>
  16. Fiskesjö G. The Allium-test as a standard in environmental monitoring // Hereditas. 1985. Vol. 102. P. 99-112.
  17. Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B., Dikareva N., Dikarev V. Genotoxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of Allium-test // Chemosphere. 2011. Vol. 83. P. 1133-1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>
  18. Kim J.H., Chung B.Y., Kim J.S., Wi S.G. Effects of in planta gamma-irradiation on growth, photosynthesis, and antioxidative capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.) plants // J. Plant Biol. 2005. V. 48. № 1. P. 47-56. <https://doi.org/10.1007/BF03030564>
  19. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A. et al. The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident // Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 1998. № 415. P. 47-57. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(98\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(98)00053-9)
  20. Leme D.M., Marin-Morales M.A. Chromosome aberration and micronucleus frequencies in *Allium cepa* cells exposed to petroleum polluted water – A case study // Mutation Research. 2008. V. 650. P. 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.10.006>
  21. Leme D.M., Marin-Morales M.A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application // Mutation Research/Reviews in Mutation Research. 2009. V. 682. №1. P. 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>
  22. Melki M., Marouani A. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat // Environ. Chem. Lett. 2010. V. 8. P. 307-310. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0222-1>
  23. Sediment-water chironomid toxicity test using spiked water. Test Guideline No. 219. Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. 2004. OECD Publishing, Paris.
  24. Shi J.M., Guo J.G., Li W.J. et al. Cytogenetic effects of low doses of energetic carbon ions on rice after exposures of dry seeds, wet seeds and seedlings // J. Radiat. Res. 2010. № 51. P. 235-242. <https://doi.org/10.1269/jrr.09085>
  25. Tkalec M., Malari K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. //

- Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis. 2009. V. 672. P. 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>.
26. Zotina T.A., Trofimova E.A., Medvedeva M.Yu., Dementyev D.V., Bolsunovsky A.Ya. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments // Environmental Toxicology and Chemistry. 2015. Vol. 34, No. 10, P. 2310–2321. <https://doi.org/10.1002/etc.3057>
27. Vaijapurkar S.G., Agarwal D., Chaudhuri S.K., Senwar K.R., Bhatnagar P.K. Gamma-irradiated onions as a biological indicator of radiation dose // Radiation Measurements. 2001. V. 33 (5), P. 833-836. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00246-3)
28. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U., Tertyschnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisey River // Journal of Environmental Radioactivity. 1995. Vol. 29, P. 225-236. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00033-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00033-7)

### References

1. Bolsunovsky A.Ya, Ermakov A.I., Myasoedov B.F., Novikov A.P., Sobolev A.I. New data on the content of transuranic elements in bottom sediments of the Yenisei River. *Dokl. Earth Sci.*, 2002, vol. 387 (8), pp. 971-974.
2. Bolsunovsky A.Ya., Muratova E.N., Sukovaty A.G., Pimenov A.V., Sanzharaeva E.A., Zotina T.A., Sedel'nikova T.S., Kornilova M.G. Radioecological monitoring of the Yenisei River and cytogenetic characteristics of water plant *Elodea Canadensis*. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 2007, vol. 47, no. 1, pp. 63-73.
3. Bolsunovsky A.Ya, Trofimova E.A., Zueva A.V., Dementiev D.V. The first results of using the Allium test in estimating the chemical and radiation toxicity of bottom sediments in the Yenisei River. *Dokl. Biol. Sci.*, 2016, vol. 469, pp. 192-195.
4. Bolsunovsky A.Ya., Dementyev D.V., Vakhrushev V.I. Transport of artificial radionuclides over long distances downstream along the Yenisei River during the 1966 extreme flood event. *Doklady Earth Sciences*, 2021, vol. 498, part 2, pp. 514-518.
5. Geras'kin S.A., Churukin R.S., Kazakova E.A. Modification of barley development at early stages after exposure of seeds to  $\gamma$ -irradiation. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 2015, vol. 55(6), pp. 607-615.
6. Zotina T.A., Trofimova E.A., Alexandrova Yu.V., Anishchenko O.V. Assessment of the quality of bottom sediments in the middle reaches of the Yenisei River by

- Allium* test. *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, no. 3, pp. 265-274. <https://doi.org/10.1134/S1995425519030120>
7. Zueva A.V., Trofimova E.A., Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Ya. The effect of low-dose  $\gamma$ -radiation on cytogenetic endpoints of onion (*Allium cepa*) seedlings in experiments of various durations. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 2021, vol. 61(2), pp. 175-184.
  8. Medvedeva M. Yu., Bolsunovsky A. Ya., Zotina T. A. Cytogenetic abnormalities in aquatic plant *Elodea* in anthropogenic contamination zone of Yenisei River. *Contemp. Probl. Ecol.*, 2014, vol. 7, pp. 422-432. <https://doi.org/10.1134/S1995425514040088>
  9. Muratova E.N., Goryachkina O.V., Kornilova M.G., Pimenov A.V., Sedelnikova T.S., and Bolsunovsky A.Ya. Cytogenetic studies on submerged plants from the Yenisei River area in the zone of radioactive contamination. *Biology Bulletin*, 2014, vol. 41, pp. 461–467. <https://doi.org/10.1134/S1062359014050094>
  10. Sinovets S.Yu., Pyatkova S.V., Kozmin G.V. Experimental validation of the use of the *Allium*-test in radioecological monitoring. Jekspierimental'noe obosnovanie ispol'zovanija *Allium*-testa v radiojekologicheskom monitoring. *Izv. VUZov. Jadernaja jenergetika*, 2009, no. 1, pp. 32-38.
  11. Sukhorukov F.V., Degermendzhy A.G., Belolipetsky V.M., Bolsunovsky A.Y., Kovalev S.I., Kosolapova L.G., Melgunov M.S., Raputa V.F. *Zakonomernosti raspredeleniya i migratsii radionuklidov v doline reki Enisei* [Distribution and migration of radionuclides in the Yenisei River Valley]. SB RAS "Geo" Publ., Novosibirsk, 2004, 286 p.
  12. Trofimova E.A., Demytyev D.V., Bolsunovsky A.Ya. The effect of  $\gamma$ -rays on the development of plants from irradiated seeds and seedlings of *Allium cepa* L. *Radiatsionnaya biologiya. Radioekologiya* [Radiation biology. Radioecology], 2019, vol. 59, no. 3, pp. 293-299.
  13. Bolsunovsky, A. Artificial radionuclides in sediment of the Yenisei River. *Chem. Ecol.*, 2010, vol. 26 (6), pp. 401–409. <https://doi.org/10.1080/02757540.2010.504668>
  14. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E., Iniatkina E., Kladko Yu, Petrichenkov M. Chromosomal aberrations and micronuclei induced in onion (*Allium cepa*) by gamma-radiation. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2019, vol. 207, pp. 1–6. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.05.014>
  15. Bolsunovsky A., Demytyev D., Trofimova E. Biomonitoring of radioactive contamination of the Yenisei River using aquatic plants. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2020, vol. 211, 106100, pp. 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2019.106100>



16. Fiskeşjö G. The *Allium*-test as a standard in environmental monitoring. *Hereditas*, 1985, vol. 102, pp. 99-112.
17. Geras'kin S., Oudalova A., Michalik B., Dikareva N., Dikarev V. Genotoxicity assay of sediment and water samples from the Upper Silesia post-mining areas, Poland by means of *Allium*-test. *Chemosphere*, 2011, vol. 83, pp. 1133-1146. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2011.01.008>
18. Kim J.H., Chung B.Y., Kim J.S., Wi S.G. Effects of in planta gamma-irradiation on growth, photosynthesis, and antioxidative capacity of red pepper (*Capsicum annuum* L.) plants. *J. Plant Biol.*, 2005, vol. 48, no. 1, pp. 47-56. <https://doi.org/10.1007/BF03030564>
19. Kovalchuk O., Kovalchuk I., Arkhipov A. et al. The *Allium cepa* chromosome aberration test reliably measures genotoxicity of soils of inhabited areas in the Ukraine contaminated by the Chernobyl accident. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 1998, no. 415, pp. 47-57. [https://doi.org/10.1016/S1383-5718\(98\)00053-9](https://doi.org/10.1016/S1383-5718(98)00053-9)
20. Leme D.M., Marin-Morales M.A. Chromosome aberration and micronucleus frequencies in *Allium cepa* cells exposed to petroleum polluted water – A case study. *Mutation Research*, 2008, vol. 650, pp. 80-86. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2007.10.006>
21. Leme D.M., Marin-Morales M.A. *Allium cepa* test in environmental monitoring: a review on its application. *Mutation Research/Reviews in Mutation Research*, 2009, vol. 682, no. 1, pp. 71-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrrev.2009.06.002>
22. Melki M., Marouani A. Effects of gamma rays irradiation on seed germination and growth of hard wheat. *Environ. Chem. Lett.*, 2010, vol. 8, pp. 307-310. <https://doi.org/10.1007/s10311-009-0222-1>
23. Sediment-water chironomid toxicity test using spiked water. Test Guideline No. 219. Guidelines for the Testing of Chemicals, Section 2. 2004. OECD Publishing, Paris.
24. Shi J.M., Guo J.G., Li W.J. et al. Cytogenetic effects of low doses of energetic carbon ions on rice after exposures of dry seeds, wet seeds and seedlings. *J. Radiat. Res.*, 2010, no. 51, pp. 235-242. <https://doi.org/10.1269/jrr.09085>
25. Tkalec M., Malari K., Pavlica M. et al. Effects of radiofrequency electromagnetic fields on seed germination and root meristematic cells of *Allium cepa* L. *Mutation Research/Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 2009, vol. 672, pp. 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.mrgentox.2008.09.022>
26. Zotina T.A., Trofimova E.A., Medvedeva M.Yu., Dement'ev D.V., Bolsunovskiy A.Ya. Use of the aquatic plant *Elodea canadensis* to assess toxicity and genotoxicity of Yenisei River sediments. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2015, vol. 34, no. 10, pp. 2310-2321. <https://doi.org/10.1002/etc.3057>

27. Vajjapurkar S.G., Agarwal D., Chaudhuri S.K., Senwar K.R., Bhatnagar P.K. Gamma-irradiated onions as a biological indicator of radiation dose. *Radiation Measurements*, 2001, vol. 33 (5), pp. 833-836. [https://doi.org/10.1016/S1350-4487\(01\)00246-3](https://doi.org/10.1016/S1350-4487(01)00246-3)
28. Vakulovsky S.M., Kryshev I.I., Nikitin A.I., Savitsky Y.V., Malyshev S.U., Tertyschnik E.G. Radioactive contamination of the Yenisey River. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1995, vol. 29, pp. 225-236. [https://doi.org/10.1016/0265-931X\(95\)00033-7](https://doi.org/10.1016/0265-931X(95)00033-7)

### **ВКЛАД АВТОРОВ**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку статьи для публикации.

### **AUTHOR CONTRIBUTIONS**

The authors contributed equally to this article.

### **ДАнные ОБ АВТОРАХ**

**Болсуновский Александр Яковлевич**, д-р биол. наук, заведующий лабораторией радиэкологии  
*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН*  
*Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация*  
*radecology@gmail.com*

**Трофимова Елена Александровна**, м.н.с. лаборатории радиэкологии  
*Институт биофизики Сибирского отделения Российской академии наук – обособленное подразделение ФИЦ КНЦ СО РАН*  
*Академгородок, 50-50, г. Красноярск, 660036, Российская Федерация*  
*e.trofimova11@yandex.ru*

### **DATA ABOUT THE AUTHORS**

**Alexander Ya. Bolsunovsky**, Dr. Sc. (Biology), Head of Radioecology Laboratory  
*Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*  
*50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation*  
*radecology@gmail.com*  
*SPIN-code: 1611-7686*

*Researcher ID: P-8028-2015*

*Scopus Author ID: 6602465853*

**Elena A. Trofimova**, Junior Researcher, Radioecology Laboratory  
*Institute of Biophysics FRC KSC SB RAS, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences*  
*50-50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation*  
*e.trofimova11@yandex.ru*  
*SPIN-code: 7291-7039*  
*ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7511-4916>*  
*Scopus Author ID: 42662341100*

Поступила 14.06.2023

После рецензирования 01.07.2023

Принята 05.07.2023

Received 14.06.2023

Revised 01.07.2023

Accepted 05.07.2023