

Полученные данные доказывают возможность, по крайней мере, кратковременного использования ФИБАН А-1 в более жестких по кислотности условиях и ранее рекомендуемый диапазон использования – pH 0 - 14 [1] – может быть расширен до pH (-1) – 14.

ЛИТЕРАТУРА

1. Поликарпов, А. П. Волокнистые иониты ФИБАН – получение, модификация и применение / А. П. Поликарпов, А. А. Шункевич, В. И. Грачек, Г. В. Медяк // Рос. хим. ж. 2015, т. LIX, № 3, С.102–111.
2. Руководство по мониторингу при ядерных или радиационных авариях МАГАТЭ, Вена IAEA-TECDOC-1092/R IAEA, 2002. -287 с. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1092R_prn.pdf – Дата доступа: 16.02.2023.
3. Holm, E. Source Preparations for Alpha and Beta Measurements Riso National Laboratory, Denmark, and Lund University, Sweden. 2001 [Electronic resource] – Mode of access: <https://www.nks.org/scripts/getdocument.php?file=11101011119723> – Date of access: 21.02.2023.
4. Rare earth fluoride microprecipitation (source preparation) [Electronic resource] Eichrom. Method No: SPA01 Analytical Procedure Revision: 1.2 May 1, 2014. – Mode of access: <https://www.eichrom.com/eichrom/methods/eichrom-methods/> – Date of access: 21.02.2023.
5. Talvitie, N. A. Electrodeposition of actinides for alpha spectrometric determination / N. A. Talvitie // Analytical Chemistry. – 1972. Vol. 4, No 2. P. 280–283.

РАЗДЕЛЬНОЕ И КОМБИНИРОВАННОЕ ДЕЙСТВИЕ ИОНОВ МОЛИБДЕНА В РАЗЛИЧНЫХ КОНЦЕНТРАЦИЯХ И γ -ОБЛУЧЕНИЯ НА ПРОРОСТКИ ЯЧМЕНЯ ЯРОВОГО СОРТА РАТНИК SEPARATE AND COMBINED EFFECT OF MOLYBDENUM IONS IN VARIOUS CONCENTRATIONS AND γ -IRRADIATION ON BARLEY SEEDLINGS OF THE SPRING RATNIK VARIETY

А. Д. Соколова¹, Н. В. Амосова¹

A. D. Sokolova¹, N. V. Amosova¹

¹Обнинский институт атомной энергетики – филиал Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ»

г. Обнинск, Российская Федерация
anastasia_sokolovaa@mail.ru

¹Obninsk Institute of Nuclear Power Engineering –
branch of the National Research Nuclear University “MEPhI”
Obninsk, Russian Federation
anastasia_sokolovaa@mail.ru

Проведен анализ цитогенетических показателей в корневой меристеме ячменя ярового (*Hordeum Vulgare* L.) сорта Ратник при раздельном и комбинированном действии ионов молибдена в различных концентрациях и γ -облучения в дозах 20 и 100 Гр. Выявлено, что в концентрациях 0,125 мг/л, 0,25 мг/л ионы молибдена увеличивают митотический индекс и уменьшают количество аберрантных клеток, в концентрациях 1,25 мг/л и 2,5 мг/л наблюдается обратное действие. При совместном действии с γ -облучением в дозе 20 Гр наблюдается снижение негативного эффекта, вызванного действием ионов молибдена в концентрациях 1,25 мг/л и 2,5 мг/л. При совместном действии ионов молибдена в концентрациях 0,125 мг/л, 0,25 мг/л и γ -облучения в дозе 100 Гр негативный эффект последнего, снижается.

The analysis of cytogenetic parameters in the root meristem of spring barley (*Hordeum Vulgare* L.) of the Ratnik variety was carried out under the separate and combined action of molybdenum ions in various concentrations and γ -irradiation at doses of 20 and 100 Gy. It was found that at concentrations of 0.125 mg/l, 0.25 mg/l, molybdenum ions increase the mitotic index and reduce the number of aberrant cells, at concentrations of 1.25 mg/l and 2.5 mg/l, the opposite effect is observed. When combined with γ -irradiation at a dose of 20 Gy, a decrease in the negative effect caused by the action of molybdenum ions at concentrations of 1.25 mg/l and 2.5 mg/l is observed. With the combined action of molybdenum ions at concentrations of 0.125 mg/l, 0.25 mg/l and γ -irradiation at a dose of 100 Gy, the negative effect of the latter decreases.

Ключевые слова: ячмень обыкновенный, митотический индекс, предпосевное облучение, молибден.

Keywords: common barley, mitotic index, pre-sowing irradiation, molybdenum.

<https://doi.org/10.46646/SAKH-2023-1-136-139>

В настоящее время существует большая антропогенная нагрузка со стороны промышленных предприятий, которая оказывает негативное воздействие на экосистемы. Одним из преобладающих загрязнителей почвы являются тяжелые металлы, они могут вызывать целый ряд причин негативного влияния на развития растений. Поэтому очень важно осуществлять контроль за их содержанием, как в окружающей среде, так и на производстве, особенно тех, деятельность которых сосредоточена на продуктах питания на растительной основе [1].

Одним из таких веществ является молибден. Из-за его свойств, таких как высокая пластичность, тугоплавкость и сравнительно низкая плотность его используют во многих отраслях промышленности. В связи с востребованностью на производствах, он все чаще попадает в агроэкосистемы. Основная токсичность молибдена связана с его способностью связываться с сульфгидрильными группами белков, в следствие чего происходит ингибирование ферментов и ухудшается проницаемость клеточных мембран. В ряде случаев может наблюдаться стимулирующее действие от малых токсичных доз. Это связано с тем, что в малых дозах молибден необходим живым организмам [2].

Облучение оказывает двойное действие на сельскохозяйственные растения. В области малых доз возможны эффекты гормезиса, феномен гиперрадиочувствительности или адаптивный ответ. В то время как повышение радиационного фона, растущие дозовые нагрузки замедляют процессы роста и развития, тормозят клеточные деления [3].

Материалы и методы. Объект исследования. В качестве объекта исследования выбран ячмень яровой (*Hordeum Vulgare* L.), который является важной сельскохозяйственной культурой, выращиваемой во всем мире с древнейших времен. Ячмень неприхотлив и способен к прорастанию в лабораторных условиях в любое время года. Оптимальными условиями будет влажность среды – 48–65 % от массы сухих семян, а температура 18–25 °С. Ячмень является одним из основных генетически хорошо изученных объектов, который используется в разных исследованиях. В работе использовали семена сорта Ратник.

Облучение семян. Предпосевное облучение семян в дозах 20 и 100 Гр при мощности 58,6 Гр/ч было произведено на базе Федерального государственного бюджетного научного учреждения «Всероссийский научно исследовательский институт радиологии и агроэкологии» (ФГБНУ ВНИИРАЭ) на установке «ГУР-120». Источник излучения – ^{60}Co .

Семена облучали в бумажных конвертах, площадь поверхности которых была равна 25 см². В каждом конверте содержалось по 20 штук, что давало гарантию равномерности распределения дозы. Для достоверности производилось по три повторности на дозы 20 и 100 Гр. Контролем служили необлученные семена.

Приготовление растворов и проращивание семян. Для оценки действия ионов молибдена, а также комбинированного действия ионов молибдена и γ -облучения были приготовлены растворы молибдата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$. Растворы для проращивания семян содержали ионы Мо в концентрациях 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 1,25 мг/л и 2,5 мг/л, что соответствует 0,5 ПДК, 1 ПДК, 5 ПДК и 10 ПДК соответственно. Повторность опыта – трехкратная. Раствор молибдата аммония готовили в концентрации 2,5 мг/л, что соответствует 10 ПДК по Мо. Затем методом последовательных разведений изготовили растворы в концентрациях 0,125 мг/л, 0,25 мг/л и 1,25 мг/л, что соответствует 0,5 ПДК, 1 ПДК и 5 ПДК соответственно. Семена проращивали в рулонах фильтровальной бумаги и полиэтиленовой пленки согласно ГОСТ 12038-84. Проращивание осуществляли в термостате при температурном режиме 24°C на протяжении 3 суток.

Оценка митотического индекса и частоты абберрантных клеток. Митотический индекс и частоту абберрантных клеток оценивали на третий день прорастания. Для корректного сопоставления показателей выбирали опытные и контрольные образцы с одинаковой длиной корней, ввиду того, что число делящихся клеток в меристеме зависит не только от времени, но и от длины корней. Затем срезали корешки наиболее часто встречаемой в контроле длины – 0,9–1,3 см. Проводили фиксацию с помощью ацетоуксусного алкоголя (3 части ледяной уксусной кислоты и 1 часть этанола) и хранили в холодильнике. Просматривали давленные препараты, окрашенные ацетокармином, с помощью микроскопа Микромед 1 (2-20 inf.) (при увеличении 1000). После чего определяли показатели митотического индекса. Количественный учет перестроек хромосом проводим по общепринятой методике. В каждом препарате анализировали все ана-телофазные клетки и учитывали долю клеток с абберациями хромосом.

Статистическая обработка. Статистическую обработку проводили стандартными методами математической статистики, в ходе которых находили стандартную ошибку и оценивали значимость различий выборок на основе непараметрического расширения критерия U-Манни – Уитни, при уровне значимости $p < 0,05$. Все расчетные данные получены благодаря компьютерному пакету программ Microsoft Office Excel 2013.

Результаты. При раздельном и комбинированном действии ионов молибдена и γ -облучения в дозе 20 Гр на проростки ячменя сорта Ратник мы получили следующие результаты митотического индекса, представленные в таблице 1.

Таблица 1

Митотический индекс корневой меристемы проростков ячменя при раздельном и комбинированном действии водного раствора молибдата аммония $(\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4$, в концентрациях равных, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 1,25 мг/л, 2,5 мг/л и γ -облучении в дозе 20 Гр

Контроль	20 Гр	0,125 мг/л	20 Гр + 0,125 мг/л	0,25 мг/л	20 Гр + 0,25 мг/л	1,25 мг/л	20 Гр + 1,25 мг/л	2,5 мг/л	20 Гр + 2,5 мг/л
8,34±0,23	12,68±0,19*	11,07±0,32*	13,43±0,11* ^Δ	10,13±0,35*	10,59±0,16* ^Δ	7,17±0,38*	9,40±0,22* ^Δ	3,78±0,20*	5,56±0,17* ^Δ

* – различия с контролем значимы при $p < 0,05$

Δ – различия с 20 Гр значимы при $p < 0,05$

При концентрации ионов молибдена равной 0,125 мг/л, что соответствует 0,5 ПДК, а также при концентрации 0,25 мг/л, что соответствует 1 ПДК, происходит повышение митотического индекса по сравнению с контролем на 32,73% и 21,46% соответственно, что говорит о стимулирующем действии низких концентрация на деление клеток корневой меристемы проростков ячменя сорта Ратник. Вероятнее всего это связано с тем, что молибден относится к микроэлементам и необходим в малых дозах, он принимает участие в биосинтезе нуклеиновых кислот и белка, в процессах восстановления нитритов и нитратов до аммиака. Косвенно участвует в процессах дыхания и фотосинтеза, образования хлорофилла, а также в обмене фосфорных соединений и углеводов, повышает содержание витамином.

При концентрации ионов молибдена равной 1,25 мг/л, что соответствует 5 ПДК, а также при концентрации 2,5 мг/л, что соответствует 10 ПДК, происходит снижение митотического индекса по сравнению с контролем на 14,03 % и 54,68 % соответственно, что говорит об ингибирующем рост действии высоких концентраций. Токсичность молибдена вызвана с его способностью связываться с сульфгидрильными группами белков, в следствие чего происходит ингибирование ферментов и ухудшается проницаемость клеточных мембран.

При γ -облучения в дозе 20 Гр и мощности 58,6 Гр/ч мы наблюдаем повышение митотического индекса по сравнению с контролем на 52%. Что может свидетельствовать об эффекте гормезиса, характерного для диапазона доз от 10 до 20 Гр.

При комбинированном действии γ -облучения в дозе 20 Гр и ионов молибдена в концентрации равной 0,125 мг/л, что соответствует 0,5 ПДК, происходит повышение митотического индекса на 5,9% и 21,3% по сравнению с раздельным действием γ -облучения в дозе 20 Гр и ионов молибдена в концентрации 0,125 мг/л соответственно. При комбинированном действии γ -облучения в дозе 20 Гр и ионов молибдена в концентрации равной 0,25 мг/л, что соответствует 1 ПДК, происходит незначительное повышение митотического индекса.

При совместном действии γ -облучения в дозе 20 Гр и ионов молибдена в концентрациях равных 1,25 мг/л, что соответствует 5 ПДК, а также при концентрации 2,5 мг/л, что соответствует 10 ПДК наблюдается снижение негативного эффекта молибдена на апекс побега, что может свидетельствовать об антагонистических отношениях данных стрессовых факторов.

При комбинированном действии ионов молибдена и γ -облучения в дозе 100 Гр на проростки ячменя сорта Ратник мы получили следующие показатели митотического индекса, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Митотический индекс корневой меристемы проростков ячменя при раздельном и комбинированном действии γ -облучения в дозе 100 Гр и водного раствора молибдата аммония $((\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4)$, в концентрациях равных, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 1,25 мг/л, 2,5 мг/л

Контроль	100 Гр	0,125 мг/л	100 Гр + 0,125 мг/л	0,25 мг/л	100 Гр + 0,25 мг/л	1,25 мг/л	100 Гр + 1,25 мг/л	2,5 мг/л	100 Гр + 2,5 мг/л
8,34±0,23	4,42±0,15*	11,07±0,32*	6,13±0,18* Δ	10,13±0,35*	5,30±0,13* Δ	7,17±0,38*	3,86±0,14*	3,78±0,20*	2,46±0,18* Δ

* – различия с контролем значимы при $p < 0,05$

Δ – различия с 100 Гр значимы при $p < 0,05$

При дозе в 100 Гр происходит значительное понижение митотического индекса на 47 % по сравнению с контролем и снижение на 65,14% по сравнению с облучением в дозе 20 Гр, это связано с тем, что высокие дозы замедляют процессы роста и развития, тормозят клеточное деление.

При комбинированном действии ионов молибдена в концентрациях 0,125 мг/л, 0,25 мг/л и γ -облучения в дозе 100 Гр негативный эффект последнего, снижается, митотический индекс увеличивается. При совместном действии γ -облучения в дозе 100 Гр и высоких концентраций ионов молибдена 1,25 мг/л, 2,5 мг/л негативный эффект усиливается и митотический индекс снижается, что говорит о синергизме данных стрессовых факторов.

Экспериментальные значения частоты аберрантных клеток при раздельном и комбинированном действии ионов молибдена и γ -облучения в дозе 20 Гр отражены в таблице 3.

Таблица 3

Частота аберрантных клеток в корневой меристеме проростков ячменя сорта Ратник (%) при раздельном и комбинированном действии водного раствора молибдата аммония $((\text{NH}_4)_2\text{MoO}_4)$, в концентрациях равных, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 1,25 мг/л, 2,5 мг/л и γ -облучении в дозе 20 Гр

Контроль	20 Гр	0,125 мг/л	20 Гр + 0,125 мг/л	0,25 мг/л	20 Гр + 0,25 мг/л	1,25 мг/л	20 Гр + 1,25 мг/л	2,5 мг/л	20 Гр + 2,5 мг/л
0,62±0,07	2,10±0,03*	0,61±0,08	1,39±0,11* Δ	0,65±0,07	1,9±0,10*	2,16±0,14*	2,09±0,04*	4,31±0,12	3,73±0,006 Δ

* – различия с контролем значимы при $p < 0,05$

Δ – различия с 20 Гр значимы при $p < 0,05$

При концентрации ионов Мо равной 0,125 мг/л, что соответствует 0,5 ПДК, а также при концентрации 0,25 мг/л, что соответствует 1 ПДК, изменения в частоте аберрантных клеток по сравнению с контролем не выявлены. При концентрации ионов Мо равной 1,25 мг/л, что соответствует 5 ПДК, происходит повышение частоты аберрантных клеток в 3,48 раза по сравнению с контролем, а также при концентрации 2,5 мг/л, что соответствует 10 ПДК, происходит повышение частоты аберрантных клеток в 6,95 раз по сравнению с контролем. При γ -облучения в дозе 20 Гр и мощности 58,6 Гр/ч мы наблюдаем увеличение частоты аберрантных клеток в 3,39 раза по сравнению с контролем.

При комбинированном действии ионов молибдена и γ -облучения в дозе 20 Гр мы наблюдаем снижение частоты аберрантных клеток по сравнению с отдельным действием, вызванное в первых двух случаях (20 Гр + 0,125 мг/л; 20 Гр + 0,25 мг/л) ионами молибдена, в последних двух γ -облучением и эффектом гормезиса.

Экспериментальные значения частоты аберрантных клеток при отдельном и комбинированном действии ионов молибдена и γ -облучения в дозе 100 Гр отражены в таблице 4.

При γ -облучения в дозе 100 Гр и мощности 58,6 Гр/ч мы наблюдаем увеличение частоты аберрантных клеток в 13,69 раза по сравнению с контролем.

При совместном действии ионов молибдена в концентрациях 0,125 мг/л и 0,25 мг/л и γ -облучения в дозе 100 Гр негативный эффект последнего снижается; при концентрациях 1,25 мг/л и 2,5 мг/л негативный эффект усиливается.

Таблица 4

Частота аберрантных клеток в корневой меристеме проростков ячменя при отдельном и комбинированном действии γ -облучения в дозе 100 Гр и водного раствора молибдата аммония $((NH_4)_2MoO_4)$, в концентрациях равных, 0,125 мг/л, 0,25 мг/л, 1,25 мг/л, 2,5 мг/л

Контроль	100 Гр	0,125 мг/л	100 Гр + 0,125 мг/л	0,25 мг/л	100 Гр + 0,25 мг/л	1,25 мг/л	100 Гр + 1,25 мг/л	2,5 мг/л	100 Гр + 2,5 мг/л
0,62±0,07	8,49±0,17	0,61±0,08	5,05±0,10 ^Δ	0,65±0,07	6,92±0,12 ^Δ	2,16±0,14*	9,74±0,26 ^Δ	4,31±0,12	11,81±0,20

* – различия с контролем значимы при $p < 0,05$

Δ – различия с 100 Гр значимы при $p < 0,05$

Высокие концентрации ионов молибдена оказывают негативное действие приводят к значительному уменьшению митотического индекса, а также повышению частоты аберрантных клеток. Что говорит об их токсическом действии. Схожее действие оказывает γ -облучение в дозе 100 гр. Низкие концентрации ионов молибдена (0,125 мг/л, 0,25 мг/л), напротив, оказывают стимулирующие действие, повышают митотический индекс и уменьшают частоту аберрантных клеток. Вероятнее всего это связано с тем, что Мо относится к микроэлементам и в небольших количествах необходим растениям для их существования. При γ -облучении в дозе 20 Гр наблюдается эффект гормезиса. Совместное действие γ -облучения в дозе 20 Гр и ионов молибдена в концентрациях 1,25 мг/л и 2,5 мг/л снижает негативный эффект последних. А комбинированное действие ионов молибдена в концентрациях 0,125 мг/л и 0,25 мг/л и γ -облучения в дозе 100 Гр снижает негативный эффект от облучения. Полученные результаты свидетельствуют о механизмах формирования эффектов антагонизма: в случае с ионами молибдена, вероятно, активируются защитные системы, в ответе которых ведущая роль принадлежит активным формам кислорода, киназным каскадам и транскрипционным факторам, тогда как радиационный гормезис нивелирует неблагоприятные воздействия через стимулирование ростовых характеристик.

ЛИТЕРАТУРА

1. Злобина Н.Ю., Коношина С.Н. Антропогенное загрязнение биосферы тяжелыми металлами и способы его предотвращения // Сетевой научный журнал. ОрелГАУ. 2015. № 1(4). С. 69-72.
2. Изменение биологической активности дерново-карбонатных почв Западного Кавказа при загрязнении цинком, кадмием, молибденом и селеном // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета / Д.Р. Татлок [и др.] – 2015. – №. 106. – С. 746-757.
3. Гераськин, С.А. Модификация развития ячменя на ранних этапах онтогенеза при воздействии γ -излучения на семена / С.А. Гераськин, Р.С. Чурюкин, Е.А. Казакова // Радиационная биология. Радиоэкология. – 2015. – Т. 55. – № 6. – С. 607.