

P18-2023-47

А. Д. Шабалин \*

ВЛИЯНИЕ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ  
НА МОРФОЛОГИЮ ВАЙ НЕКОТОРЫХ  
ВИДОВ ПАПОРОТНИКОВ

---

\* E-mail: [anaruapple4@gmail.com](mailto:anaruapple4@gmail.com)

Шабалин А. Д.

P18-2023-47

Влияние ионизирующего излучения на морфологию вай некоторых видов папоротников

Настоящее исследование направлено на обнаружение и наблюдение за происходящими мутационными морфологическими изменениями четырех видов птеридофлоры (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris dilatata*, *Gymnocarpium dryopteris* и *Phegopteris connectilis*) городского округа Дубна в естественной лесной среде произрастания в ходе проведения эксперимента по облучению этих растений гамма-лучами на 3-м канале реактора ИБР-2М Лаборатории нейтронной физики Объединенного института ядерных исследований. В ходе исследования были получены фотографии морфологических изменений в строении вай относительно контрольных образцов, не подверженных облучению, и сделаны выводы о влиянии гамма-облучения на птеридофлору городского округа Дубна.

Работа выполнена в Лаборатории нейтронной физики им. И. М. Франка ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2023

Shabalin A. D.

P18-2023-47

Influence of Ionizing Radiation on Frond Morphology of Some Fern Species

The present study is aimed at detecting and monitoring the ongoing mutational morphological changes of four species of pteridoflora (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris dilatata*, *Gymnocarpium dryopteris* and *Phegopteris connectilis*) of the Dubna urban district in a natural forest growing environment during an experiment on irradiating these plants with gamma rays on the 3rd channel of the IBR-2M reactor of the Laboratory of Neutron Physics of the Joint Institute for Nuclear Research. In the course of the study, photographs of morphological changes in the structure of fronds were obtained relative to control samples that were not subject to irradiation, and conclusions were drawn regarding the effect of gamma irradiation on the pteridoflora of the urban district of Dubna.

The investigation has been performed at the Frank Laboratory of Neutron Physics, JINR.

Communication of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2023

## ВВЕДЕНИЕ

В отечественной и зарубежной литературе в настоящее время имеется мало сведений о влиянии ионизирующего излучения на морфогенез птеридофлоры. В лесах городского округа Дубна произрастают несколько представителей птеридофлоры отдела *Polypodiophyta*, или папоротниковидных. После многолетних наблюдений за морфогенезом папоротников в исследуемом лесном массиве автором было принято решение о проведении исследования изменений морфогенеза в результате воздействия гамма-облучения на облучательном канале № 3 реактора ИБР-2М.

Главной особенностью данного исследования является то, что изучение мутационного морфогенеза и идентификация особых морфологических изменений птеридофлоры происходит в естественной среде произрастания исследуемых видов. Из-за такой специфичности настоящего исследования облучение гамма-лучами является наиболее подходящим, поскольку, как известно, при облучении нейтронами дальнейшая работа с образцами и любой близкий контакт с ними являются затруднительными.

## 1. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Методика данного исследования не имеет аналогов: как правило, при наблюдении за морфогенезом после облучения в отечественных и зарубежных работах используется специальная инкубаторная среда жизнеобеспечения флоры. В настоящей работе используется исключительно экосистема леса городского округа Дубна. Поэтому одной из главных задач автора стало обеспечить не только максимально плавное перемещение образцов птеридофлоры видов *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris dilatata*, *Gymnocarpium dryopteris* и *Phegopteris connectilis* из естественной среды произрастания к месту облучения и обратно в родную лесную экосистему с минимально возможными последствиями для папоротников, но и максимально благоприятную окружающую среду на время проведения эксперимента, в том числе поддержание жизни образцов в периоды засухи из-за нестабильно жарких погодных условий путем орошения водой допустимого качества и природного происхождения в соответствии с нормой выпадения осадков, что обеспечивает наименьшую погрешность результатов исследования.

В ходе подобного рода исследований, как правило, используется специальная среда для поддержания окружающей среды для образцов в послеэкспериментальный период, более того, обычно подобные эксперименты начинаются с облучения свежих спор, заранее собранных исследовате-

лем [1, 2]. В настоящем же исследовании применяется несколько другой подход в порядке облучения и получения конечных результатов исследования в виде морфологических изменений и методе их фиксации. Морфогенез было решено изучать на молодых растениях, которые самостоятельно прошли стадию гаметофита в лесной среде без вмешательства исследователя. Данные растения были тщательно подобраны исследователем по чертам, выявленным при осмотре каждого растения индивидуально. При осмотре и отборе исследователь обращал внимание на следующие главные черты (а также другие, менее значительные):

1) отсутствие болезней бактериального, вирусного и грибкового характера, а также отсутствие любых представителей вредоносной микрофауны, в том числе в стадии яйца, личинки или имаго;

2) схожий состав грунта, в котором произрастает конкретный объект птеридофлоры. Состав грунта на всем лесном участке отбора образцов довольно сильно разнится, что может не только влиять на скорость развития растения, но и полностью изменять визуальные черты вай и многими другими способами влиять на развитие растения, поэтому разный состав грунта у разных образцов является неприемлемым при таком виде исследования, так как может вызвать беспрецедентную погрешность в результатах;

3) примерно одинаковый возраст отбираемых растений;

4) отсутствие пагубно влияющих на развитие растения, с момента его нахождения в стадии гаметофита, факторов в зоне его непосредственной дислокации во время его обнаружения, поскольку это может вызвать необратимые изменения при его перемещении с изначального места произрастания;

5) общее положительное состояние растения, отсутствие видимых признаков повреждения и контакта с крупной фауной.

Непосредственный источник гамма-излучения в данном исследовании — активированная в процессе работы реактора стальная оболочка биологической защиты реактора. Малая скорость спадания радиоактивности со временем указывает на то, что основным источником гамма-лучей является  $\beta$ -распад  $\text{Co-60}$  с периодом полураспада 5 лет [3]. Наличие кобальта в нержавеющей стали, как известно, пропорционально содержанию никеля. А в нержавеющей стали марки X18N9T содержание никеля 9%, а кобальта — примерно 0,1%.  $\text{Co-60}$  образуется в результате захвата нейтрона единственным изотопом  $\text{Co-59}$ . Энергия гамма-квантов — до 6 МэВ, средняя — 2,5 МэВ.

Для выполнения исследования по облучению папоротников была специально сконструирована и изготовлена платформа для установления в ней горшков с растениями, которая с помощью трубочин крепилась к транспортному двутавру облучательной установки. Образцы птеридофлоры были накрыты пластиковым куполом (прикрепляющимся винтами к платформе сверху), чтобы защитить растения от вентиляционного потока воздуха и сохранить необходимую для непрерывного жизнеобеспечения образцов влажность воздуха.

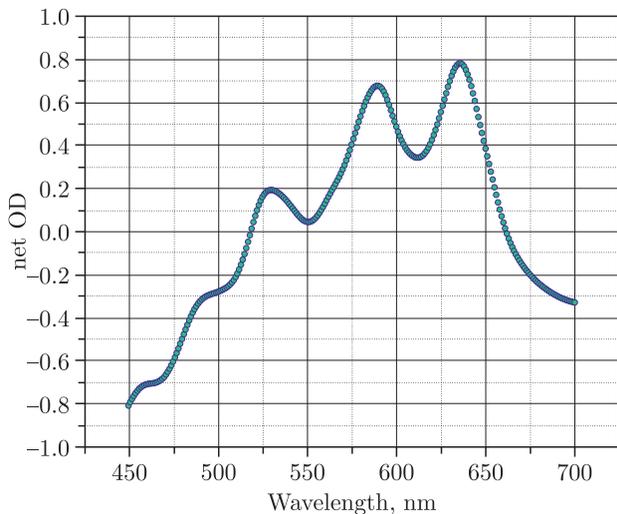


Рис. 1. Изменение оптической плотности облученной до 16–19 Гр пленки ЕВТ-3 как функция длины волны источника света

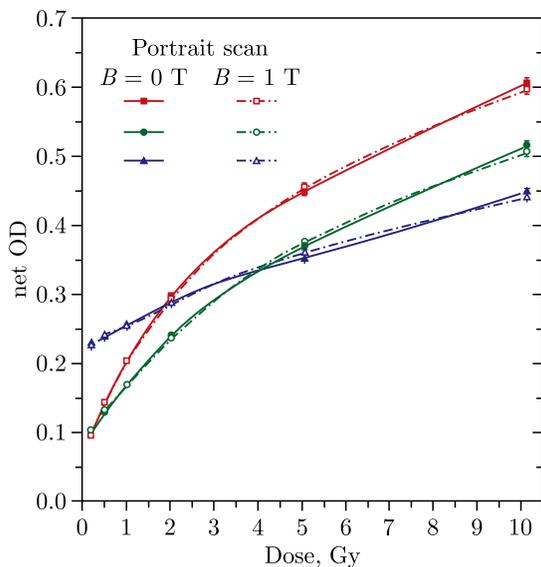


Рис. 2. Калибровочные кривые для радиочувствительных пленок типа ЕВТ-3 [4]

В периоды облучения поглощенная доза измерялась с помощью широко применяемых радиационно чувствительных пленок ЕВТ-3 [4]. На рис. 1 отображено изменение оптической плотности пленки ЕВТ-3, облученной

до дозы 16–19 Гр (доза определялась по значению оптической плотности при длине волны 640 нм). При дозах менее 30 Гр поглощенная доза определялась по значению net OD при длине волны 640 нм с использованием калибровочной кривой; дозы более 30 Гр оценивались по времени облучения. На рис. 2 также приведены калибровочные кривые для портретной ориентации пленки.

Для достижения большей точности измерений заводской лист пленки ЕВТ-3 был нарезан на квадраты размером 1,5 × 1,5 см (поскольку такой размер соответствует допустимым характеристикам спектрометра Spexord 250 plus, который в дальнейшем использовался для анализа облученных пленок). После чего квадратные части нарезанной пленки были прикреплены к изготовленной конструкции для облучения образцов в позициях на куполе, закрывающем растения, перед бортом горшка, смотрящего в сторону активной зоны, а также за ним. Это обеспечило получение наиболее достоверной информации о том, какую дозу гамма-излучения получила точка роста конкретного растения без вмешательства в земляной ком, корневую систему, во избежание травмирования самой точки роста папоротника.

При подборе образцов птеридофлоры было принято решение использовать 4 вида произрастающих в выбранном участке леса при городском округе Дубна. Этими видами стали *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris dilatata* с точкой роста куртинного типа и *Gymnocarpium dryopteris*, *Phegopteris connectilis* ризомного типа. При подборе образцов ризомных типов был проведен тщательный поиск участка ризомы в надлежащем состоянии и с точкой роста путем осмотра площади роста каждого спорофита и выявления точной области нахождения точки роста его ризомы. Образцы при отборе были помещены в горшки из пластика с дренажным отверстием заранее установленного размера для удачного применения с облучательной установкой и сконструированной платформой для облучения (рис. 3, 4).

Количество облучаемых растений составило 42 образца 4 видов. Необходимая мощность дозы была определена в ходе подготовительных мероприятий и при изучении существующей литературы по облучению гамма-излучением других видов высших растений. Образцы птеридофлоры были облучены на протяжении четырех временных промежутков: 15 мин, 30 мин, 1 ч, 2 ч, с получением дозы от меньшей к большей соответственно. Расстояние от края двутавра облучательной установки до криогенного замедлителя при этом составило 610 мм, а от края купола — 310 мм.

Дозы, полученные образцами, составили следующие значения в четырех диапазонах: 2–4, 9–6, 16–19, 30–40 Гр. Погрешности определения доз облучения оцениваются в ± 10%.

Облучение образцов осуществлялось сеансами по несколько загрузок образцов на необходимое для получения нужной дозы время. Эксперимент по облучению папоротников можно условно разделить на четыре этапа для каждой партии образцов:

1) поиск и изъятие подходящих по описанным критериям папоротников из естественной среды произрастания с земляным комом, соразмерным

пластиковому горшку, для установки в конструкцию для облучения, с помещением этого земляного кома в горшок без нарушения его природной структуры;

2) транспортировка отобранной партии образцов из естественной среды произрастания в экспериментальный зал реактора ИБР-2М с учетом необходимости обеспечения благоприятных для папоротников окружающих условий;

3) облучение образцов в течение необходимых временных интервалов для получения конкретных доз гамма-излучения;

4) транспортировка облученных образцов обратно в родную лесную экосистему на заранее выбранную площадку для дальнейших наблюдений за морфологическими изменениями в строении папоротников.

Главной задачей на первом этапе эксперимента, как и на четвертом, было минимизировать воздействие неблагоприятных факторов при транспортировке папоротников посредством поддержания влажности и чистоты воздуха (для обеспечения наименьшего воздействия потоков воздуха с загрязняющими веществами различного характера) в специально подобранном контейнере, а также минимизировать механические воздействия на органы растений путем прокладывания прожегунков между горшками специальным уплотнителем. Необходимо также отметить, что особое



Рис. 3. Двухтар установка для облучения образцов с предустановленной конструкцией для исследуемой птеридофлоры с облучаемым видом *Dryopteris dilatata*



Рис. 4. Установка для облучения образцов с предустановленной конструкцией для исследуемой птеридофлоры перед началом облучения

внимание уделялось отбору образцов на этапе их поиска: изначально имеющиеся патологии в развитии у растений могут стать причиной неудачного эксперимента уже на данном, раннем этапе, поскольку внесут сильную погрешность в результатах всего исследования в целом. Также надо сказать о необходимости максимально аккуратного изъятия земляного кома образца; этот этап являлся самым важным при отборе, поскольку малейшие движения могли бы нарушить нежную корневую систему папоротника и



Рис. 5. Виды *Athyrium filix-femina* (вверху) и *Gymnocarpium dryopteris* (внизу) в горшках в стадии изъятия из природной среды и подготовки к облучению

природную структуру субстрата. Земляной ком с исследуемым растением изымался из естественной среды произрастания только после тщательного осмотра и учета в дальнейшей работе индивидуальных особенностей и состояния конкретного образца (рис. 5).

После транспортировки из лесной экосистемы в экспериментальный зал реактора ИБР-2М основной проблемой являлось предотвратить воздействие вентиляционного потока воздуха, который имеется в туннеле облучательной установки третьего канала реактора. Эта проблема была решена путем включения в конструкцию пластикового купола, который закрывает папоротники от губительно сильного потока воздуха на время облучения.

Образцы подвергались облучению в группах по два растения двух видов. Горшки с растениями, находящиеся в группе, ближайшей к активной зоне, как было ранее установлено с помощью радиочувствительных пленок ЕВТ-3, получают дозу, примерно в два раза превосходящую дозу группы, находящейся позади ближайшей. Для наибольшей достоверности информации о полученных образцами дозах в периоды непосредственного облучения папоротников были также заложены в горшки на те же позиции радиочувствительные пленки ЕВТ-3 для контрольной проверки результата их первого анализа.

## **2. МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ ИЗМЕНЕНИЯ В СТРОЕНИИ ПАПОРОТНИКОВ**

После окончания эксперимента по облучению образцы были направлены в той же емкости в исходную экосистему. В качестве площадки для наблюдения за морфогенезом птеридофлоры была выбрана местность с наименьшей антропогенной нагрузкой на территории лесного массива, поскольку в настоящем методе наблюдения одним из главных факторов, вызывающих ошибку в результатах, может являться человек. Малая антропогенная нагрузка в месте площадки была выявлена путем многократных наблюдений за передвижением людей по лесным тропам; из-за выбора местности, расположенной максимально равноудаленно от лесных троп в лесном массиве, антропогенная нагрузка относительно площадки для наблюдений снижается. Выбор места для создания площадки для наблюдений за образцами был также обусловлен окружающей средой, максимально соответствующей исходным условиям произрастания образцов.

Горшки с образцами были прикопаны в лесной грунт на площадке для наблюдения в определенном порядке, благоприятном для дальнейших фотофиксационных мероприятий.

С первого дня нахождения исследуемых образцов на площадке в лесном массиве велся полевой дневник выявления морфологических изменений для каждого из случаев проявления мутагенеза. Также на протяжении всего периода наблюдения за птеридофлорой велась фотофиксация каждого случая изменений в морфогенезе вай в динамике, начиная с первого его проявления.

***Athyrium filix-femina***. Первые результаты наблюдений проявились в середине июля, т.е. примерно спустя полтора месяца после облучения. Наиболее яркое проявление мутагенеза было получено на представителе семейства *Athyriaceae* — виде *Athyrium filix-femina* с дозой 40 Гр, замеченным проявлением изменения морфогенеза стала бифуркация вайи *A. filix-femina* выше середины рахиса (рис. 6, 7). Далее данное явление было зафиксировано в динамике на протяжении последующих 3 месяцев наблюдений (рис. 11). Четырьмя днями позднее было обнаружено морфологическое изменение несколько другого характера. Бифуркация начала проявляться не только в виде раздвоения рахиса в апикальной части вайи, но и у отдельных перьев на всем протяжении рахиса. Таким образом, на фотографиях (рис. 8, 9) у образца с полученной дозой 19 Гр можно видеть смещение исходного положения отдельных перьев, изменение их формы, смещение ближе относительно друг друга по одну сторону рахиса, а также направления роста, ниже середины рахиса присутствует бифуркация пера с недостатком перышек по левую часть пера ниже точки бифуркации. Все эти признаки свидетельствуют о сильном влиянии больших доз гамма-излучения на стадии зачатия клеточной структуры вай, поскольку явные признаки последствий мутагенеза начали проявляться спустя месяц после облучения образцов птеридофлоры, и таких явлений не было замечено ни в один год наблюдений до этого в используемом для эксперимента лесном массиве.

Мутационная бифуркация перьев также была отслежена в динамике с момента ее обнаружения (рис. 12). На образце №7 тоже была замечена мутационная бифуркация четырех перьев; на этом образце в двух из четырех случаев одно мутировавшее перо было примерно вдвое длиннее другого, что хорошо видно на рис. 10. *A. Filix-femina* был подвержен и другим мутациям; бифуркация рахиса проявилась и на других образцах в несколько других формах. В наиболее интересном случае это была бифуркация на уровне базального пера (рис. 15, 16), она больше походит на ветвление, чем на бифуркацию верхнего отдела рахиса, как это было с другими образцами. Такая мутация наблюдалась только у этого образца с дозой 19 Гр. Образец с дозой 16 Гр имеет недоразвитое перо, отчетливо видное на рис. 17. У образцов вида *Athyrium filix-femina* с дозами меньше 19 Гр наблюдались как схожие, так и другие слабо выраженные эффекты. К примеру, у образца с дозой 9 Гр была обнаружена бифуркация кончика вайи (рис. 18), а у некоторых образцов с дозами 4–9 Гр была выявлена некая равномерная обесцвеченность не хлорозной этиологии (рис. 19), которая в то же время не похожа на проявление серой гнили. Спорофит под номером 29 был охвачен обесцвечиванием практически полностью, за исключением одной самой старой вайи. Многообразие мутационных событий ставит однозначную задачу по наблюдению динамики мутационного морфогенеза образцов этого вида в следующий период вегетации после зимнего периода гибернации 2022–2023 гг. Пример фотографии здоровой вайи взрослого спорофита данного вида представлен на рис. 13.



Рис. 6. Первое проявление мутационной бифуркации вайи *Athyrium filix-femina* спорофита №2. Дата съемки — 14 июля 2022 г.



Рис. 7. Первое проявление мутационной бифуркации вайи *Athyrium filix-femina* спорифита №2. Дата съемки — 8 августа 2022 г.



Рис. 8. Бифуркация и мутационный сдвиг перьев на всем протяжении рахиса *Athyrium filix-femina*. Дата съемки — 14 июля 2022 г.



Рис. 9. Бифуркация и мутационный сдвиг перьев на всем протяжении рахиса *Athyrium filix-femina*. Дата съемки — 18 июля 2022 г.



Рис. 10. Бифуркация и мутационный сдвиг перьев на протяжении рахиса *Athyrium filix-femina*



Рис. 11а. Динамика развития первой вайи *Athyrium filix-femina* с мутационной бифуркацией рахиса. Дата съемки — 14 июля 2022 г.



Рис. 11б. Дата съемки — 18 июля 2022 г.



Рис. 11в. Дата съемки — 23 июля 2022 г.



Рис. 11г. Дата съемки — 29 июля 2022 г.



Рис. 11д. Дата съемки — 4 августа 2022 г.



Рис. 11е. Дата съемки — 8 августа 2022 г.



Рис. 11ж. Дата съемки — 18 сентября 2022 г.



Дата съёмки — 14 июля 2022 г.



Дата съёмки — 18 июля 2022 г.



Дата съёмки — 29 июля 2022 г.

Рис. 12. Развитие вайи вида *Athyrium filix-femina* с бифуркацией перьев и их мутационным сдвигом в динамике



Рис. 13. Нормально развитая вайя взрослого спорофита вида *Athyrium filix-femina*



Рис. 14. Проявление бифуркации вай *Athyrium filix-femina* различного характера на поздней осенней стадии развития



Рис. 15. Мутационная бифуркация вайи *Athyrium filix-femina* от черешка на ранней стадии развития



Рис. 16. Мутационная бифуркация вайи *Athyrium filix-femina* от черешка на поздней стадии развития



Рис. 17. Недоразвитое перо *Athyrium filix-femina* в молодом и взрослом состоянии



Рис. 18. Бифуркация кончика вайи *Athyrium filix-femina*



Рис. 19. Обесцвечивание вай *Athyrium filix-femina* неопределенной этиологии

***Dryopteris dilatata*.** Вид *Dryopteris dilatata* из семейства *Dryopteridaceae* рода *Dryopteris* является вторым по численности в исследуемом лесном массиве после *Athyrium filix-femina* и вторым представителем птеридофлоры куртинного типа из четырех исследуемых. В данном случае ситуация относительно его радиационной устойчивости оказалась неоднозначной. Образцы этого представителя птеридофлоры имеют склонность к более травматичной реакции на слабые дозы гамма-облучения и более мутационно-выраженной реакции на большие дозы в диапазоне 16–40 Гр.

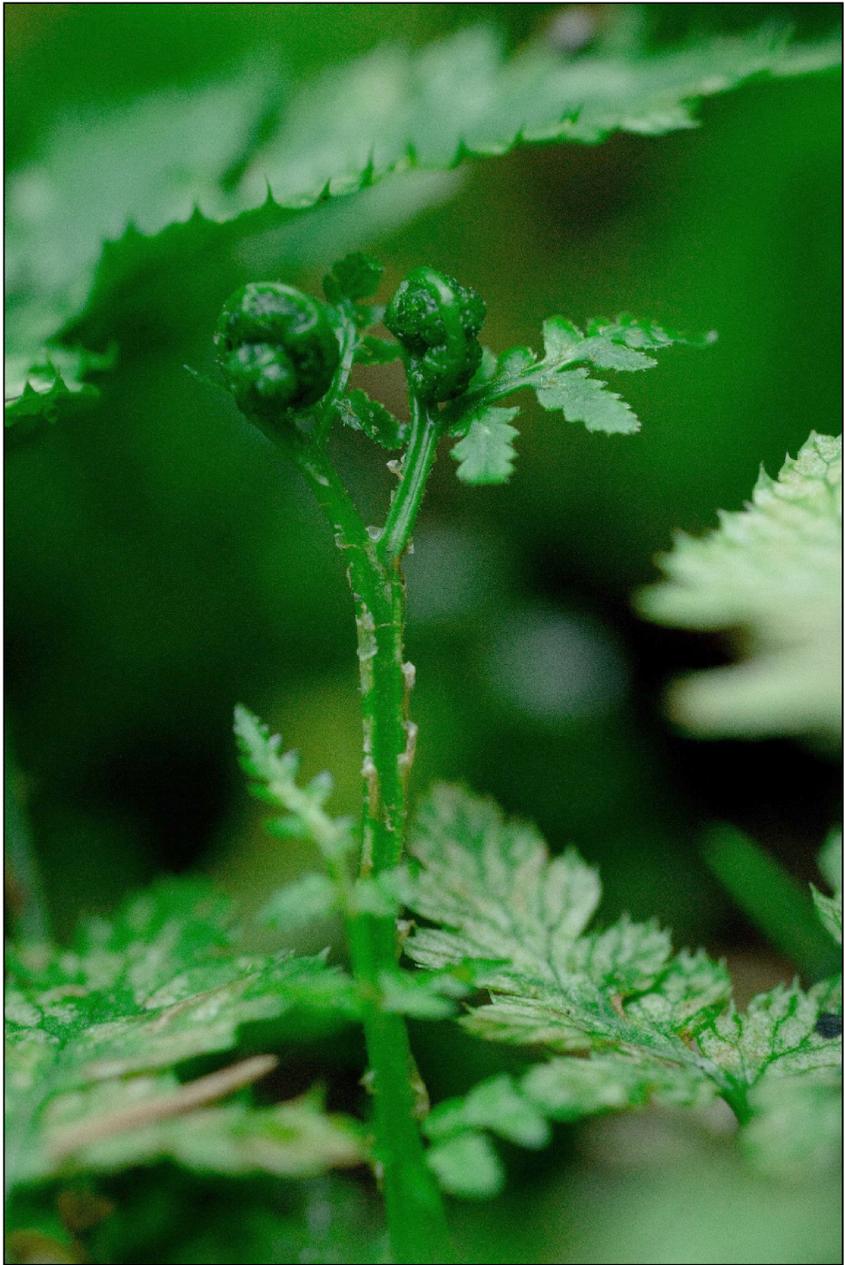


Рис. 20. Бифуркация черешка вайи *Dryopteris dilatata* в стадии развертывания



Рис. 21. Бифуркация черешка вайи *Dryopteris dilatata*



Рис. 22. Мутационная бифуркация верхнего отдела рахиса вайи вида *Dryopteris dilatata* в стадии разворачивания (внизу) и в более зрелом состоянии (вверху)

Мутационная бифуркация вай проявилась у *D. dilatata* на уровне похожих доз, что у *Athyrium filix-femina*, но характер ее проявления у некоторых образцов немного другой. На рис. 20, 21 можно видеть, что в отличие от предыдущих событий неоднократно происходит бифуркация черешка вайи, в ходе которой одна вайя делится на две полноценных, отдельно развиваю-

щихся. Также была выявлена наблюдаемая и у *A. filix-femina* бифуркация верхнего отдела рахиса (рис. 22).

Помимо вышеупомянутых ярких явлений мутагенеза необходимо уделить внимание образцам, получившим меньшую дозу относительно растений с дозами выше 16 Гр. В целом наблюдаемые изменения в морфогенезе спорофитов можно охарактеризовать как различные угнетения роста: у образцов с дозой 6 Гр произошло изменение формы и угла роста вайи, прослеживается изогнутость рахиса и деформация эпидермиса на значительной части его поверхности.

***Ginnocarpium dryopteris.*** *Ginnocarpium dryopteris*, принадлежащий семейству *Cystopteridaceae*, помимо мутационных явлений у спорофитов в диапазоне доз 2–19 Гр, проявил иную реакцию. Исходя из наблюдений можно констатировать гибель образцов, подвергшихся высоким дозам в диапазоне 30–40 Гр. Гибель наступила спустя 14 дней после облучения. Однако летальным стал исход не всех образцов; спорофиты, получившие меньшие дозы, показали другие реакции и мутационные явления. Мутационная бифуркация и деформация задела и этот вид (рис. 23, 24, 26) [5],



Рис. 23. Бифуркация перьев вида *Ginnocarpium dryopteris*



Рис. 24. Деформация молодой вайи *Gimnocarpium dryopteris*



Рис. 25. Возможное проявление поражения грибом рода *Taphrina* на вайе *Gimnocarpium dryopteris*



Рис. 26. Бифуркация апикальной части молодой вайи *Gimnocarpium dryopteris*

а на образцах с дозами 9–19 Гр можно наблюдать темно-карие пятна и их расхождения по сосудистой системе на всей поверхности вай. По наблюдениям морфогенеза пораженных участков вай можно сказать, что явление довольно схоже с поражением аскомицетами *Taphrina athyrii* (рис. 25), которое часто проявляется на другом представителе исследуемой птеридофлоры — *A. filix-femina* [6], однако подтвержденных случаев поражения *Gimnocarpium dryopteris* грибом рода *Taphrina* в литературе автором выявлено не было, поэтому точно утверждать о природе данного явления не представляется возможным.

***Phegopteris connectilis***. Последним из исследуемых видов стал представитель семейства *Thelypteridaceae* — *Phegopteris connectilis*, наименее распространенный вид птеридофлоры на территории исследуемого лесного массива. По разнообразию явлений мутационного морфогенеза данный вид сопоставим с *Athyrium filix-femina*. Самым необычным мутационным явлением автору показалось изменение формы молодых вай, которые практически полностью потеряли свои природные очертания. На фотографиях, приведенных на рис. 27, можно видеть яркие отличия от фонового спорофита. Особенно необходимо отметить образец под номером 24, получивший максимальную дозу в 40 Гр среди всех спорофитов вида *P. Connectilis* (рис. 27, верхняя фотография). Как можно заметить, вайя в определенный момент ближе к середине своей длины начинает развиваться аномально и утрачивает привычный облик с последовательным уменьшением размера перьев по мере приближения их положения к апикальной части вайи, а



Рис. 27. Сравнение спорофита с мутационным растроением верхушки вайи, получившего максимальную дозу 40 Гр (вверху), с фоновым молодым образцом *Phegopteris connectilis* (внизу)

верхушка вайи делится на три обособленных верхушки, имеющих при этом размер и форму привычного молодого пера. При нормальном развитии у образца данного вида верхушка молодой вайи, которой свойственен иной, натуральный вид, должна быть меньше центральных перьев и иметь другое, стрелообразное строение. Подобное растроение (предполагаемая трифуркация) верхушки вайи не наблюдалось у других видов. В совокупности со сведениями о полученной дозе и наличии образца под номером 23, имеющего схожие признаки угнетения роста (рис. 26), явно



Рис. 28. Образец *Phegopteris connectilis* номер 23 с угнетением роста



Рис. 29. Нормально развитая взрослая вайя вида *Phegopteris connectilis*



Рис. 30. Молодая мутировавшая вайя *Phegopteris connectilis* с бифуркацией верхушки и другими аномалиями в развитии



Рис. 31. Бифуркация верхушки вайи вида *Phegopteris connectilis*

можно констатировать зависимость приобретения мутационных признаков от увеличения дозы гамма-излучения. Говоря о наблюдаемой на других видах бифуркации вай, необходимо отметить, что она наблюдается и у *P. connectilis* в апикальной части (рис. 25). Также уникальным случаем стало проявление деформации вайи на образце с дозой 19 Гр (рис. 30).

Морфогенез сорусов и стерильно-фертильный диморфизм в настоящем исследовании не рассматриваются, поскольку подвергаемые облучению спорофиты слишком молоды и в сезон проведения эксперимента не споросносили [1].

## ВЫВОДЫ

1. В результате длительного исследования и тщательного анализа фотофиксационных и документальных материалов можно уверенно констатировать выявление зависимости возникновения мутационных морфологических изменений строения вай всех четырех исследуемых видов птеридофлоры лесного массива на территории городского округа Дубна от уровня полученной дозы гамма-излучения.

2. Из наблюдаемых мутационных морфологических изменений наиболее яркими и часто встречаемыми являются: бифуркации вай (как в апикальной части вайи, так и, более редко, на уровне базального пера и черешка вайи), а также деформации и изменения размеров отдельных перьев. Что касается более редких явлений, к ним можно отнести изменения цвета вай неопределенной этиологии, предполагаемое поражение вида *Gimnocarpium dryopteris* грибом рода *Taphrina*, а также сильное угнетение роста с расстройством апикальной части вайи у вида *Phegopteris connectilis* у образцов с высокими полученными дозами.

3. Необходимо отметить, что в характере возникающих мутационных явлений прослеживаются как схожести, так и различия. В целом, основная масса описанных мутационных процессов встречается на всех четырех облученных видах папоротников, но, например, такой вид, как *Gimnocarpium dryopteris*, оказался в особенности чувствителен к высоким дозам гамма-облучения, в связи с чем для нескольких образцов исход оказался летальным.

4. Достоверность сделанных выводов можно аргументировать тем, что в ходе сравнительного анализа облученных представителей птеридофлоры и контрольных образцов папоротников ни одного из наблюдаемых мутационных морфологических изменений на контрольных образцах выявлено не было.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нужно отметить, что для точного диагностирования характера (соматического или генеративного) выявленных мутационных процессов необходимо дальнейшее наблюдение за развитием следующих поколений спорофитов после сбора спор с облученных представителей птеридофлоры.

Следует также упомянуть, что в процессе изучения большого количества литературных источников исследований морфологических изменений у высших растений в результате воздействия ионизирующего излучения было найдено крайне мало и все они проводятся с применением других методик, в большинстве своем не использующих естественную среду произрастания видов. Проведение исследований стойкости высших растений к радиации, подобных данному, могло бы принести значительную пользу в различных направлениях науки, но на данный момент, к сожалению, мутационные морфологические изменения в результате воздействия иони-

зирующего излучения как высших растений в целом, так и, в частности, птеридофлоры остаются до конца не изученными.

Автор выражает благодарность сотрудникам Лаборатории нейтронной физики Червякову Федору Анатольевичу, Галушко Алексею Викторовичу, Ермолаеву Валерию Владимировичу и Ямурзину Владису Рафиковичу за помощь в проведении эксперимента на стадии облучения образцов.

Все права на фотоматериалы принадлежат автору исследования.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Development and Morphogenesis // Biology and Evolution of Ferns and Lycophytes / T. Ranker, C. Haufler (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2008. P. 1–2.
2. Fern Ecology / K. Mehlreter, L. Walker, J. Sharpe (Eds.). Cambridge: Cambridge Univ. Press., 2010. doi:10.1017/CBO9780511844898.
3. Шабалин Е. П., Верхоглядов А. Е., Булавин М. В., Рогов А. Д., Кулагин Е. Н., Куликов С. А. Спектр и плотность потока нейтронов в облучательном канале пучка №3 реактора ИБР-2 // Письма в ЭЧАЯ. 2015. Т. 12, №2. С. 336.
4. Padilla-Cabal F., Kuess P., Georg D., Palmans H., Fetty L., Fuchs H. Characterization of EBТ3 Radiochromic Films for Dosimetry of Proton Beams in the Presence of Magnetic Fields // Medical Physics. 2019. V. 46(7). P. 3278.
5. Vasco A., Moran R. C., Ambrose B. A. The Evolution, Morphology, and Development of Fern Leaves // Front. Plant Sci. 2013. V. 4. P. 345; doi: 10.3389/fpls.2013.003.
6. Проявление поражения *Taphrina athyrii* на *Athyrium filix-femina*. <https://www.commanster.eu/Commanster/Fungi/Asco/SuAsco/Taphrina.athyrii.html>.

Получено 3 октября 2023 г.

Редактор *Е. В. Калининкова*

Подписано в печать 23.10.2023.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать цифровая.

Усл. печ. л. 2,5. Уч.-изд. л. 2,68. Тираж 100 экз. Заказ № 60747.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований  
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: [publish@jinr.ru](mailto:publish@jinr.ru)

[www.jinr.ru/publish/](http://www.jinr.ru/publish/)