

З.А. Инелова^{1*}, А.Е. Ермаков², Д. Едилхан²

¹Казахский национальный университет имени Аль-Фараби, Алматы, Казахстан;

²Astana IT University, Нур-Султан, Казахстан

*Автор для корреспонденции: zarina.inelova@kaznu.edu.kz

Использование и особенности культивирования мха сфагнума в биотехнологической системе для естественной фильтрации, очистки воздуха в городских условиях

В статье представлены результаты исследования обзора литературных источников по использованию мхов в качестве естественных фильтров для очистки воздуха в загрязненных локациях. Также представлена информация об особенностях культивирования мха рода Сфагнум вертикальным и горизонтальными способами в будущей конструкции биотехнологической системы и описаны необходимые условия для достижения максимального эффекта очистки воздуха с использованием данного вида растительной культуры. Результаты исследования будут использованы при разработке уникального оборудования, а именно пилотного прототипа биотехнологической системы — фильтра, использующего мох вида сфагнум, как естественный фильтр для очистки воздуха на определенной территории. Данная разработка предполагает использование автоматизированных систем управления для создания искусственных условий для растительной культуры — мха, который по естественным причинам не может существовать в городских условиях. В долгосрочной перспективе биотехнологический фильтр позволит эффективно очистить воздух, охладить окружающую среду и снизить уровень шума в тех локациях, где, из-за большой застроенности, невозможно посадить множество деревьев. В настоящее время во всём мире группы ученых выполняют исследования и опытные разработки различных вариантов решений, в том числе технологий, которые позволяют значительно улучшить городскую среду при использовании естественных фильтров. Использование мхов в качестве естественного фильтра позволит усвоить мелкую пыль, очистить воздух и создать благоприятное пространство.

Ключевые слова: мох, Сфагнум, биотехнологический фильтр, *Sphagnum*, окружающая среда, вертикальное выращивание, культивирование мха, биомониторинг.

Введение

Изменение климата является серьезной проблемой как для населения, так и для растительного мира. Ситуация усугубляется постоянным ухудшением качества воздуха, связанным с естественным и искусственным изменением климата. Загрязнение воздуха представляет собой комплексную проблему, на которую необходимо взглянуть с разных сторон. Данный вопрос особо остро стоит в крупных городах, где сконцентрировано большое скопление людей, и наблюдаются наиболее высокие риски ухудшения здоровья. Известно, что сегодня подавляющая часть населения мира проживает в крупных городах. Загрязнение воздуха затрагивает всю окружающую среду и жизнь человека, а также приводит к множеству неблагоприятных последствий для здоровья человека, экосистем и климата. Загрязнители воздуха, имеющие естественное происхождение, так и являющиеся результатом действий антропогенных источников, могут переноситься на большие расстояния и покрывать большие площади в виде влажных и сухих атмосферных осадков и грязных частиц, что представляет собой серьезный фактор риска для здоровья человека при вдыхании или попадании в пищевую цепочку. Это приводит к тому, что жители мегаполисов страдают от стресса, рака и аллергии, вызванными загрязнением воздуха [1]. Для решения проблем в крупных городах нужно использовать нестандартные подходы, где за основу будут приняты современные инженерные технологии. В данной статье приведен обзор литературных источников по использованию мхов, которые будут задействованы в качестве естественного фильтра для разрабатываемого пилотного прототипа биотехнологической системы — фильтра (далее — биофильтр) для очистки воздуха на определенной территории. Предлагаемое решение действует, как воздушный фильтр, усваивает мелкую пыль, очищает воздух и создаёт благоприятное пространство. Для разных видов мхов требуются разные условия существования и особенности культивирования, соответственно важно уделить особое внимание созданию искусственных условий и технологиям выращивания в городской среде. В долгосрочной перспективе воздушный фильтр позволит эффективно очистить воздух, охладить окружающую среду и снизить уро-

вень шума в тех локациях, где из-за большой застроенности, невозможно посадить множество деревьев.

Европейский проект City Tree, информация о котором доступна по ссылке <https://greencitysolutions.de/en/products/citytree/>, послужил примером для создания нашего биотехнологического фильтра. Фильтр сочетает в себе естественную фильтрацию воздуха через вертикальные и горизонтальные стеллажи с растительной культурой — мхом с двух сторон огражденным стеклом и с двумя экранами с двух других сторон для цифровой презентации.

Методика исследований

Нами были проанализированы научные публикации за последние двадцать лет (1996–2022 гг.) из базы РИНЦ, Scopus и Web of Science для выбора подходящих видов мхов, с возможностью дальнейшего их использования, в качестве биофильтра очистки воздуха.

Результаты и обсуждения

Выбор растительных культур — мхов для биотехнологического фильтра и описание эффективности выбранных видов культур

Биотехнологическое применение мхов различное. Мхи используют как экстракт или все растение для различных промышленных применений, а также известно их применение в качестве производственных платформ для ценных метаболитов или фармацевтических белков, биомониторинга загрязнения окружающей среды.

Одной из многочисленных групп среди высших растений является отдел Мохообразные (Bryophyta). Этот отдел по количеству видов уступает лишь цветковым растениям. Мохообразные имеют важное практическое значение в образовании фитоценоза. На сегодняшний день на территории Средней Азии и Казахстана насчитывается свыше тысячи мохообразных таксонов [2].

Прежде чем описать практическое использование необходимо описать специфику произрастания и строения данной группы высших растений. Моховидные обладают следующими характеристиками: зеленые наземные травянистые растения, основное вегетирующее тело представлено гаметофитом. Тело мохообразных растений представляет собой слоевище или стебелек с листьями. В качестве корневой системы выступают ризоиды. Размножение: бесполое и половое [3].

Особенностями мхов являются уникальность жизнедеятельности и способность эффективно существовать в неблагоприятных условиях среды, таких как затенение, дефицит влаги, отсутствие плодородного грунта. Эти качества мхов позволяют использовать их в качестве перспективной группы растений для озеленения территорий, а также для декоративного эффекта при озеленении ландшафтов. Они могут произрастать как горизонтально, так и вертикально. Мохообразные могут произрастать на каменных, керамических и древесных поверхностях, резине и т.д. Мхам не нужен специальный уход: укос, дополнительные удобрения, постоянный полив и плодородная почва. Для их произрастания необходим только субстрат для закрепления [3]. Для голарктических видов мхов, произрастающих в суровом климате, как г. Нурсултан, отмечен активный рост побегов в весенний и осенний периоды года. В связи с коротким летом столицы Казахстана применение мхов позволит озеленить общественные территории. Мхи — основной компонент устойчивого природного биогеоценоза. Они выполняют различные почвозащитные функции. Также растительная культура — мох способна оказывать значительное положительное влияние на качество окружающей среды, в частности, через активное поглощение углеродного газа и оксида азота и пыльных частиц и увеличение баланса в сторону выделения кислорода. Для растительной культуры — мха свойственен высокий фильтрующий элемент, который позволяет максимизировать антибактериальное влияние на среду [4]. Учитывая описанное выше, на текущий момент во всем мире группы ученых выполняют исследования и опытные разработки различных вариантов решений, в том числе технологий, которые позволяют значительно улучшить городскую среду при использовании естественных фильтров. Одним из примеров является западно-европейская компания Green City Solutions, которая разработала систему из видов зеленых панелей мха, называемые CityTree (от англ. *зеленое дерево*), которая способна впитывать вредные выбросы в атмосферу и очищать воздух в определенной локации [1, 5]. Основной целью данной работы было исследовать риски для здоровья людей, подверженных влиянию одной из основных экологических проблем современности — загрязнению воздуха [6]. Загрязнённый воздух на 90 % состоит из мелкодисперсной пыли и на 10 % — из озона. Мелкодисперсная пыль или твердые частицы представляют опасность для здоровья людей [7–9].

Цветковые растения не эффективны в качестве аккумулянта твердых частиц воздуха, так как они не способны к их надежной фиксации. Различные части растений (лепестки, цветки, листья и др.) выполняют своего рода барьерную функцию, позволяя тем самым накапливаться твердым частицам воздуха только на поверхности [10]. Однако через некоторое время они способны снова попадать в атмосферу. Необходимо отметить, что физические и химические характеристики растения влияют на потенциал фильтрации мелкодисперсной пыли [11]. Помимо этого, густо произрастающие растения имеют особенность создавать барьеры для вентиляции, тем самым создавая условия для накопления мелкодисперсной пыли [12]. В то же время зеленые насаждения в центре города находятся под прямым влиянием различных загрязняющих факторов окружающей среды, таких как высокая загазованность, производственные выбросы в атмосферу, наличие избыточного количества веществ, включающих газы, органические и неорганические частицы, которые отрицательно влияют на способность растений связывать твердые частицы. Согласно исследованиям Боннского университета (Германия), мох аккумулирует лучше загрязняющие вещества. Морфология и анатомия мха отличается от цветковых растений. Отличительной чертой является отсутствие проводящих тканей, таких как ксилема и флоэма. Проводящие ткани обеспечивают растение питательными веществами и водой. Мох называют «катион-обменником» в силу того, что он поглощает необходимые вещества из воздуха. Наружную часть мхов покрывает бактериальная пленка, которая обеспечивает поглощение неорганических веществ и трансформацию их в органическое состояние [8].

В течение нескольких лет различные виды мхов использовались для подходов биомониторинга для измерения качества воздуха [5, 13–20]. Мхи особенно подходят, поскольку они поглощают элементы и питательные вещества через свою поверхность непосредственно из атмосферных осадков, отражая тем самым химический состав окружающей среды.

Мох вида *Orthotrichum lyellii* был использован для определения концентрации катионов селена, мышьяка и кадмия [21]. Проведенные исследования по изучению последствий воздействия транспортных выбросов на человека в Белграде, Сербии, показали наличие концентрации *Sb*, *Cu* и *Cr* в моховых культурах (*Sphagnum girgensohnii* и *Hypnum cupressiforme*). Наличие обнаруженных элементов является следствием выбросов транспортных средств [22].

Ж. Вукович и другие ученые исследовали пригодность мха *Sphagnum girgensohnii* для биомагнитного мониторинга в городах Белграда. Моховые мешки *S. girgensohnii* были размещены в трех разных микросредах с интенсивным движением автотранспорта. Доля ферромагнитных частиц в образцах мха была количественно определена методом остаточной намагниченности изотермической насыщенности (SIRM), а измеренные значения сравнивались с концентрацией микроэлементов в образцах мха. Результаты показали, что значения SIRM существенно различались в рассматриваемых городских микросредах, но была обнаружена высокая корреляция между значениями SIRM мхов и концентрациями катионов Al, Ba, Co, Cr, Cu, Fe, Ni и Pb. Результаты показали, что моховые мешки можно использовать для биомагнитного мониторинга тенденций пространственно-временного распределения загрязнения воздуха [23].

Л. Лази и другие ученые на городской улице Каньон в Белграде (Сербия) также исследовали распределение загрязнителей воздуха с помощью мохового мешка *Sphagnum girgensohnii*. И применялся метод «оперативной модели загрязнения улиц» для прогнозирования содержания NO_x, NO, NO₂, O₃, CO, BNZ и PM10. Результаты обоих методов, моделирования и биомониторинга, показали значительно уменьшающуюся тенденцию загрязнителей воздуха с высотой. Результаты показали, что метод мешка со мхом может быть ценным инструментом для проверки производительности модели [24].

Также свой вклад внесли Маседо-Миранда и другие ученые в изучение загрязнения воздуха с использованием мхов *Fabronia ciliaris* и *Leskea angustata*, полученных из долины Толука в Мексике. Группа использовала абсорбционный атомно-спектрометрический анализ (ААС) для определения катионов (Cr, P, Cd и Zn). Полученные результаты показали, что средние концентрации металлов во мхах находились в следующем порядке: Zn > Pb > Cr > Cd. Отмечено, что концентрации тяжелых металлов были выше у *Fabrio naciliaris*, чем у *Leskea angustata*. В результате пришли к выводу, что концентрация металлов было выше в сезон дождей, а также предположено, что источником поступления металлов является антропогенный фактор [25].

В Республике Македония исследования по мху (2005 и 2015 гг.) проводились Т.И. Стафиловым и другими. Было получено более 72 образцов мхов. Методами атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой и атомно-абсорбционной спектроскопии определено 22 элемента (Al,

As, Ba, Ca, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, K, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, Pb, Rb, Sr, V и Zn). При сравнении результатов исследований было установлено, что практически все потенциально токсичные элементы (As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb и Zn) увеличились в пробах мхов с 2002 по 2005 гг., но снизились в выборках с 2010 по 2015 гг. [26].

М.Л. Гоулден и П.М. Грил в своих исследованиях использовали автоматизированную мультиплексную систему газообмена для измерения чистого обмена углекислого газа на поверхности трех тенистых ковыльных и трех открытых участков сфагнового мха в условиях елового леса в течение 35 дней в конце вегетационного периода 1995 г. В результате пришли к выводу, что на фотосинтез мхом приходится от 10 до 50 % общего поглощения CO₂ всем лесом. Дыхание на поверхности мха составляло от 50 до 90 % дыхания всего леса, с уменьшением доли в теплые ночи, по-видимому, из-за непропорционального увеличения надземного дыхания [28].

В Италии и Испании *Sphagnum palustre*, произведенный в биореакторе, превосходил местный *Pseudoscleropodium purum* по поглощению и накоплению металлов [28]. Эти исследования были проведены с помощью «moss sphere», устройства для пассивного отбора загрязняющих веществ, превосходящего прежние методы изобретенного консорциумом MOSS clone, финансируемым ЕС (www.mossclone.eu) [29]. Это устройство содержит девитализированный (безжизненный) мох в пространстве полый внутренней и внешней сферы из перфорированного нейлона и пластика, обеспечивая свободный проход воздуха и однородное распределение мха. Дальнейшее улучшение распространения вегетативного сфагнома для биотехнологического использования или физиологических и клеточных вмешательств может способствовать недавно разработанный метод роста протонемы сфагнома [30].

На основании проведенного литературного обзора был выбран мох рода Сфагнум для испытания в качестве очистительного агента, так как этот род лучше поглощает ионы тяжелых металлов [18, 31]. Биомасса мха рода Сфагнум увеличивается примерно в 30 раз в течение 4 недель биореакторного культивирования клонального гаметофорного материала. Включенными параметрами процесса были механическое напряжение, плотность инокулята, соединения среды и pH [32]. Этот материал использовался для мониторинга загрязнителей атмосферы металлами в лабораторных экспериментах [33], и впервые было продемонстрировано поглощение наночастиц полистирола, что дало возможность контролировать микропластики в пресноводных средах с помощью биотехнологически полученного торфяного мха [34].

Для разработки уникальных решений с использованием мхов, и возникающие в дальнейшем вопросы культивирования мхов требуют определенные биотехнологические и флористические знания. Мохообразные — это тонкая, пластичная, фактурная и живая «плёнка», которая способна обволакивать любую форму. Кроме того, выращивание сфагнома, производство биомассы сфагнома на переувлажненных торфяниках, поможет остановить выбросы парниковых газов с осушенных торфяников, что позволяет достичь сокращения выбросов CO₂. Кроме того, выращивание сфагнома призвано обеспечить устойчивый источник биомассы торфяного мха в качестве эффективной замены торфа, который по-прежнему является на сегодняшний день самой качественной питательной средой для выращивания в горшках [35], а также, выращивание торфяного мха, поможет остановить выбросы парниковых газов, тем самым решив огромные экологические проблемы [36]. Способность мхов колонизировать широкий спектр мест обитания (от антарктической тундры до глубоких лесов и Пустыня Мохава) позволила ученым определить новые стратегии и молекулярные схемы, связанные с устойчивостью к ультрафиолетовому излучению, соли, засухе и холоду [37–41].

Поскольку у мхов нет корней, а также не имеется проводящих тканей, мхи способны поглощать все необходимые для них питательные вещества, и в том числе и загрязняющие вещества из атмосферы, которые в дальнейшем накапливаются в их тканях. Большой объем тканей мха способствует накоплению и аккумуляции загрязняющих веществ: твердые частицы, тяжелых металлов и т.д. [18].

Особенности культивирования мха сфагнома

При проектировании биофильтра, на основании литературного обзора, культурой для поглощения углекислого газа был выбран мох — *Sphagnum sp.* Все моховые растения, в частности торфяные мхи (*Sphagnum sp.*), полезны для решения экологических задач, биомониторинга загрязнения окружающей среды и «земледелия» с нейтральным выбросом CO₂ на повторно заболоченных болотах для борьбы с изменением климата [42].

Согласно техническому проекту, мох будет выращиваться двумя методами — вертикально и горизонтально. Вертикальный метод выращивания предполагает фиксацию мха в прямоугольных лот-

ках глубиной 3–4 см. Фиксирование будет происходить с помощью установки двух сеток по периметру лотка. Первая сетка будет установлена для удержания субстрата, вторая для фиксирования самого растения в вертикальном положении. В качестве субстрата будет использоваться высушенный мох *Sphagnum sp.* Исследования показали, что сфагнум обеспечивает оптимальные свойства для овощных растений и является хорошей заменой других субстратов, в особенности, минеральной ваты [43–45]. Сфагнум является влаголюбивым растением, в природе произрастает в болотистых местностях [46, 47]. Кроме того, сфагнум не может активно контролировать систему водоснабжения, как сосудистые растения, из-за отсутствия корней [48]. Систематическое обеспечение влагой является обязательным условием. В вертикальном и горизонтальном методах выращивания мха увлажнение субстрата будет обеспечено с помощью автоматического капельного орошения. В вертикальной системе выращивания мха капельное орошение будет установлено в верхней части лотка. В связи с вертикальным расположением излишки воды будут стекать под влиянием силы тяжести сверху вниз в накопительную емкость. Подача воды в лоток будет настроена так, чтобы сфагнум не осушился и был погружен во влажный субстрат. Наивысшая продуктивность биомассы сфагнома достигается при стабильном уровне грунтовых вод всего на несколько сантиметров ниже поверхности торфяного мха [49]. Высота влажного субстрата будет составлять до 1 см [50].

В ходе исследования был выявлен температурный режим для сфагномов 3–22°C *in vivo* или 10–20 °C *in vitro* [51]. Днем оптимальная температура воздуха для выращивания сфагнома в закрытой системе является 22±1 °C, ночью 16±1 °C, световой период 16 часов, относительная влажность 85±15 %. Период выращивания составляет пять месяцев [50]. Влажность воздуха будет обеспечена с помощью встроенного увлажнителя в автоматическом режиме.

Сфагнум способен впитывать в себя количество воды, превышающей в 20 раз свою массу. Растение всегда стремится расти по направлению к свету, то есть вверх. Сфагнум не имеет корней или ризоидов, растет лишь верхняя часть, формируются стебли. В свою очередь нижняя часть стеблей отмирает и трансформируется в торф [52]. После отмирания значительной нижней части стеблей следует заменить культуру новым посевом.

Сфагнум обычно произрастает с сосудистыми растениями [53], растет под тенью высоких растений и их подстилкой. Большинство видов сфагномов приспособлены к слабому освещению. Их точка светонасыщения обычно находится при низкой плотности потока фотонов (ниже 400 мкмоль м⁻² с⁻¹ в лаборатории) [54]. В целях недопущения ожогов мхов от прямых солнечных лучей, между двумя слоями стекол будут монтированы ролл-шторы, которые будут регулироваться с помощью фотореле. Кроме того, к мхам вертикального выращивания будут дополнительно установлены лампы освещения для компенсации недостатка светового дня. У сфагномов, выращиваемых в горизонтальном положении, нет доступа к естественным источникам света. И поэтому они будут освещаться искусственно, специальными лампами в течение 16 часов.

Заключение

На данный момент в Казахстане отсутствуют технологии по очистке воздуха с помощью биологического метода. Предлагаемое решение по построению биотехнологической системы, где в качестве естественного фильтра будет использован мох, имеет множество положительных моментов. В дальнейшем планируется разработка и внедрение данной системы, опираясь на опыт других стран. Растительный объект — мох сфагнум, позволит эффективным образом очищать воздух в прилегающей территории. На входе и выходе в биотехнологический фильтр будут установлены датчики измерения качества воздуха, которые позволят оценивать эффективность работы фильтра и проводить аналитику. Также, через определенные промежутки времени, мох будет отправлен на исследования по измерению содержания загрязняющих веществ. На данном этапе проекта ведутся работы по разработке самого фильтра. Планируется, что установка позволит значительно улучшить качество воздуха.

В рамках исследования, построена общая концепция биотехнологической системы — фильтра для очистки воздуха с использованием оптимального и наиболее эффективного вида растительной культуры — мха сфагнома с возможностью анализа уровня загрязнения воздуха в прилегающей локации, включая оценку эффективности работы фильтра.

В результате проведенных исследований был выбран биологически природный фильтр — мох из рода Сфагнум. Выбор связан с пластичностью в применении, как биотехнологического фильтра, так и с использованием его, как источника биомониторинга.

Благодарность

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК: грант № BR10965311 «Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепции Smart City».

Список литературы

- 1 Sanger P. The City Tree: A Vertical Plant Filter for Enhanced Temperature Management / P. Sanger, V. Splittgerber // Innovation in Climate Change Adaptation. — Springer, Cham, 2016. — P. 75–85.
- 2 Маматкулов У.К. Мохообразные Средней Азии и Казахстана / У.К. Маматкулов, И.О. Байтулин, С.Г. Нестерова. — Алматы: Ин-т ботаники и фитондустрии, 1998. — 232 с.
- 3 Паршина Г.Н. Биоразнообразие растений: учеб. / Г.Н. Паршина, С.Г. Нестерова. — Алматы: Қазақ университеті, 2006. — 306 с.
- 4 Kłos A. Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland / A. Kłos, Z. Ziembik, M. Rajfur, A. Dolhańczuk-Śródka, Z. Bochenek, J.W. Bjerke, P. Świsłowski // Science of the Total Environment. — 2018. — Vol. 627. — P. 438–449.
- 5 Splittgerber V. City tree: a vertical plant wall / V. Splittgerber, P. Saenger // Air Pollution XXIII. — 2015. — Vol. 295. — P. 295–304.
- 6 World Health Organization. Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide. — World Health Organization, 2006. — 5 p.
- 7 Krzyżanowski M. Health effects of transport-related air pollution / M. Krzyżanowski, B. Kuna-Dibbert, J. Schneider. — WHO Regional Office Europe, 2005. — P. 1–190.
- 8 Frahm J. Feinstaubreduzierung durch Moose / J. Frahm, M. Sabovljevic // Immissionsschutz-Berlin. — 2007. — Vol. 12, No. 4. — P. 152.
- 9 Tiede R. I.I. Nachhaltigkeit am Hamburger Hafen: Eine Studie über die Wirkung von Schiffsimmissionen auf die Gesundheit / R. I.I. Tiede // Thesis PhD. — Hamburg, 2015. — 120 p.
- 10 Kappis C. Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ) / C. Kappis // Von Pflanzen, 2007. — P. 15–18.
- 11 Roloff A. Stadt- und Straßenbume der Zukunft—welche Arten sind geeignet / A. Roloff // Forstwiss Beitr Tharandt Beih. — 2013. — Vol. 14. — P. 173–187.
- 12 Thonnessen M. Staubfilterung und immissionshistorische Aspekte am Beispiel fassadenbegrunenden Wilden Weines (*Parthenocissus tricuspidata*) / M. Thonnessen // Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung. — 2006. — Vol. 18, No. 1. — P. 5–12.
- 13 Adamo P. Geochemical properties of airborne particulate matter (PM10) collected by automatic device and biomonitors in a Mediterranean urban environment / P. Adamo, S. Giordano, D. Naimo, R. Bargagli // Atmospheric environment. — 2008. — Vol. 42, No. 2. — P. 346–357.
- 14 Vasconcelos M. Atmospheric metal pollution (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) in Oporto city derived from results for low-volume aerosol samplers and for the moss *Sphagnum auriculatum* bioindicator / M. Vasconcelos, H. M.F. Tavares // Science of the total environment. — 1998. — Vol. 212, No. 1. — P. 11–20.
- 15 Giordano S. Instrumental and bio-monitoring of heavy metal and nanoparticle emissions from diesel engine exhaust in controlled environment / S. Giordano, P. Adamo, V. Spagnuolo, B.M. Vaglieco // Journal of Environmental Sciences. — 2010. — Vol. 22, No. 9. — P. 1357–1363.
- 16 Jeran Z. Lichens and mosses as biomonitors / Z. Jeran, R. Jacimovic, P.P. Mikuz // Journal de Physique IV. — 2003. — Vol. 107. — P. 675–678.
- 17 Limo J. Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations / J. Limo, P. Paturi, J. Makinen // Atmospheric Environment. — 2018. — Vol. 195. — P. 187–195.
- 18 Harmens H. Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: a review / H. Harmens, L. Foan, V. Simon, G. Mills // Environmental Pollution. — 2013. — Vol. 173. — P. 245–254.
- 19 Giordano S. Accumulation of airborne trace elements in mosses, lichens and synthetic materials exposed at urban monitoring stations: towards a harmonisation of the moss-bag technique / S. Giordano, P. Adamo, V. Spagnuolo, M. Tretiach, R. Bargagli // Chemosphere. — 2013. — Vol. 90, No. 2. — P. 292–299.
- 20 Donato A. An evaluation of the performance of a green panel in improving air quality, the case study in a street canyon in Modena, Italy / A. Donato, M. Rinaldi, M. Paglione, M.G. Villani, F. Russo, C. Carbone, S. Decesari // Atmospheric Environment. — 2021. — Vol. 247. — P. 118–189.
- 21 Donovan G.H. Using an epiphytic moss to identify previously unknown sources of atmospheric cadmium pollution / G.H. Donovan, S.E. Jovan, D. Gatzliolis, I. Burstyn, Y.L. Michael, M.C. Amacher, V.J. Monleon // Science of the Total Environment. — 2016. — Vol. 559. — P. 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.182>

- 22 Vuković G. Moss bag biomonitoring of airborne toxic element decrease on a small scale: a street study in Belgrade, Serbia / G. Vuković, M.A. Urošević, S. Škrivanj, T. Miličević, D. Dimitrijević, M. Tomašević, A. Popović // *Science of the Total Environment*. — 2016. — Vol. 542. — P. 394–403.
- 23 Vuković G. Biomagnetic monitoring of urban air pollution using moss bags (*Sphagnum girgensohnii*) / G. Vuković, M.A. Urošević, M. Tomašević, R. Samson, A. Popović // *Ecological Indicators*. — 2015. — Vol. 52. — P. 40–47.
- 24 Lazić L. Traffic contribution to air pollution in urban street canyons: Integrated application of the OSPM, moss biomonitoring and spectral analysis / L. Lazić, M.A. Urošević, Z. Mijić, G. Vuković, L. Ilić // *Atmospheric Environment*. — 2016. — Vol. 141. — P. 347–360.
- 25 Macedo-Miranda G. Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study / G. Macedo-Miranda, P. Avila-Pérez, P. Gil-Vargas, G. Zarazúa, J.C. Sánchez-Meza, C. Zepeda-Gómez, S. Tejeda // *Springer Plus*. — 2016. — Vol. 5, No. 1. — P. 1–13. <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2524-7>
- 26 Stafilov T. Moss biomonitoring of atmospheric deposition study of minor and trace elements in Macedonia / T. Stafilov, R. Šajn, L. Barandovski, K.B. Andonovska, S. Malinovska // *Air Quality, Atmosphere & Health*. — 2018. — Vol. 11, No. 2. — P. 137–152.
- 27 Goulden M.L. Automated measurements of CO₂ exchange at the moss surface of a black spruce forest / M.L. Goulden, P.M. Crill // *Tree Physiology*. — 1997. — Vol. 17, No. 8–9. — P. 537–542.
- 28 Capozzi F. *Sphagnum palustre* clone vs native *Pseudoscleropodium purum*: A first trial in the field to validate the future of the moss bag technique / F. Capozzi, P. Adamo, A. Di Palma, J.R. Aboal, R. Bargagli, J.A. Fernandez, S. Giordano // *Environmental Pollution*. — 2017. — Vol. 225. — P. 323–328.
- 29 Reskir R. Passive contaminant sensor device used to sense air pollutants comprising polycyclic aromatic hydrocarbons or heavy metals or their compounds, comprises axenic devitalized Moss clone / R. Reskir // *European Patent Application*. — 2016. — EP 3 076 171 A1.
- 30 Zhao W. Development of a method for protonema proliferation of peat moss (*Sphagnum squarrosum*) through regeneration analysis / W. Zhao, Z. Li, Y. Hu, M. Wang, S. Zheng, Q. Li, Y. Sun // *New Phytologist*. — 2019. — Vol. 221, No. 2. — P. 1160–1171.
- 31 González A.G. Metal adsorption on mosses: toward a universal adsorption model / A.G. González, O.S. Pokrovsky // *Journal of colloid and interface science*. — 2014. — Vol. 415. — P. 169–178.
- 32 Beike A.K. Clonal in vitro propagation of peat mosses (*Sphagnum* L.) as novel green resources for basic and applied research / A.K. Baika, V. Spagnuolo, V. Lüth, F. Steinhart, J. Ramos-Gómez, M. Krebs, R. Reski // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*. — 2015. — Vol. 120, No. 3. — P. 1037–1049.
- 33 Gonzalez A.G. Metal and proton adsorption capacities of natural and cloned *Sphagnum* mosses / A.G. Gonzalez, O.S. Pokrovsky, A.K. Beike, R. Reski, A. Di Palma, P. Adamo, J.A. Fernandez // *Journal of colloid and interface science*. — 2016. — Vol. 461. — P. 326–334.
- 34 Capozzi F. Evidence on the effectiveness of mosses for biomonitoring of microplastics in fresh water environment / F. Capozzi // *Chemosphere*. — 2018. — Vol. 205. — P. 1–7.
- 35 Gaudig G. *Sphagnum* farming from species selection to the production of growing media: a review / G. Gaudig, M. Krebs, A. Prager, S. Wichmann, M. Barney, S.J. Caporn, H. Joosten // *Mires and Peat*. — 2017. — Vol. 20, No. 18. — P. 1–30.
- 36 Decker E.L. Mosses in biotechnology / E.L. Decker, R. Reski // *Current opinion in biotechnology*. — 2020. — Vol. 61. — P. 21–27.
- 37 Oliver M.J. Bryophytes as experimental models for the study of environmental stress tolerance: *Tortula ruralis* and desiccation-tolerance in mosses / M.J. Oliver, J. Velten, A.J. Wood // *Plant Ecology*. — 2000. — Vol. 151, No. 1. — P. 73–84.
- 38 Barker D.H. Evidence of drought induced stress on biotic crust moss in the Mojave Desert / D.H. Barker, L.R. Stark, J.F. Zimpfer, N.D. Mclethie, S.D. Smith // *Plant, Cell & Environment*. — 2005. — Vol. 28, No. 7. — P. 939–947.
- 39 Khraiwesh B. Genome-wide expression analysis offers new insights into the origin and evolution of *Physcomitrella patens* stress response / B. Khraiwesh, E. Qudeimat, M. Thimma, A. Chaiboonchoe, K. Jijakli, A. Alzahmi, K. Salehi-Ashtiani // *Scientific reports*. — 2015. — Vol. 5, No. 1. — P. 1–15.
- 40 Waterman M.J. Photoprotection enhanced by red cell wall pigments in three East Antarctic mosses / M.J. Waterman, J. Bramley-Alves, R.E. Miller, P.A. Keller, S.A. Robinson // *Biological Research*. — 2018. — Vol. 51. — P. 211–215.
- 41 Campos M.L. Mosses: versatile plants for biotechnological applications / M.L. Campos, G.S. Prado, V.O. Dos Santos, L.C. Nascimento, S.M. Dohms, N. B. da Cunha, S.C. Dias // *Biotechnology Advances*. — 2020. — Vol. 41. — P. 107533.
- 42 Decker E.L. Mosses in biotechnology / E.L. Decker, R. Reski // *Current opinion in biotechnology*. — 2020. — Vol. 61. — P. 21–27.
- 43 Nerlich A. Soilless cultivation: dynamically changing chemical properties and physical conditions of organic substrates influence the plant phenotype of lettuce / A. Nerlich, D. Dannehl // *Frontiers in Plant Science*. — 2021. — P. 2235.
- 44 Dannehl D. Evaluation of substitutes for rock wool as growing substrate for hydroponic tomato production / D. Dannehl, J. Suhl, C. Ulrichs, U. Schmidt // *Journal of Applied Botany and Food Quality*. — 2015. — Vol. 88, No. 1. — P. 23–28.
- 45 Emmel M. Growing ornamental plants in *Sphagnum* biomass / M. Emmel // *International Symposium on Growing Media*. — 2005. — Vol. 779. — P. 173–178.
- 46 Савич-Любицкая Л.И. Флора споровых растений СССР. Т. 1. Листостебельные мхи (1). Сфагновые (торфяные) мхи / Л.И. Савич-Любицкая. — М.-Л.: Изд-во АН СССР, 1952. — 255 с.

47 Боч М.С. Флора и растительность болот Северо-Запада России и принципы их охраны / М.С. Боч, В.А. Смагин. — Л.: Гидрометеиздат, 1993. — 220 с.

48 McCarter C. P.R. Ecohydrology of Sphagnum moss hummocks: mechanisms of capitula water supply and simulated effects of evaporation / C. P.R. McCarter, J.S. Price // Ecohydrology. — 2014. — Vol. 7, No. 1. — P. 33–44.

49 Gaudig G. Sphagnum farming in Germany—a review of progress / G. Gaudig, F. Fengler, M. Krebs, A. Prager, J. Schulz, S. Wichmann, H. Joosten // Mires and Peat. — 2014. — Vol. 13, No. 8. — P. 1–11.

50 Stenøien H.. Phenotypic variation in the *Sphagnum recurvum* complex: a cultivation experiment / H. Stenøien, S. Bakken, K.I. Flatberg // Journal of Bryology. — 1997. — Vol. 19, No. 4. — P. 731–750.

51 Антропова Т.А. Изучение температурной адаптации на клетки некоторых видов мхов / Т.А. Антропова // Цитология. — 1974. — № 16. — С. 38–42.

52 Шувалов В.Н. Все секреты выращивания растений: Что такое мох Сфагнум: как использовать это растение / В.Н. Шувалов // Электронный ресурс. Режим доступа: <https://klumba.guru/dikorastuschie-rasteniya/chto-takoe-moh-sfagnum-kak-ispolzovat-eto-rastenie.html>

53 Malmer N. Interferences between Sphagnum and vascular plants: effects on plant community structure and peat formation / N. Malmer, C. Albinsson, B.M. Svensson, B. Wallén // Oikos. — 2003. — Vol. 100, No. 3. — P. 469–482.

54 Harley P.C. Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra Sphagnum mosses from the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska / P.C. Harley, J.D. Tenhunen, K.J. Murray, J. Beyers // Oecologia. — 1989. — Vol. 79, No. 2. — P. 251–259.

З.А. Инелова, А.Е. Ермеков, Д. Едилхан

Қала жағдайында ауаны табиғи фильтрациялау және тазарту үшін биотехнологиялық жүйеде сфагнум мүгін қолдану, өсіру ерекшеліктері

Мақалада мүктерді ластанған жерлерде ауаны тазарту үшін табиғи фильтр ретінде пайдалану туралы әдебиеттік шолуды зерттеу нәтижелері берілген. Сондай-ақ, болашақ биотехнологиялық жүйені жобалауда Сфагнум тұқымдас мүктерді тік және көлденең әдістермен жасанды жағдайда өсіру ерекшеліктері туралы ақпарат берілген және өсімдік өсіндісінің осы түрін пайдалана отырып, ауаны тазартудың максималды әсеріне жету үшін қажетті жағдайлар сипатталған. Зерттеу нәтижелері бірегей жабдықты, атап айтқанда биотехнологиялық жүйенің тәжірибелік түпүлгісін, яғни белгілі бір аумақта ауаны тазартуға арналған табиғи фильтр ретінде Сфагнум мүгін пайдаланатын сүзгіні әзірлеуде қолданылатын болады. Бұл әзірleme өсімдік өсіндісіне жасанды жағдай жасау үшін автоматтандырылған басқару жүйелерін пайдалануды қамтиды, яғни мүктің табиғи себептермен қалалық ортада өсуі мүмкін емес. Ұзақмерзімді перспективада биотехнологиялық фильтр ауаны тиімді тазартады, қоршаған органы салқындатады және үлкен ғимараттардың арқасында көп ағаш отырғызу мүмкін емес жерлерде шуды азайтады. Қазіргі уақытта бүкіләлем бойынша ғалымдар тобы әртүрлі шешімдерді, соның ішінде табиғи фильтрлерді пайдалана отырып, қалалық органы айтарлықтай жақсартуға мүмкіндік беретін технологияларды зерттеу және эксперименталды әзірлеу жұмыстарын жүргізуде. Мүктерді табиғи сүзгі ретінде пайдалану ұсақ шаңды сіңіруге, ауаны тазартуға және қолайлы кеңістік жасауға мүмкіндік береді.

Кілт сөздер: мүк, Сфагнум, биотехнологиялық фильтр, *Sphagnum*, қоршаған орта, вертикальді өсіру, мүкті жасанды жағдайда өсіру, биомониторинг.

Z.A. Inelova, A.Y. Yermekov, D. Yedilkhan

Usage and features of cultivation of sphagnum moss in a biotechnological system for natural filtration, purification of air in urban conditions

This article presents the results of a study of a literature review on the use of mosses as natural filters for air purification in polluted locations; provides information on the features of the cultivation of sphagnum moss by vertical and horizontal methods in the future design of a biotechnological system; describes the necessary conditions to achieve the maximum effect of air purification using this type of plant culture. The study results will be used in the development of unique equipment, namely a pilot prototype of a biotechnological system — a filter using sphagnum moss as a natural filter for air purification in a certain area. This development involves the use of automated control systems to create artificial conditions for plant culture — moss, which, for natural reasons, cannot exist in urban environments. In the long term, a biotechnological filter will effectively clean the air, cool the environment and reduce the noise level in those locations where it is impossible to plant many trees due to large buildings. Currently, groups of scientists around the world are conducting re-

search and experimental development of various solutions, including technologies that can significantly improve the urban environment using natural filters. Using mosses as a natural filter will absorb fine dust, purify the air, and create a favorable space.

Keywords: moss, sphagnum, biotechnological filter, *Sphagnum*, environment, vertical cultivation, moss cultivation, biomonitoring.

References

- 1 Sanger, P., & Splittgerber, V. (2016). *The City Tree: A Vertical Plant Filter for Enhanced Temperature Management*. Innovation in Climate Change Adaptation. Springer, Cham, 75–85.
- 2 Mamatkulov, U.K., Baitulin, I.O., & Nestereva, S.G. (1998). *Mokhoobraznye Srednei Azii i Kazakhstana [Bryophytes of the Middle Asia and Kazakhstan]*. Almaty: Institute of Botany and Phytointroduction [in Russian].
- 3 Parshina, G.N., & Nestereva, S.G. (2006). *Bioraznoobrazie rastenii: uchebnik [Biodiversity of plants: handbook]*. Almaty: Kazakh University [in Russian].
- 4 Kłos, A., Ziembik, Z., Rajfur, M., Dołhańczuk-Śródka, A., Bochenek, Z., Bjerke, J.W., & Świsłowski, P. (2018). Using moss and lichens in biomonitoring of heavy-metal contamination of forest areas in southern and north-eastern Poland. *Science of the Total Environment*, 627; 438–449.
- 5 Splittgerber, V., & Saenger, P. (2015). City tree: a vertical plant wall. *Air Pollution XXIII*, 295; 295–304.
- 6 World Health Organization (2006). *Air quality guidelines: global update 2005: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, and sulfur dioxide*. World Health Organization.
- 7 Krzyżanowski, M., Kuna-Dibbert, B., & Schneider, J. (2005). *Health effects of transport-related air pollution*. WHO Regional Office Europe.
- 8 Frahm, J., & Sabovljevic, M. (2007). Feinstaubreduzierung durch Moose. *Immissionsschutz-Berlin*, 12 (4); 152.
- 9 Tiede, R.I.I. (2015). *Nachhaltigkeit am Hamburger Hafen: Eine Studie über die Wirkung von Schiffsimmissionen auf die Gesundheit*. Thesis PhD, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hamburg.
- 10 Kappis, C. (2007) Studie zum wissenschaftlichen Erkenntnisstand über das Feinstaubfilterungspotential (qualitativ und quantitativ). *Von Pflanzen*, 15–18.
- 11 Roloff, A. (2013). Stadt-und Straßenbume der Zukunft–welche Arten sind geeignet. *Forstwiss Beitr Tharandt Beih*, 14; 173–187.
- 12 Thönnessen, M. (2006). Staubfilterung und immissionshistorische Aspekte am Beispiel fassadenbegrünenden Wilden Weines (*Parthenocissustris cuspidata*). *Umwelt wissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 18 (1); 5–12.
- 13 Adamo, P., Giordano, S., Naimo, D., & Bargagli, R. (2008). Geochemical properties of airborne particulate matter (PM10) collected by automatic device and biomonitors in a Mediterranean urban environment. *Atmospheric environment*, 42 (2); 346–357.
- 14 Vasconcelos, M.T.S.D., & Tavares, H.M.F. (1998). Atmospheric metal pollution (Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb and Zn) in Oporto city derived from results for low-volume aerosol samplers and for the moss *Sphagnum auriculatum* bioindicator. *Science of the total environment*, 212 (1); 11–20.
- 15 Giordano, S., Adamo, P., Spagnuolo, V., & Vaglieco, B.M. (2010). Instrumental and bio-monitoring of heavy metal and nanoparticle emissions from diesel engine exhaust in controlled environment. *Journal of Environmental Sciences*, 22 (9); 1357–1363.
- 16 Jeran, Z., Jacimovic, R., & Mikuz, P.P. (2003). Lichens and mosses as biomonitors. In *Journal de Physique IV*, 107; 675–678).
- 17 Limo, J., Paturi, P., & Makinen, J. (2018). Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations. *Atmospheric Environment*, 195; 187–195.
- 18 Harmens, H., Foan, L., Simon, V., & Mills, G. (2013). Terrestrial mosses as biomonitors of atmospheric POPs pollution: a review. *Environmental Pollution*, 173; 245–254.
- 19 Giordano, S., Adamo, P., Spagnuolo, V., Tretiach, M., & Bargagli, R. (2013). Accumulation of airborne trace elements in mosses, lichens and synthetic materials exposed at urban monitoring stations: towards a harmonisation of the moss-bag technique. *Chemosphere*, 90(2); 292–299.
- 20 Donato, A., Rinaldi, M., Paglione, M., Villani, M.G., Russo, F., Carbone, C., & Decesari, S. (2021). An evaluation of the performance of a green panel in improving air quality, the case study in a street canyon in Modena, Italy. *Atmospheric Environment*, 247; 118189.
- 21 Donovan, G.H., Jovan, S.E., Gatzliolis, D., Burstyn, I., Michael, Y.L., Amacher, M.C., & Monleon, V.J. (2016). Using an epiphytic moss to identify previously unknown sources of atmospheric cadmium pollution. *Science of the Total Environment*, 559, 84–93. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.182>
- 22 Vuković, G., Urošević, M. A., Škrivanj, S., Milićević, T., Dimitrijević, D., Tomašević, M., & Popović, A. (2016). Moss bag biomonitoring of airborne toxic element decrease on a small scale: a street study in Belgrade, Serbia. *Science of the Total Environment*, 542; 394–403.
- 23 Vuković, G., Urošević, M. A., Tomašević, M., Samson, R., & Popović, A. (2015). Biomagnetic monitoring of urban air pollution using moss bags (*Sphagnum girgensohnii*). *Ecological Indicators*, 52; 40–47.

- 24 Lazić, L., Urošević, M. A., Mijić, Z., Vuković, G., & Ilić, L. (2016). Traffic contribution to air pollution in urban street canyons: Integrated application of the OSPM, moss biomonitoring and spectral analysis. *Atmospheric Environment*, *141*; 347–360.
- 25 Macedo-Miranda, G., Avila-Pérez, P., Gil-Vargas, P., Zarazúa, G., Sánchez-Meza, J.C., Zepeda-Gómez, C., & Tejada, S. (2016). Accumulation of heavy metals in mosses: a biomonitoring study. *Springer Plus*, *5* (1); 1–13 <https://doi.org/10.1186/s40064-016-2524-7>
- 26 Stafilov, T., Šajn, R., Barandovski, L., Andonovska, K.B., & Malinovska, S. (2018). Moss biomonitoring of atmospheric deposition study of minor and trace elements in Macedonia. *Air Quality, Atmosphere & Health*, *11* (2); 137–152.
- 27 Goulden, M.L., & Crill, P.M. (1997). Automated measurements of CO₂ exchange at the moss surface of a black spruce forest. *Tree Physiology*, *17* (8–9); 537–542.
- 28 Capozzi, F., Adamo, P., Di Palma, A., Aboal, J.R., Bargagli, R., Fernandez, J.A., & Giordano, S. (2017). *Sphagnum palustre* clone vs native *Pseudoscleropodium purum*: A first trial in the field to validate the future of the moss bag technique. *Environmental Pollution*, *225*; 323–328.
- 29 Reskir R. (2016). *Passive contaminant sensor device used to sense air pollutants comprising polycyclic aromatic hydrocarbons or heavy metals or their compounds, comprises axenic devitalized Moss clone*. European Patent Application, EP 3 076 171 A1.
- 30 Zhao, W., Li, Z., Hu, Y., Wang, M., Zheng, S., Li, Q., & Sun, Y. (2019). Development of a method for protonema proliferation of peat moss (*Sphagnum squarrosum*) through regeneration analysis. *New Phytologist*, *221*(2); 1160–1171.
- 31 González, A.G., & Pokrovsky, O.S. (2014). Metal adsorption on mosses: toward a universal adsorption model. *Journal of colloid and interface science*, *415*; 169–178.
- 32 Beike, A.K., Spagnuolo, V., Lüth, V., Steinhart, F., Ramos-Gómez, J., Krebs, M., & Reski, R. (2015). Clonal in vitro propagation of peat mosses (*Sphagnum* L.) as novel green resources for basic and applied research. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, *120* (3); 1037–1049.
- 33 Gonzalez, A.G., Pokrovsky, O.S., Beike, A.K., Reski, R., Di Palma, A., Adamo, P., & Fernandez, J.A. (2016). Metal and proton adsorption capacities of natural and cloned *Sphagnum* mosses. *Journal of colloid and interface science*, *461*; 326–334.
- 34 Capozzi, F., Carotenuto, R., Giordano, S., & Spagnuolo, V. (2018). Evidence on the effectiveness of mosses for biomonitoring of microplastics in fresh water environment. *Chemosphere*, *205*, 1–7.
- 35 Gaudig, G., Krebs, M., Prager, A., Wichmann, S., Barney, M., Caporn, S.J.M., & Joosten, H. (2017). *Sphagnum* farming from species selection to the production of growing media: a review. *Mires and Peat*, *20* (18); 1–30.
- 36 Decker, E.L., & Reski, R. (2020). Mosses in biotechnology. *Current opinion in biotechnology*, *61*, 21–27.
- 37 Oliver, M.J., Velten, J., & Wood, A.J. (2000). Bryophytes as experimental models for the study of environmental stress tolerance: *Tortularia* and desiccation-tolerance in mosses. *Plant Ecology*, *151* (1); 73–84.
- 38 Barker, D.H., Stark, L.R., Zimpfer, J.F., Mclethie, N.D., & Smith, S.D. (2005). Evidence of drought induced stress on biotic crust moss in the Mojave Desert. *Plant, Cell & Environment*, *28*(7); 939–947.
- 39 Khraiwesh, B., Qudeimat, E., Thimma, M., Chaiboonchoe, A., Jijakli, K., Alzahmi, A., & Salehi-Ashtiani, K. (2015). Genome-wide expression analysis offers new insights into the origin and evolution of *Physcomitrella patens* stress response. *Scientific reports*, *5*(1); 1–15.
- 40 Waterman, M.J., Bramley-Alves, J., Miller, R.E., Keller, P.A., & Robinson, S.A. (2018). Photoprotection enhanced by red cell wall pigments in three East Antarctic mosses. *Biological Research*, *51*; 211–215.
- 41 Campos, M.L., Prado, G.S., Dos Santos, V.O., Nascimento, L.C., Dohms, S.M., da Cunha, N.B., & Dias, S.C. (2020). Mosses: versatile plants for biotechnological applications. *Biotechnology Advances*, *41*; 107533.
- 42 Decker, E.L., & Reski, R. (2020). Mosses in biotechnology. *Current opinion in biotechnology*, *61*; 21–27.
- 43 Nerlich, A., & Dannehl, D. (2021). Soilless cultivation: dynamically changing chemical properties and physical conditions of organic substrates influence the plant phenotype of lettuce. *Frontiers in Plant Science*, *2235*.
- 44 Dannehl, D., Suhl, J., Ulrichs, C., & Schmidt, U. (2015). Evaluation of substitutes for rock wool as growing substrate for hydroponic tomato production. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *88* (1); 23–28.
- 45 Emmel, M. (2005). Growing ornamental plants in *Sphagnum* biomass. *International Symposium on Growing Media*, *779*; 173–178.
- 46 Savich-Lubitskaia, L.I. (1952). *Flora sporovykh rastenii SSSR. T. 1. Listostebelnye mkhi (1). Sfgnovye (torfianye) mkhi [Flora of spore plants of the USSR. T. 1. Deciduous mosses (1). Sphagnum (peat) mosses]*. Moscow-Leningrad: Publishing house Academy of Sciences of USSR [in Russian].
- 47 Boch, M.S., & Smagin, V.A. (1993). *Flora i rastitelnost bolot Severo-Zapada Rossii i printsipy ikh okhrany [Flora and vegetation of swamps of the North-West of Russia and principles of their protection]*. Leningrad: Gidrometeoizdat [in Russian].
- 48 McCarter, C.P., & Price, J.S. (2014). Ecohydrology of *Sphagnum* moss hummocks: mechanisms of capitula water supply and simulated effects of evaporation. *Ecohydrology*, *7* (1); 33–44.
- 49 Gaudig, G., Fengler, F., Krebs, M., Prager, A., Schulz, J., Wichmann, S., & Joosten, H. (2014). *Sphagnum* farming in Germany—a review of progress. *Mires and Peat*, *13* (8); 1–11.
- 50 Stenøien, H., Bakken, S., & Flatberg, K.I. (1997). Phenotypic variation in the *Sphagnum recurvum* complex: a cultivation experiment. *Journal of Bryology*, *19* (4); 731–750.
- 51 Antropova, T.A. (1974). *Izuchenie temperaturnoi adaptatsii na kletki nekotorykh vidov mkhov [Study of temperature adaptation on cells of some mosses species]*. *Tsitologiya — Cytology*, *16*; 38–42 [in Russian].

52 Shuvalov, V.N. (2022). *Vse sekrety vyrashchivaniia rastenii: Chto takoe mokh Sphagnum: kak ispolzovat eto rastenie [All secrets of plant cultivation: What is moss Sphagnum: How to use this plant]*. Retrieved from <https://klumba.guru/dikorastuschie-rasteniya/chto-takoe-moh-sphagnum-kak-ispolzovat-eto-rastenie.html> [in Russian].

53 Malmer, N., Albinsson, C., Svensson, B.M., & Wallén, B. (2003). Interferences between Sphagnum and vascular plants: effects on plant community structure and peat formation. *Oikos*, 100 (3); 469–482.

54 Harley, P.C., Tenhunen, J.D., Murray, K.J., & Beyers, J. (1989). Irradiance and temperature effects on photosynthesis of tussock tundra Sphagnum mosses from the foothills of the Philip Smith Mountains, Alaska. *Oecologia*, 79 (2); 251–259.