

З.А. Инелова¹ *, Д. Едилхан² , А.Е. Ермаков² , Д.К. Бисенгалиева² 

¹Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Казахстан, г. Алматы

²Astana IT University, Казахстан, г. Алматы

*e-mail: zarina.inelova@kaznu.edu.kz

ЭФФЕКТИВНОСТЬ ОЧИСТКИ ВОЗДУХА БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИМ ФИЛЬТРОМ НА ОСНОВЕ ЕСТЕСТВЕННОЙ РАСТИТЕЛЬНОЙ КУЛЬТУРЫ

Увеличение антропогенной деятельности является главным фактором, вызывающим изменения в климате, атмосфере, биосфере и криосфере Земли, которые непосредственно или косвенно влияют на экосистемы на локальном, региональном и глобальном уровнях. Основными газовыми загрязнителями антропогенного происхождения являются углекислый газ (CO₂), оксид углерода (CO), диоксид серы (SO₂), оксиды азота (NO_x), тяжелые металлы, а также твердые частицы PM_{2.5}, PM₁₀. Проблему по очистке воздуха от загрязняющих факторов можно решить биологическим путем, используя мох Сфагнум. Моховые культуры являются практичными, так как легко поглощают вещества из атмосферы своей поверхностью, не прихотливы в уходе, а также культивирование мха не требует длительного периода. Целью данной работы является определение эффективности растительной культуры мха, используемой в биотехнологическом фильтре, в качестве очистителя воздуха от загрязняющих веществ. Для проведения исследований выбран вид мха Sphagnum, который обладает высокой поглощающей способностью и способностью улавливать вредные вещества из окружающей среды, а также создан биотехнологический фильтр, который расположен на территории EXPO в городе Астана. Согласно полученным результатам, t не имеет значительных изменений со временем и имеет уровень в пределах от 26 до 37 °С. Уровень частиц PM_{2.5} и PM₁₀ (μg/m³) на входе и на выходе анализируемого объекта показывает, что в целом уровень этих частиц на выходе ниже, чем на входе. Уровень углекислого газа (CO₂) остается стабильным на уровне 0,01% на входе в биофильтр. Это может указывать на эффективную работу системы фильтрации или очистки воздуха, а также отсутствие серьезных источников выбросов CO₂. Экспериментальные данные подтвердили эффективность моховых культур в поглощении углекислого газа и выделении кислорода в дневной период. Это подчеркивает потенциал моховых растений, используемых в биотехнологическом фильтре, в качестве инструмента для смягчения проблемы изменения климата. Мхи представляют собой перспективный ресурс для улучшения качества воздуха и смягчения воздействия антропогенных факторов на окружающую среду.

Ключевые слова: мох Sphagnum, биотехнологический фильтр, тяжелые металлы, Smart City, очистка воздуха.

Z.A. Inelova^{1*}, D. Yedilkhan², A.Ye. Yermekov², D.K. Bissengaliyeva²

¹Al-Farabi Kazakh National University, Kazakhstan, Almaty

²Astana IT University, Kazakhstan, Astana

*e-mail: zarina.inelova@kaznu.edu.kz

Efficiency of air cleaning with a biotechnological filter based on natural plant culture

The increase in anthropogenic activity is the main factor causing changes in the climate, atmosphere, biosphere and cryosphere of the Earth. The main gas pollutants of anthropogenic origin are CO₂, CO, SO₂, NO_x, heavy metals, as well as solid particles PM_{2.5}, PM₁₀. The problem of air purification from pollutants can be solved biologically using Sphagnum moss. Moss crops are practical, as they easily absorb substances from the atmosphere with their surface, are not whimsical in care, and moss cultivation does not require a long period. The purpose of this work is to determine the effectiveness of a moss plant culture used in a biotechnological filter as an air purifier from pollutants. A species of Sphagnum moss has been selected for research, which has a high absorption capacity and the ability to capture harmful substances from the environment, and a biotechnological filter has been created, which is located on the territory of EXPO, Astana. According to the results obtained, t has no significant changes over time and has a level ranging from 26 to 37°C. The level of particles PM_{2.5} and PM₁₀ (μg/m³) at the input

lower than at the input. The level of carbon dioxide remains stable at 0.01% at the entrance to the biofilter. This may indicate the efficient operation of the purification system, as well as the absence of serious sources of CO₂ emissions. Experimental data have confirmed the effectiveness of moss in absorbing CO₂ and releasing oxygen during the daytime. This highlights the potential of moss plants used in the biotechnological filter as a tool to mitigate climate change. Mosses are a promising resource for improving air quality and mitigating the impact of anthropogenic factors on the environment.

Key words: moss Sphagnum, biotechnological filter, heavy metals, Smart City, air purification.

З.А. Инелова^{1*}, Д. Едилхан,² А.Е. Ермаков², Д.К. Бисенгалиева²

¹Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Қазақстан, Алматы қ.

²Astana IT University, Қазақстан, Астана қ.

*e-mail: zarina.inelova@kaznu.edu.kz

Табиғи өсімдік мәдениеті негізіндегі биотехнологиялық фильтрмен ауаны тазалаудың тиімділігі

Антропогендік белсенділіктің артуы жергілікті, аймақтық және жаһандық деңгейде экожүйелерге тікелей немесе жанама әсер ететін климаттың, атмосфераның, биосфераның және жердің криосферасының өзгеруін тудыратын негізгі фактор болып табылады. Антропогендік факторлар негізіндегі басты газды ластаушы заттар – көмірқышқыл газы (CO₂), көміртегі оксиді (CO), күкірт диоксиді (SO₂), азот оксидтері (NO_x), ауыр металдар, сондай-ақ PM_{2.5}, PM₁₀ қатты бөлшектер болып табылады. Ауаны ластаушы факторлардан тазарту мәселесін Sphagnum мүгінің көмегімен биологиялық жолмен шешуге болады. Мүк дақылдары практикалық болып табылады, өйткені олар атмосферадан заттарды өз денесімен оңай сіңіреді, күтімді талғамайды, сонымен қатар мүк өсіру ұзақ уақытты қажет етпейді. Бұл жұмыстың мақсаты биотехнологиялық фильтрде ауаны ластаушы заттардан тазартқыш ретінде қолданылатын мүк өсімдік дақылының тиімділігін анықтау болып табылады. Зерттеу жүргізу үшін қоршаған ортадан зиянды заттарды сіңіру қабілеті мен ұстау қабілеті жоғары Sphagnum мүгінің түрі таңдалды, сондай-ақ Астана қаласындағы ЕХРО аумағында орналасқан биотехнологиялық фильтрі жасалды. Алынған нәтижелерге сәйкес, t уақыт өте келе айтарлықтай өзгермейді және 26-дан 37°C-қа дейінгі деңгейге ие. Талданатын объектінің кірісі мен шығысындағы PM_{2,5} және PM₁₀ (µg/m³) бөлшектерінің деңгейі тұтастай алғанда бұл бөлшектердің шығысы кіріске қарағанда төмен екенін көрсетеді. Көмірқышқыл газының деңгейі (CO₂) биофильрге кіре берісте 0,01% тұрақты болып қалады. Бұл ауаны тазарту жүйесінің тиімді жұмысын және CO₂ шығарындыларының маңызды көздерінің жоқтығын көрсетуі мүмкін. Эксперименттік дәлелдер мүк дақылдарының көмірқышқыл газын сіңірудегі және күндізгі оттегін шығарудағы тиімділігін растады. Бұл климаттың өзгеруін азайту құралы ретінде биотехнологиялық фильтрде қолданылатын мүк өсімдіктерінің потенциалы бар екенін көрсетеді. Мүктер ауа сапасын жақсарту және антропогендік факторлардың қоршаған ортаға әсерін азайту үшін перспективті ресурс болып табылады.

Түйін сөздер: Sphagnum мүгі, биотехнологиялық фильтр, ауыр металдар, Smart City, ауа тазалау.

Сокращения и обозначения:

CO₂ – углекислый газ; CO – оксид углерода; SO₂ – диоксид серы; NO_x – оксиды азота; ПДК – предельно допустимая концентрация; NH₂OH – гидроксиламин; CH₄ – метан; нм – нанометр; µg/m³ – микрограмм на кубический метр

Введение

Увеличение антропогенной деятельности является главным фактором, вызывающим изменения в климате, атмосфере, биосфере и криосфере Земли, которые непосредственно или косвенно влияют на экосистемы на локальном, региональном и глобальном уровнях. До промышленной

революции загрязняющий фактор был связан с природными причинами, но с наступлением промышленной революции в 19 веке наша экосистема начала подвергаться загрязнению в разы больше. Увеличение загрязнения приводит к таким последствиям как засуха, увеличение пустыни, глобальное потепление, таяние ледников и др. [1-6] Развивающиеся страны стали более уязвимыми из-за демографического роста, быстрой индустриализации и развития мегаполисов. В результате, качество воздуха, воды и почвы ухудшается, а земли подвергаются деградации. Эти неблагоприятные последствия приводят к увеличению заболеваний дыхательной системы, желудочно-кишечного тракта и сердечно-сосудистой системы [7-9].

Основными газовыми загрязнителями антропогенного происхождения являются углекислый газ (CO_2), оксид углерода (CO), диоксид серы (SO_2), оксиды азота (NO_x). Кроме того, к загрязняющим агентам можно отнести тяжелые металлы, а также твердые частицы $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} . Нужно отметить, что частицы размером меньше 2,5 микрон пагубно влияют на дыхательную систему человека, проникая в глубь легких [10-11].

Согласно ежедневным данным бюллетени состояния воздушного бассейна №335 состояние атмосферного воздуха в г. Алматы на 1 декабря 2022 года было следующим. Концентрация частиц $\text{PM}_{2.5}$ превышало ПДК в 3,3 кратности, PM_{10} – 1,8, оксид углерода – 1,7, диоксид азота – 2,4, оксид азота – 1,3. [12].

Полученные показатели как пример демонстрируют высокий уровень превышения ПДК, что в последствии провоцирует болезни дыхательных путей или может привести к летальному исходу. В Казахстане в год около 16 тысяч смертей случаются из-за заболеваний, вызванных низким качеством воздуха. Такие данные привел представитель Программы развития ООН в Казахстане Якуп Бериш. В исследованиях CORE по выявлению степени заболеваемости болезнями верхних дыхательных путей, диагностирование с помощью спирометрии показало, что в Казахстане 6,7% населения страдают от хронической обструктивной болезни легких [13].

В целом если обратиться к статистическим показателям от Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам РК, они действительно подтверждают прогрессивную динамику совокупных выбросов парниковых газов в эквиваленте CO_2 – с 216,19 млн.т/год до 342,87 млн.т/год в период 1990-2020 гг., где пик выбросов с показателем 392,75 млн.т был в 2018 году [14] электроэнергетики с использованием угольных теплоэлектростанций является главным источником выбросов парниковых газов, достигнув показателя 940 тыс. тонн. в 2018 году. Например, в 2022 году электрическая энергия, вырабатываемая на тепловых электростанциях, сжигающий уголь, составляет 78,1% [15]. Далее, горно-металлургический сектор имеет второе место с объемом выбросов 760 тыс. тонн в год, за которым следуют нефтедобыча (520 тыс. тонн в год) и секторы транспорта и сельского хозяйства с объемами выбросов 320 тыс. тонн в год [16].

В большинстве городов Казахстана частные дома, использующие печи со сжиганием угля, являются источниками загрязнения воздуха мелкой пылью, образующий смог. Практически одна половина сжигаемого угля остается в виде золы, так как зольность колеблется в пределах 40-50% [17-18]. Зола, в виде мелкодисперсной пыли $\text{PM}_{2.5}$, образуют смог над городом. В столице страны согласно данным Бюро национальной статистики насчитывается 24 393 частных домов [19-20].

Глобальный средний показатель CO_2 в 2015 году приблизился к порогу 400 на уровне 399,4 частей на миллион [21]. Содержание углекислого газа в воздухе в 2021 году составлял примерно 419 частей, что является равным показателю 4 млн лет тому назад. Стоит отметить, что в тот период средняя температура была больше на $13,9^\circ\text{C}$, уровень моря выше на 24 м. Ученые утверждают, что содержание CO_2 в атмосфере Земли на данный момент является рекордным. Каждый год в атмосферу прибавляется около 40 миллиардов тонн углекислого газа [22-23].

В исследованиях [24] приведена информация об источниках выбросов и их влияния на здоровье человека (таблица 1).

Закись азота (N_2O) является одним из главных газов, которые уменьшают концентрацию озона (O_3) в стратосфере, что может привести к увеличению солнечной радиации, достигающей поверхности Земли, и увеличению температуры [25]. Согласно отчету Межправительственной группы экспертов по изменению климата (IPCC) за 2021 год, N_2O является третьим по важности парниковым газом после углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4). Он отличается от других парниковых газов тем, что его концентрация в атмосфере намного меньше, но его потенциал воздействия на глобальное потепление на единицу массы выше, чем у CO_2 или CH_4 [26-27].

Общепризнано, что окисление NH_2OH , нитрифицирующая денитрификация и гетеротрофная денитрифицирующая денитрификация были тремя основными путями образования N_2O в процессе биологической конверсии азота [28-29]. Это означает, что N_2O может выделяться из болотистых мест в результате биотрансформации с любым видом неорганических соединений азота в сточных водах [30].

Таблица 1 – Источники выбросов, пути проникновения, воздействие на здоровье

Загрязнитель воздуха	Источник	Токсикокинетика	Влияние на здоровье
PM	Автомобильные выхлопные газы, производство электроэнергии, мелкая пыль, жилые камины, грунтовые дороги и промышленные объекты	Нижняя дыхательная система (ингаляция)	Астма, бронхит, снижение функции легких, рак и отравление тяжелыми металлами
Pb	Бензин, плавка, аккумуляторы, производство стали	Органы и мягкие ткани (проглатывание и вдыхание)	Анемия, высокое кровяное давление, рак, неврологические расстройства и интеллектуальная дисфункция
SO ₂	Сжигание S-содержащего ископаемого топлива, нефтепереработка, производство серной кислоты, плавка	Дыхательная система (ингаляция)	Раздражение и воспаление тканей, хрипы, стеснение в груди или одышка, астма, бронхит и эмфизема
CO	Неполное сгорание топлива (60% от автотранспортных средств)	Система кровообращения (ингаляция)	Отравление NO ₂ , астма и снижение иммунитета организма
NO ₂	Высокотемпературные процессы горения (например, моторные двигатели)	Дыхательная система (ингаляция)	Отравление CO, стенокардия, неврологическая дисфункция, повреждение мозга, аномалии плода и удушье
O ₃	Фотохимические реакции между VOCs, NO ₂ и O ₂	Дыхательная система (ингаляция)	Экстремальное раздражение, воспаление легких, боль в груди, снижение эластичности легких, тошнота и временный кашель

Кроме того, болота могут быть подвержены антропогенному загрязнению оксидами азота, которые выделяются в результате промышленной деятельности, автомобильного транспорта и других источников [31-32]. Однако, если болота находятся в отдаленных местах от источников антропогенного загрязнения, то выделение оксидов азота может быть связано с естественными процессами, такими как нитрификация и денитрификация [33-35].

Некоторые исследования также показывают, что болота могут иметь роль в улавливании оксидов азота и других загрязнителей из атмосферы [36-37]. Таким образом, болота могут как выделять оксид азота, так и улавливать его из атмосферы в зависимости от многих факторов, включая условия окружающей среды и источники загрязнения [38].

Исследование [30] показывает, что на выбросы N₂O из построенных водно-болотных угодий влияют водный азот и растительная биомасса. Кроме того, исследование указывает на важность правильного выбора типа растений для поглощения соответствующих форм азота в водной среде в целях контроля выбросов N₂O

из сооруженных водно-болотных угодий при очистке азотистых сточных вод.

В исследованиях по изучению влияния потепления на поток N₂O в регионе Вечной мерзлоты Северо-Восточного Китая ученый Qian Ciu и другие [39] в ходе экспериментов по измерению оксида азота на минероторфных торфяниках, где доминируют моховые культуры как *Sphagnum* пришли к выводу, что пики N₂O приходились на середину августа и начала сентября из-за завершения вегетационного периода. В активной фазе роста мха, то есть июнь и июль, снижения уровня N₂O, вероятно, связано с поглощением минерального азота растительными культурами [40].

В лесах фотосинтез мхов составляет 10-50% общего поглощения углекислого газа [41].

Наземные растения играют важную роль в поглощении углекислого газа, азота из воздуха [42]. Из-за медленного роста мха сфагнума в летний период, в процессе дыхания он поглощает небольшое количество углекислого газа. В переувлажненной среде мох образуя торф замедляется в дыхании, то есть поглощении углекислого газа уменьшается в разы. Но образуемые обширные торфяные болота способны погло-

щать большое количество углекислого газа из воздуха [43-44].

Результаты работ ученых Bhagawan Bharali1 и Jeffrey W. Bates показывают, что добавление побегов моховых культур позволяет ускорить процесс трансформации SO_2 до безвредных сульфат-ионов или сульфидов. Потеря бисульфита происходит за счет процессов окисления с помощью метаболической энергии, клеточной абсорбции и детоксикации SO_2 в метаболизме [45].

Мхи значительно отличаются по морфологии и анатомии от сосудистых растений, так как не имеют такие ткани как ксилема и флоэма. Мхи являются катионообменником, за счет способности абсорбировать вещества из воздуха. Бактериальная пленка, образованная на поверхности мха, позволяет им трансформировать неорганические вещества, в том числе твердые частицы (PM 2,5 и 10) в доступную органическую форму [46].

В городской атмосфере содержится множество токсичных тяжелых металлов, таких как цинк (Zn), кадмий (Cd), медь (Cu) и свинец (Pb), которые могут накапливаться в организме человека при контакте через кожу, попадании внутрь организма, например, через абсорбцию, проглатывание или вдыхание [47]. Когда тяжелые металлы попадают в систему питания человека через водоснабжение или пищу, они могут вызвать серьезные проблемы со здоровьем. Эти металлы имеют высокую токсичность и стойкость в окружающей среде, что означает, что они могут накапливаться в теле человека и вызывать различные заболевания и нарушения функций органов [48]. Поступление тяжелых металлов, таких как Cd, Zn, Cu и Pb, в организм человека через пищеварение или вдыхание может вызывать различные заболевания и нарушения функций органов, такие как сердечно-сосудистые заболевания, дисфункция легких, повреждение нервной системы и инфекции печени. Учитывая высокую токсичность тяжелых металлов и их вредное воздействие на здоровье человека, необходимо принимать меры по снижению концентрации этих металлов в окружающей среде, особенно в воздухе и почве.

Моховые культуры в течение многих лет широко используются для проведения мониторинга тяжелых металлов [49-51] и полициклических ароматических углеводородов [52-53]. Мхи вида *Sphagnum* наряду с видами *Hypnum*, ввиду своих морфологических и физико-химических свойств применяются в методе мешки с мхами [54-56].

Главным механизмом биоаккумуляции тяжелых металлов в мхах является ионный обмен, который позволяет металлам накапливаться внутри клеточных структур мхов. Этот процесс подтверждается участием гидроксильных, аминных и карбонильных групп в процессе биосорбции катионов металлов [57].

Впервые для мониторинга радиоцезий в воздухе после аварии на атомной электростанции Фукусима Дайити в 2011 г. ученые из Японии использовали мешки со мхом [58]. Для мониторинга радиоцезия были выбраны три вида мха: *Sphagnum palustre*, *Hypnum cupressiforme* и *Hypnum plumaeforme*. В ходе экспериментов было выявлено, что все три вида мхов смогли определить наличие радиоцезия в воздухе спустя 8 лет после аварии на атомной электростанции. Мох *S. palustre* оказался наилучшим биосенсором для накопления радиоцезия, при этом он демонстрировал высокую чувствительность к различению мест воздействия на основе их уровня загрязнения.

В годовом отчете за 2022 г. по научному проекту BR10965311 «Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепте Smart City» были опубликованы результаты экспериментов по наличию тяжелых металлов (Pb, Cd, Zn, Cu, Fe, Ni, Co, Mn, Cr) в воздухе г. Астана с помощью мешочков со мхом Сфагнум. В целом, все показатели не превышали значения ПДК, за исключением свинца, который находился на уровне предельно допустимой концентрации.

Президентом Республики Казахстан 2 февраля 2023 года издан №121 указ об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Казахстаном до 2060 года [59]. В разработанной Доктрине по достижению углеродной нейтральности в 2060 году Министерством экологии, геологии и природных ресурсов упоминаются два крупных эмиттеров парниковых газов: интенсификация животноводства и развитие промышленности в отрасли металлургии, нефтегаза, производства цемента и др. Для сведения выбросов к нулю запланировано увеличение лесных насаждений, а также разработка технологий по улавливанию и хранению углерода.

Проблему по очистке воздуха от загрязняющих факторов, которым подвергается каждый житель мегаполисов, можно решить биологическим путем, используя мох Сфагнум. Моховые культуры являются практичными, так как

легко поглощают вещества из атмосферы своей поверхностью, не прихотливы в уходе, а также культивирование мха не требует длительного периода. Культуры криптогамических покровов, в том числе мхи, согласно исследованиям [60] поглощают столько же CO_2 , сколько выделяются в результате сжигания лесов ежегодно. Также они отличаются высокой способностью ассимилировать углекислый газ при наличии грунтовых вод или осадков [61].

Целью данной работы является определение эффективности растительной культуры мха, используемой в биотехнологическом фильтре, в качестве очистителя воздуха от загрязняющих веществ.

Материалы и методы исследования

Для проведения исследований выбран вид мха *Sphagnum*, который обладает высокой поглощающей способностью и способностью улавливать вредные вещества из окружающей среды. Создан биотехнологический фильтр (ферма) в

условиях закрытой системы, который содержит выбранный мох и обеспечивает поток воздуха через него (Рисунок 1). Мхи размещены на стеллажах на поверхности почвенном субстрате, для обеспечения оптимальной контактной поверхности. Установка состоит из восьми вертикальных лотков по двум противоположным сторонам, по четыре на каждой. Размер вертикального лотка составляет 95x90 см. Между вертикальными лотками установлены шесть горизонтальных лотков. Размер горизонтального лотка – 80x80 см. Лотки изготовлены из нержавеющей стали и покрашены полимерной краской. Общая высота фермы – 270 см, занимаемая площадь 3,24 м². Культура укладывается в лотки поверх выбранного субстрата. Субстраты: сухой мох сфагнум, коксовый субстрат, почва. Для фиксации мха и субстрата при вертикальном выращивании применяется сетка.

Биотехнологический фильтр расположен на территории ЕХРО в городе Астана. Фильтр находится вне тени зданий, в проветриваемом месте.



Рисунок 1 – Биотехнологический фильтр

Для орошения культуры имеется резервуар установленный под горизонтальными лотками. Объем резервуара составляет 0,32 м³. Над каждым горизонтальным лотком установлен опрыскиватель воды. По периметру лотка монтированы оцинкованные листы для изоляции от брызг воды. При вертикальном выращивании мха над каждым лотком предусмотрены отверстия для орошения культур. Вода подается в опрыскиватели с помощью насоса для воды. Лотки, как вертикальные, так и горизонтальные, выдвигаются для удобной эксплуатации. Все условия (норма воды, влажность, температура, освещение) для выращивания культуры контролируются с помощью автоматизированного контроллера.

Температура

В ходе исследования был выявлен температурный режим для сфагнумов 3-22°C in vivo или 10-20°C in vitro [62]. Днем оптимальная температура воздуха для выращивания сфагнума в закрытой системе является 22±1°C, ночью 16±1°C, световой период 16 часов, относительная влажность 85±15%. Так как сфагнум является многолетним растением, он способен уходить в зимний покой [63]. Экономически невыгодно вводить культуру в покой в зимний период, так как постоянное охлаждение воздуха требует дополнительных затрат. Кроме того, эффективность мха в очищении воздуха снижается до минимального уровня в период покоя.

Полив

В вертикальном и горизонтальном методах выращивания мха увлажнение субстрата обеспечивается с помощью автоматического орошения. В вертикальной системе выращивания мха орошение установлено в верхней части лотка. В связи с вертикальным расположением излишки воды будут стекать под влиянием силы тяжести сверху вниз в накопительную емкость. При горизонтальном выращивании мха в лотках предусмотрены отверстия для стекания излишек воды с одного уровня на другой, в целях недопущения переувлажнения. Подача воды в лотки происходит в течение одной минуты. Тем самым, культура и субстрат насыщаются влагой в достаточной мере.

Влажность

За счет логических систем контроллеров влажность воздуха поддерживается на уровне 80%. Испарение влаги от системы полива обеспечивает в достаточной мере уровень увлажнения воздуха в биотехнологическом фильтре. В случае недостаточного уровня, увлажнения воз-

духа компенсируется за счет встроенного увлажнителя. Увлажнитель воздуха контролируется с помощью логических контроллеров.

Освещение

Освещение мха в вертикальных лотках обеспечивается естественным путем. У мха, выращиваемый в горизонтальном положении, нет доступа к естественным источникам света. И поэтому он освещается искусственно, специальными лампами в течение 16 часов в летний период. С середины осени до начала весны можно уменьшить период освещения с 16 часов в день до 10-12 часов. Освещение осуществляется с помощью светодиодного фитосветильника FitoLED 20 модели ДСП 02-20-003. Длина волны hyper red составляет 660 нм, deep blue – 451 нм. Фитолампы размещены на высоте 35 см от мха. Каждый лоток освещается двумя фитолампами.

Субстрат

В качестве субстрата для выращивания мха в горизонтальном положении с учетом экономической эффективности выбрана почва типа чернозем. Также можно использовать почвы с торфяными остатками. Для вертикального выращивания почвенный субстрат не будет подходить из-за сыпучего агрегатного состояния. В данном методе целесообразно использовать сфагнум высушенный с помощью закрепления его на сетку.

Согласно исследованиям [64] высота субстрата должна составлять не более 1 см. Так как мох способен абсорбировать тяжелые металлы в больших концентрациях, его следует заменять каждые 5-6 месяцев [65-66].

Загрязненный воздух, поступивший в биотехнологический фильтр измеряются начальные концентрации загрязнителей и устанавливается поток воздуха через биотехнологический фильтр. Замер показателей уровня углекислого газа проводится на входе и выходе с помощью газоанализатора многокомпонентного МАГ-6. После прохождения через биотехнологический фильтр в течение определенного периода времени измеряются концентрации газа на выходе. Сравниваются начальные и конечные концентрации для определения эффективности очищения воздуха мхами. PM_{2,5} и PM₁₀ частицы измерялись с помощью пылемеров PM 2,5-10

Результаты исследования и их обсуждение

В таблицах 2, 3 представлены данные об уровне загрязнения воздуха на протяжении 2 недель в июле 2023 года.

Таблица 2 – Уровень загрязнения воздуха мелкодисперсной пылью PM2,5 и PM10 на входе и выходе биотехнологического фильтра за две недели

Дата	сред. t дня, С	PM2,5, µg/m ³			PM10, µg/m ³		
		на входе	на выходе	разница	на входе µg/m ³	на выходе	разница
17.07.2023	36	11	10,56	0,44	10	9,6	0,4
18.07.2023	37	8	7,84	0,16	12	11,76	0,24
19.07.2023	30	9	8,55	0,45	11	10,67	0,33
20.07.2023	28	10	9,4	0,6	16,2	14,74	1,46
21.07.2023	29	15	13,5	1,5	18	17,1	0,9
22.07.2023	28	8,7	7,83	0,87	14,5	13,195	1,305
23.07.2023	29	6	5,46	0,54	11	9,9	1,1
24.07.2023	28	9	8,1	0,9	12	11,4	0,6
25.07.2023	28	5,3	5,04	0,27	9	8,64	0,36
26.07.2023	26	5,6	4,98	0,62	8,9	8,01	0,89
27.07.2023	27	3,4	3,26	0,14	12	10,8	1,2
28.07.2023	29	9	8,82	0,18	14,1	13,82	0,28
29.07.2023	32	8,7	8,15	0,55	8,9	7,9	1
30.07.2023	32	8	7,76	0,24	10	9,4	0,6

Таблица 3 – Уровень углекислого газа на входе и выходе биотехнологического фильтра за две недели (% объемной доли CO₂ – 0,01 равняется 184,84 мг/м³)

CO ₂ , % об.д.				
дата	сред.Т дня, С	на входе	на выходе	разница
17.07.2023	36	0,01	0,01	0
18.07.2023	37	0,02	0,01	0,01
19.07.2023	30	0,02	0,01	0,01
20.07.2023	28	0,03	0,02	0,01
21.07.2023	29	0,01	0,01	0
22.07.2023	28	0,02	0,01	0,01
23.07.2023	29	0,02	0,01	0,01
24.07.2023	28	0,01	0,01	0
25.07.2023	28	0,02	0,01	0,01
26.07.2023	26	0,01	0	0,01
27.07.2023	27	0,01	0,01	0
28.07.2023	29	0,03	0,01	0,02
29.07.2023	32	0,01	0,01	0
30.07.2023	32	0,01	0	0,01

Из таблицы 2 видно, что среднесуточная температура (сред. t дня, С) остается на уровне от 26 до 37 градусов Цельсия в течение двух недель.

Температура не имеет значительных изменений со временем. Уровень частиц PM2,5 и PM10 (µg/m³) на входе и на выходе анализируемого объек-

та показывает, что в целом уровень этих частиц на выходе ниже, чем на входе. Разница между входом и выходом колеблется в пределах от 0,16 до 1,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для PM_{2,5} и от 0,24 до 1,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ для PM₁₀.

Уровень углекислого газа (CO_2) в воздухе также мониторится, и процент его объемной доли остается стабильным на уровне 0,01% на входе в биофильтр. Разница углекислого газа на входе и выходе биотехнологического фильтра колеблется в пределах 0-0,02 %об.д. Можно отметить, что разница между показаниями на входе и на выходе для всех параметров (PM_{2,5}, PM₁₀ и CO_2) довольно небольшая и в большинстве случаев не превышает 0,1 единицы. Это может указывать на эффективную работу системы фильтрации или очистки воздуха, а также отсутствие серьезных источников выбросов CO_2 .

Важно также отметить, что уровень углекислого газа (CO_2) в пределах 0,01-0,03% объемных долей (184,84-554,52 mg/m^3) находится в пределах допустимой нормы для воздуха на открытом воздухе. Этот низкий уровень загрязнения воздуха в области, охватываемой биотехнологическим фильтром, объясняется его удаленностью от источников загрязнения.

Заключение

Экспериментальные данные подтвердили эффективность моховых культур в поглощении углекислого газа и выделении кислорода в дневной период. Это подтверждает ранее

опубликованные литературные источники и подчеркивает потенциал моховых растений, используемых в биотехнологическом фильтре, в качестве инструмента для смягчения проблемы изменения климата. Кроме того, мхи, используемые в качестве растительных агентов, выполняют важную функцию в поглощении мелкодисперсной пыли и преобразовании ее в органические остатки. Этот процесс способствует улучшению качества воздуха в близлежащей территории и может иметь положительное воздействие на здоровье человека и экосистемы.

В целом, результаты исследования подтверждают важность дальнейших исследований и разработки методов улучшения эффективности биотехнологического фильтра в экологических и климатических программах. Мхи представляют собой перспективный ресурс для улучшения качества воздуха и смягчения воздействия антропогенных факторов на окружающую среду.

Источник финансирования

Данное исследование выполнено при финансовой поддержке Комитета науки МОН РК, договор №365 от 07.09.2021 г. на программно-целевого финансирования на 2021–2023 годы: научный проект №BR10965311 «Разработка интеллектуальных информационно-телекоммуникационных систем для городской инфраструктуры: транспорт, экология, энергетика и аналитика данных в концепции Smart City».

Литература

1. Raghuvanshi S. P., Chandra A., Raghav A. K. Carbon dioxide emissions from coal based power generation in India // *Energy Conversion and Management*. – 2006. – Vol.47. – No. 4. – С. 427-441.
2. Wittig R. et al. A study of climate change and anthropogenic impacts in West Africa // *Environmental Science and Pollution Research-International*. – 2007. – Vol.14. – P. 182-189.
3. Bradshaw R. H. W. Past anthropogenic influence on European forests and some possible genetic consequences // *Forest Ecology and Management*. – 2004. – Vol.197. – No. 1-3. – P. 203-212.
4. Prasad A. K., Singh R. P. Changes in Himalayan snow and glacier cover between 1972 and 2000 // *Eos, Transactions American Geophysical Union*. – 2007. – Vol.88. – No. 33. – P. 326-326.
5. Gautam R. et al. Enhanced pre-monsoon warming over the Himalayan-Gangetic region from 1979 to 2007 // *Geophysical Research Letters*. – 2009. – Vol. 36. – No. 7.
6. Douville H. et al. Anthropogenic influence on multidecadal changes in reconstructed global evapotranspiration // *Nature Climate Change*. – 2013. – Vol. 3. – No. 1. – P. 59-62.
7. Balakrishnan K. et al. The impact of air pollution on deaths, disease burden, and life expectancy across the states of India: the Global Burden of Disease Study 2017 // *The Lancet Planetary Health*. – 2019. – Vol. 3. – No. 1. – P. e26-e39.
8. Sarkodie S. A., Owusu P. A. Impact of meteorological factors on COVID-19 pandemic: Evidence from top 20 countries with confirmed cases // *Environmental Research*. – 2020. – Vol. 191. – P. 110101.)
9. Somani M. et al. Indirect implications of COVID-19 towards sustainable environment: an investigation in Indian context // *Bioresource Technology Reports*. – 2020. – Vol. 11. – P. 100491.
10. Verdin A. et al. An in vitro model to evaluate the impact of environmental fine particles (PM_{0.3-2.5}) on skin damage // *Toxicology Letters*. – 2019. – Vol. 305. – P. 94-102.

11. Liu Y. et al. Health impact assessment of PM_{2.5} attributable mortality from the September 2020 Washington State Wildfire Smoke Episode //medRxiv. – 2020.
12. Ежедневный бюллетень состояния воздушного бассейна (НМУ) – URL: <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhednevnyu-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-basseyna-nmu/2022> (дата обращения: 31.08.2023)
13. Nugmanova D. et al. The prevalence, burden and risk factors associated with chronic obstructive pulmonary disease in Commonwealth of Independent States (Ukraine, Kazakhstan and Azerbaijan): Results of the CORE study //BMC Pulmonary Medicine. – 2018. – Vol. 18. – No. 1. – P. 1-14.
14. Выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух – URL: https://old.stat.gov.kz/for_users/ecologic_indicators/ecologic_indicator/air_pollutant_emissions (дата обращения: 31.08.2023)
15. Как уменьшить выбросы парниковых газов и снизить угольную зависимость энергетики РК? – URL: <https://ranking.kz/reviews/industries/kak-umenshit-vybrosy-parnikovyyh-gazov-i-snizit-ugolnyuyu-zavisimost-energetiki-rk.html> (дата обращения: 31.08.2023)
16. Казахстан превысил лимит выбросов парниковых газов: какие регионы "дымят" больше всех – URL: <https://ru.sputnik.kz/20191224/kazakhstan-parnikovyye-gazy-12359282.html>. (дата обращения: 31.08.2023)
17. Казахстанскому углю прописали обогащение – URL: <https://kz.kursiv.media/2020-03-09/kazakhstanskomu-uglyu-propisali-obogaschenie/> (дата обращения: 31.08.2023)
18. Askarova A. et al. Computational modeling of pollutants in furnaces of pulverized coal boilers of the republic of Kazakhstan //Energy. – 2022. – Vol. 258. – P. 124826.
19. Статистика жилищного фонда (2022 г.) – URL: https://new.stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-inno-build/publications/14121/?sphrase_id=53829 (дата обращения: 31.08.2023)
20. Токаев провел совещание по развитию Астаны – URL: <https://www.zakon.kz/6383032-tokaev-provel-soveshchanie-po-razvitiyu-astany.html> (дата обращения: 31.08.2023)
21. Blunden J., Arndt D. S. State of the climate in 2015 //Bulletin of the American Meteorological Society. – 2016. – VOL. 97. – No. 8. – P. Si-S275.
22. Carbon dioxide peaks near 420 parts per million at Mauna Loa observatory – URL: <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/Coronavirus-response-barely-slows-rising-carbon-dioxide> (дата обращения: 31.08.2023)
23. European Commission, 2020. Global CO₂ emissions continue to rise but EU bucks global trend. Brussels. Available – URL: <https://ec.europa.eu/newsroom/eusciencehubnews/redirection/item/688753/169>. (дата обращения: 31.08.2023)
24. Kim K. H. et al. Toward a better understanding of the impact of mass transit air pollutants on human health //Chemosphere. – 2017. – Vol. 174. – P. 268-279.
25. Ravishankara A. R., Daniel J. S., Portmann R. W. Nitrous oxide (N₂O): the dominant ozone-depleting substance emitted in the 21st century //science. – 2009. – Vol. 326. – No. 5949. – P. 123-125.
26. Изменение климата, 2021 год – URL: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Russian.pdf (дата обращения: 31.08.2023)
27. Myhre G., Shindell D., Pongratz J. Anthropogenic and natural radiative forcing. – 2014.
28. Blum, J.M., Su, Q., Ma, Y., Valverde-Pérez, B., Domingo-Felez, C., Jensen, M.M., Smets, B.F., 2018. The pH dependency of N-converting enzymatic processes, pathways and microbes: effect on net N₂O production. Environ. Microbiol. 20 (5), 1623–1640.
29. Park, S., Pérez, T., Boering, K., Trumbore, S.E., Gil, J., Marquina, S., Tyler, S., 2011. Can N₂O stable isotopes and isotopomers be useful tools to characterize sources and microbial pathways of N₂O production and consumption in tropical soils? Global Biogeochem. Cycles 25 (1).
30. Cai Z. X. et al. Interactive effects of aquatic nitrogen and plant biomass on nitrous oxide emission from constructed wetlands //Environmental Research. – 2022. – Vol. 213. – P. 113716.
31. Newland M. J. et al. Low-NO atmospheric oxidation pathways in a polluted megacity //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2021. – Vol. 21. – No. 3. – P. 1613-1625.
32. Melamed M. L. et al. Detection of pollution transport events southeast of Mexico City using ground-based visible spectroscopy measurements of nitrogen dioxide //Atmospheric Chemistry and Physics. – 2009. – Vol. 9. – No. 14. – P. 4827-4840.
33. Caranto J. D., Lancaster K. M. Nitric oxide is an obligate bacterial nitrification intermediate produced by hydroxylamine oxidoreductase //Proceedings of the National Academy of Sciences. – 2017. – Vol. 114. – No. 31. – P. 8217-8222.
34. Kampschreur M. J. et al. Unraveling the source of nitric oxide emission during nitrification //Water Environment Research. – 2007. – Vol. 79. – No. 13. – P. 2499-2509.
35. Shen J., Zerkle A. L., Claire M. W. Nitrogen cycling and biosignatures in a hyperarid mars analog environment // Astrobiology. – 2022. – Vol. 22. – No. 2. – P. 127-142.
36. Hoffmann C. C., Kronvang B., Audet J. Evaluation of nutrient retention in four restored Danish riparian wetlands // Hydrobiologia. – 2011. – Vol. 674. – P. 5-24.
37. Ji G. et al. Constructed subsurface flow wetland for treating heavy oil-produced water of the Liaohe Oilfield in China // Ecological Engineering. – 2002. – Vol. 18. – No. 4. – P. 459-465.
38. Song L. et al. The interaction between vegetation types and intensities of freeze-thaw cycles during the autumn freezing affected in-situ soil N₂O emissions in the permafrost peatlands of the Great Hinggan Mountains, Northeastern China //Atmospheric Environment: X. – 2022. – Vol. 14. – P. 100175.
39. Cui Q. et al. Effects of warming on N₂O fluxes in a boreal peatland of Permafrost region, Northeast China //Science of the Total Environment. – 2018. – Vol. 616. – P. 427-434.

40. Jiang C. et al. Short-term effect of increasing nitrogen deposition on CO₂, CH₄ and N₂O fluxes in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China // *Atmospheric Environment*. – 2010. – Vol. 44. – No. 24. – P. 2920-2926.
41. Goulden M. L., Crill P. M. Automated measurements of CO₂ exchange at the moss surface of a black spruce forest // *Tree physiology*. – 1997. – Vol. 17. – No. 8-9. – P. 537-542.)
42. Köster K. et al. Contrasting effects of reindeer grazing on CO₂, CH₄, and N₂O fluxes originating from the northern boreal forest floor // *Land Degradation & Development*. – 2018. – Vol. 29. – No. 2. – P. 374-381.
43. Bonn A. et al. (ed.). *Peatland restoration and ecosystem services: science, policy and practice*. – Cambridge University Press, 2016.
44. Niemi R. et al. Elevated UV-B radiation alters fluxes of methane and carbon dioxide in peatland microcosms // *Global Change Biology*. – 2002. – Vol. 8. – No. 4. – P. 361-371.
45. Bharali B., Bates J. W. Detoxification of dissolved SO₂ (bisulfite) by terricolous mosses // *Annals of Botany*. – 2006. – Vol. 97. – No. 2. – P. 257-263.
46. Frahm J., Sabovljevic M. Feinstaubreduzierung durch Moose // *IMMISSIONSSCHUTZ-BERLIN*. – 2007. – Vol. 12. – No. 4. – P. 152.
47. Hu Y. et al. Bioaccumulation of heavy metals in plant leaves from Yan' an city of the Loess Plateau, China // *Ecotoxicology and environmental safety*. – 2014. – Vol. 110. – P. 82-88.
48. Micó C. et al. Assessing heavy metal sources in agricultural soils of an European Mediterranean area by multivariate analysis // *Chemosphere*. – 2006. – Vol. 65. – No. 5. – P. 863-872.
49. Capozzi F. et al. Sphagnum palustre clone vs native Pseudoscleropodium purum: A first trial in the field to validate the future of the moss bag technique // *Environmental Pollution*. – 2017. – VOL. 225. – P. 323-328.
50. Di Palma A. et al. Atmospheric particulate matter intercepted by moss-bags: Relations to moss trace element uptake and land use // *Chemosphere*. – 2017. – VOL. 176. – P. 361-368.
51. Ștefănuț S. et al. National environmental quality assessment and monitoring of atmospheric heavy metal pollution-a moss bag approach // *Journal of environmental management*. – 2019. – VOL. 248. – P. 109224.
52. Aboal J. R. et al. Testing a novel biotechnological passive sampler for monitoring atmospheric PAH pollution // *Journal of hazardous materials*. – 2020. – VOL. 381. – P. 120949.
53. Capozzi F. et al. Implication of vitality, seasonality and specific leaf area on PAH uptake in moss and lichen transplanted in bags // *Ecological Indicators*. – 2020. – VOL. 108. – P. 105727.
54. Ares A. et al. Moss bag biomonitoring: a methodological review // *Science of the Total Environment*. – 2012. – VOL. 432. – P. 143-158.
55. Beike A. K. et al. Clonal in vitro propagation of peat mosses (Sphagnum L.) as novel green resources for basic and applied research // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. – 2015. – VOL. 120. – P. 1037-1049.
56. González A. G., Pokrovsky O. S. Metal adsorption on mosses: toward a universal adsorption model // *Journal of colloid and interface science*. – 2014. – VOL. 415. – P. 169-178.
57. Świsłowski P. et al. Bioaccumulation of Trace Elements from Aqueous Solutions by Selected Terrestrial Moss Species // *Biology*. – 2022. – VOL. 11. – No. 12. – P. 1692.
58. Di Palma A. et al. Testing mosses exposed in bags as biointerceptors of airborne radionuclides after the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Station accident // *Chemosphere*. – 2022. – VOL. 308. – P. 136179.
59. Указ Президента Республики Казахстан от 2 февраля 2023 года № 121 «Об утверждении Стратегии достижения углеродной нейтральности Казахстаном до 2060 года». – 2023.
60. Elbert W. et al. Contribution of cryptogamic covers to the global cycles of carbon and nitrogen // *Nature Geoscience*. – 2012. – VOL. 5. – No. 7. – P. 459-462.
61. Robroek B. J. M. et al. Interactive effects of water table and precipitation on net CO₂ assimilation of three co-occurring Sphagnum mosses differing in distribution above the water table // *Global Change Biology*. – 2009. – VOL. 15. – No. 3. – P. 680-691.
62. Антропова VOL. A. Изучение температурной адаптации на клетки некоторых видов мхов // *Цитология*. – 1974. – VOL. 16. – P. 38-42.
63. Zhao W. et al. Development of a method for protonema proliferation of peat moss (Sphagnum squarrosum) through regeneration analysis // *New Phytologist*. – 2019. – VOL. 221. – No. 2. – P. 1160-1171.
64. Stenøien H., Bakken S., Flatberg K. I. Phenotypic variation in the Sphagnum recurvum complex: a cultivation experiment // *Journal of Bryology*. – 1997. – VOL. 19. – No. 4. – P. 731-750.
65. Limo J., Paturi P., Mäkinen J. Magnetic biomonitoring with moss bags to assess stop-and-go traffic induced particulate matter and heavy metal concentrations // *Atmospheric Environment*. – 2018. – VOL. 195. – P. 187-195.
66. Beike A. K. et al. Clonal in vitro propagation of peat mosses (Sphagnum L.) as novel green resources for basic and applied research // *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*. – 2015. – VOL. 120. – No. 3. – P. 1037-1049.

References

1. “06/01932 Carbon Dioxide Emissions from Coal Based Power Generation in India.” *Fuel and Energy Abstracts*, vol. 47, no. 4 (2006): pp. 427-441. [https://doi.org/10.1016/s0140-6701\(06\)81938-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6701(06)81938-7).
2. Aboal, J.R., E. Concha-Graña, F. De Nicola, S. Muniategui-Lorenzo, P. López-Mahía, S. Giordano, F. Capozzi, et al. “Testing a Novel Biotechnological Passive Sampler for Monitoring Atmospheric PAH Pollution.” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 381 (2020): P. 120949. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120949>.

3. “Anthropogenic and Natural Radiative Forcing.” *Climate Change 2013 – The Physical Science Basis*, 2014, pp. 659–740. <https://doi.org/10.1017/cbo9781107415324.018>.
4. Antropova, A. “Izucheniye Temperaturnoy Adaptatsii Na Kletki Nekotorykh Vidov Mkhov [Study of Temperature Adaptation to the Cells of Some Moss Species].” *Cytology*, vol. 16 (1974): pp. 38–42.
5. Ares, A., J.R. Aboal, A. Carballeira, S. Giordano, P. Adamo, and J.A. Fernández. “Moss Bag Biomonitoring: A Methodological Review.” *Science of The Total Environment*, vol. 432 (2012): pp. 143–58. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.05.087>.
6. Askarova, Aliya, Aleksandar Georgiev, Saltanat Bolegenova, Meruyert Beketayeva, Valeriyu Maximov, and Symbat Bolegenova. “Computational Modeling of Pollutants in Furnaces of Pulverized Coal Boilers of the Republic of Kazakhstan.” *Energy*, vol. 258 (2022): P. 124826. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124826>.
7. Beike, Anna K., Valeria Spagnuolo, Volker Lüth, Feray Steinhart, Julia Ramos-Gómez, Matthias Krebs, Paola Adamo, et al. “Clonal in Vitro Propagation of Peat Mosses (*Sphagnum* L.) as Novel Green Resources for Basic and Applied Research.” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 120, no. 3 (2015): pp. 1037–49. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0658-2>.
8. Beike, Anna K., Valeria Spagnuolo, Volker Lüth, Feray Steinhart, Julia Ramos-Gómez, Matthias Krebs, Paola Adamo, et al. “Clonal in Vitro Propagation of Peat Mosses (*Sphagnum* L.) as Novel Green Resources for Basic and Applied Research.” *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, vol. 120, no. 3 (2015): pp. 1037–49. <https://doi.org/10.1007/s11240-014-0658-2>.
9. BHARALI, BHAGAWAN, and JEFFREY W. BATES. “Detoxification of Dissolved SO₂ (Bisulfite) by Terricolous Mosses.” *Annals of Botany*, vol. 97, no. 2 (2006): pp. 257–63. <https://doi.org/10.1093/aob/mcj026>.
10. Blum, Jan-Michael, Qingxian Su, Yunjie Ma, Borja Valverde-Pérez, Carlos Domingo-Félez, Marlene Mark Jensen, and Barth F. Smets. “The Ph Dependency of N-Converting Enzymatic Processes, Pathways and Microbes: Effect on NET N₂O Production.” *Environmental Microbiology*, vol. 20, no. 5 (2018): pp. 1623–40. <https://doi.org/10.1111/1462-2920.14063>.
11. Bonn, Aletta, Tim Allott, Martin Evans, Hans Joosten, and Rob Stoneman. “Peatland Restoration and Ecosystem Services: An Introduction.” *Peatland Restoration and Ecosystem Services*, 2016, pp. 1–16. <https://doi.org/10.1017/cbo9781139177788.002>.
12. Bradshaw, Richard H.W. “Past Anthropogenic Influence on European Forests and Some Possible Genetic Consequences.” *Forest Ecology and Management*, vol. 197, no. 1–3 (2004): pp. 203–12. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.025>.
13. Cai, Ze-Xiang, Qu-Sheng Li, Heng Bai, Cong-Yun Zhu, Guan-Hui Tang, Huan-Zhan Zhou, Jia-Wei Huang, Xinshan Song, and Jun-Feng Wang. “Interactive Effects of Aquatic Nitrogen and Plant Biomass on Nitrous Oxide Emission from Constructed Wetlands.” *SSRN Electronic Journal*, 2022. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4118346>.
14. Capozzi, F., M.C. Sorrentino, A. Di Palma, F. Mele, C. Arena, P. Adamo, V. Spagnuolo, and S. Giordano. “Implication of Vitality, Seasonality and Specific Leaf Area on PAH Uptake in Moss and Lichen Transplanted in Bags.” *Ecological Indicators*, vol. 108 (2020): P. 105727. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105727>.
15. Capozzi, F., P. Adamo, A. Di Palma, J.R. Aboal, R. Bargagli, J.A. Fernandez, P. Lopez Mahia, et al. “Sphagnum Palustre Clone vs Native Pseudoscleropodium Purum : A First Trial in the Field to Validate the Future of the Moss Bag Technique.” *Environmental Pollution*, vol. 225 (2017): pp. 323–28. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.02.057>.
16. Caranto, Jonathan D., and Kyle M. Lancaster. “Nitric Oxide Is an Obligate Bacterial Nitrification Intermediate Produced by Hydroxylamine Oxidoreductase.” *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 114, no. 31 (2017): pp. 8217–22. <https://doi.org/10.1073/pnas.1704504114>.
17. “Climate Change 2021: The Physical Science Basis.” *The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)*. Accessed August 31. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
18. Cui, Qian, Changchun Song, Xianwei Wang, Fuxi Shi, Xueyang Yu, and Wenwen Tan. “Effects of Warming on N₂O Fluxes in a Boreal Peatland of Permafrost Region, Northeast China.” *Science of The Total Environment*, vol. 616–617 (2018): pp. 427–34. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.246>.
19. Di Palma, A., P. Adamo, T. Dohi, K. Fujiwara, H. Hagiwara, A. Kitamura, A. Sakoda, K. Sato, and K. Iijima. “Testing Mosses Exposed in Bags as Biointerceptors of Airborne Radiocaesium after the Fukushima Dai-Ichi Nuclear Power Station Accident.” *Chemosphere*, vol. 308 (2022): P. 136179. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.136179>.
20. Di Palma, Anna, Fiore Capozzi, Valeria Spagnuolo, Simonetta Giordano, and Paola Adamo. “Atmospheric Particulate Matter Intercepted by Moss-Bags: Relations to Moss Trace Element Uptake and Land Use.” *Chemosphere*, vol. 176 (2017): pp. 361–68. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.02.120>.
21. Douville, H., A. Ribes, B. Decharme, R. Alkama, and J. Sheffield. “Anthropogenic Influence on Multidecadal Changes in Reconstructed Global Evapotranspiration.” *Nature Climate Change* vol. 3, no. 1 (2012): pp. 59–62. <https://doi.org/10.1038/nclimate1632>.
22. Elbert, Wolfgang, Bettina Weber, Susannah Burrows, Jörg Steinkamp, Burkhard Büdel, Meinrat O. Andreae, and Ulrich Pöschl. “Contribution of Cryptogamic Covers to the Global Cycles of Carbon and Nitrogen.” *Nature Geoscience*, vol. 5, no. 7 (2012): pp. 459–62. <https://doi.org/10.1038/ngeo1486>.
23. “Ezhednevnyj Byulleten' Sostoyaniya Vozdushnogo Bassejna (NMU).” *Ezhednevnyj byulleten' sostoyaniya vozdushnogo bassejna (NMU) – Kazgidromet* [“Daily Air Basin Status Bulletin (NMU).” *Daily Air Basin Status Bulletin (NMU) – Kazhydromet*]. Accessed August 31, 2023. <https://www.kazhydromet.kz/ru/ecology/ezhednevnyy-byulleten-sostoyaniya-vozdushnogo-bassejna-nmu/2022>.
24. “European Commission, 2020. Global CO₂ Emissions Continue to Rise but EU Bucks Global Trend. Brussels.” *EUSCIENCEHUBNEWS – launch of the EU Award for Gender Equality Champions*. Accessed August 31, 2023. <https://ec.europa.eu/newsroom/eusciencehubnews/redirection/item/754442/default/169>.

25. Frahm, Jan-Peter, and Marko Sabovljevic. "Feinstaubreduzierung Durch Moose." *Immissionsschutz*, no. 4 (2007). <https://doi.org/10.37307/j.1868-7776.2007.04.03>.
26. Gautam, R., N. C. Hsu, K.-M. Lau, S.-C. Tsay, and M. Kafatos. "Enhanced Pre-Monsoon Warming over the Himalayan-Gangetic Region from 1979 to 2007." *Geophysical Research Letters*, vol. 36, no. 7 (2009). <https://doi.org/10.1029/2009gl0137641>.
27. González, A.G., and O.S. Pokrovsky. "Metal Adsorption on Mosses: Toward a Universal Adsorption Model." *Journal of Colloid and Interface Science*, vol. 415 (2014): pp. 169–78. <https://doi.org/10.1016/j.jcis.2013.10.028>.
28. Goulden, M. L., and P. M. Crill. "Automated Measurements of CO₂ Exchange at the Moss Surface of a Black Spruce Forest." *Tree Physiology*, vol. 17, no. 8–9 (1997): pp. 537–42. <https://doi.org/10.1093/treephys/17.8-9.537>.
29. Hoffmann, Carl Chr., Brian Kronvang, and Joachim Audet. "Evaluation of Nutrient Retention in Four Restored Danish Riparian Wetlands." *Hydrobiologia*, vol. 674, no. 1 (2011): pp. 5–24. <https://doi.org/10.1007/s10750-011-0734-0>.
30. Hu, Youning, Dexiang Wang, Lijing Wei, Xiping Zhang, and Bin Song. "Bioaccumulation of Heavy Metals in Plant Leaves from Yan'an City of the Loess Plateau, China." *Ecotoxicology and Environmental Safety*, vol. 110 (2014): pp. 82–88. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2014.08.021>.
31. Ji, Guodong, Tieheng Sun, Qixing Zhou, Xin Sui, Shijun Chang, and Peijun Li. "Constructed Subsurface Flow Wetland for Treating Heavy Oil-Produced Water of the Liaohe Oilfield in China." *Ecological Engineering*, vol. 18, no. 4 (2002): pp. 459–65. [https://doi.org/10.1016/s0925-8574\(01\)00106-9](https://doi.org/10.1016/s0925-8574(01)00106-9).
32. Jiang, Chunming, Guirui Yu, Huajun Fang, Guangmin Cao, and Yingnian Li. "Short-Term Effect of Increasing Nitrogen Deposition on CO₂, CH₄ and N₂o Fluxes in an Alpine Meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau, China." *Atmospheric Environment*, vol. 44, no. 24 (2010): pp. 2920–26. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.03.030>.
33. Kampschreur, Marlies J., Cristian Picioreanu, Nico Tan, Robbert Kleerebezem, Mike S.M. Jetten, and Mark C.M. van Loosdrecht. "Unraveling the Source of Nitric Oxide Emission during Nitrification." *Water Environment Research*, vol. 79, no. 13 (2007): pp. 2499–2509. <https://doi.org/10.2175/106143007x220815>.
34. "Kak Umen'shit' Vybrosy Parnikovykh Gazov i Snizit' Ugol'nuyu Zavisimost' Energetiki RK [How to Reduce Greenhouse Gas Emissions and Reduce Coal Dependence of the Energy Industry of the Republic of Kazakhstan?]" *Ranking.kz*, December 28, 2022. <https://ranking.kz/reviews/industries/kak-umenshit-vybrosy-pannikovyh-gazov-i-snizit-ugolnuyu-zavisimost-energetiki-rk.html>.
35. "Kazakhstanskomu Uglyu Propisali Obogashcheniye [Kazakhstan Coal Prescribed Enrichment]." *Kursiv Media Kazakhstan*, August 31, 2023. <https://kz.kursiv.media/2020-03-09/kazakhstanskomu-uglyu-propisali-obogashchenie/>.
36. Kiest, Kristina. "Carbon Dioxide Peaks near 420 Parts per Million at Mauna Loa Observatory." *NOAA Research*, February 21, 2023. <https://research.noaa.gov/article/ArtMID/587/ArticleID/2764/Coronavirus-response-barely-slows-rising-carbon-dioxide>.
37. Kim, Ki-Hyun, Pawan Kumar, Jan E. Szulejko, Adedeji A. Adelodun, Muhammad Faisal Junaid, Minoru Uchimiya, and Scott Chambers. "Toward a Better Understanding of the Impact of Mass Transit Air Pollutants on Human Health." *Chemosphere*, vol. 174 (2017): pp. 268–79. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.01.113>.
38. Köster, Kajar, Egle Köster, Frank Berninger, Jussi Heinonsalo, and Jukka Pumpanen. "Contrasting Effects of Reindeer Grazing on CO₂, CH₄, and N₂O Fluxes Originating from the Northern Boreal Forest Floor." *Land Degradation & Development*, vol. 29, no. 2 (2018): pp. 374–81. <https://doi.org/10.1002/ldr.2868>.
39. Limo, Jukka, Petriina Paturi, and Joni Mäkinen. "Magnetic Biomonitoring with Moss Bags to Assess Stop-and-Go Traffic Induced Particulate Matter and Heavy Metal Concentrations." *Atmospheric Environment*, vol. 195 (2018): pp. 187–95. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.09.062>.
40. Liu, Yisi, Elena Austin, Jianbang Xiang, Tim Gould, Tim Larson, and Edmund Seto. "Health Impact Assessment of PM_{2.5} attributable mortality from the September 2020 Washington state wildfire smoke episode, 2020." <https://doi.org/10.1101/2020.09.19.20197921>.
41. Melamed, M. L., R. Basaldud, R. Steinbrecher, S. Emeis, L. G. Ruiz-Suárez, and M. Grutter. "Detection of Pollution Transport Events Southeast of Mexico City Using Ground-Based Visible Spectroscopy Measurements of Nitrogen Dioxide." *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 9, no. 14 (2009): pp. 4827–40. <https://doi.org/10.5194/acp-9-4827-2009>.
42. Micó, C., L. Recatalá, M. Peris, and J. Sánchez. "Assessing Heavy Metal Sources in Agricultural Soils of an European Mediterranean Area by Multivariate Analysis." *Chemosphere*, vol. 65, no. 5 (2006): pp. 863–72. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.03.016>.
43. Newland, Mike J., Daniel J. Bryant, Rachel E. Dunmore, Thomas J. Bannan, W. Joe Acton, Ben Langford, James R. Hopkins, et al. "Low-No Atmospheric Oxidation Pathways in a Polluted Megacity." *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 21, no. 3 (2021): pp. 1613–25. <https://doi.org/10.5194/acp-21-1613-2021>.
44. Niemi, Riikka, Pertti J. Martikainen, Jouko Silvola, Anu Wulff, Satu Turtola, and Toini Holopainen. "Elevated UV-B Radiation Alters Fluxes of Methane and Carbon Dioxide in Peatland Microcosms." *Global Change Biology*, vol. 8, no. 4 (2002): pp. 361–71. <https://doi.org/10.1046/j.1354-1013.2002.00478.x>.
45. Nugmanova, Damilya, Yuriy Feshchenko, Liudmyla Iashyna, Olga Gyryna, Kateryna Malynovska, Eljam Mammadbayov, Irada Akhundova, et al. "The Prevalence, Burden and Risk Factors Associated with Chronic Obstructive Pulmonary Disease in Commonwealth of Independent States (Ukraine, Kazakhstan and Azerbaijan): Results of the Core Study." *BMC Pulmonary Medicine*, vol. 18, no. 1 (2018). <https://doi.org/10.1186/s12890-018-0589-5>.
46. Park, S., T. Pérez, K. A. Boering, S. E. Trumbore, J. Gil, S. Marquina, and S. C. Tyler. "Can N₂O Stable Isotopes and Isotopomers Be Useful Tools to Characterize Sources and Microbial Pathways of N₂O Production and Consumption in Tropical Soils?" *Global Biogeochemical Cycles*, vol. 25, no. 1 (2011). <https://doi.org/10.1029/2009gb003615>.

47. Prasad, Anup K., and Ramesh P. Singh. "Changes in Himalayan Snow and Glacier Cover between 1972 and 2000." *Eos, Transactions American Geophysical Union*, vol. 88, no. 33 (2007): pp. 326–326. <https://doi.org/10.1029/2007eo330002>.
48. (PDF) surface winds [in "State of the climate in 2015"] – researchgate. Accessed August 31, 2023. https://www.researchgate.net/publication/306263103_Surface_winds_in_State_of_the_Climate_in_2015.
49. Ravishankara, A. R., John S. Daniel, and Robert W. Portmann. "Nitrous Oxide (N₂O): The Dominant Ozone-Depleting Substance Emitted in the 21st Century." *Science*, vol. 326, no. 5949 (2009): pp. 123–25. <https://doi.org/10.1126/science.1176985>.
50. ROBROEK, BJORN J., MATTHIJS G. SCHOUTEN, JUUL LIMPENS, FRANK BERENDSE, and HENDRIK POORTER. "Interactive Effects of Water Table and Precipitation on Net Co₂ Assimilation of Three Co-Occurring Sphagnum Mosses Differing in Distribution above the Water Table." *Global Change Biology*, vol. 15, no. 3 (2009): pp. 680–91. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01724.x>.
51. Sarkodie, Samuel Asumadu, and Phebe Asantewaa Owusu. "Impact of Meteorological Factors on Covid-19 Pandemic: Evidence from Top 20 Countries with Confirmed Cases." *Environmental Research*, vol. 191 (2020): 110101. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110101>.
52. Shen, Jianxun, Aubrey L. Zerkle, and Mark W. Claire. "Nitrogen Cycling and Biosignatures in a Hyperarid Mars Analog Environment." *Astrobiology*, vol. 22, no. 2 (2022): pp. 127–42. <https://doi.org/10.1089/ast.2021.0012>.
53. Somani, Mohit, Abhishek N. Srivastava, Shiva Kumar Gummadivalli, and Aparna Sharma. "Indirect Implications of COVID-19 towards Sustainable Environment: An Investigation in Indian Context." *Bioresource Technology Reports*, vol. 11 (2020): 100491. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2020.100491>.
54. Song, Liquan, Shuying Zang, Lin Lin, Boquan Lu, Yaqing Jiao, Chaofeng Sun, and Hanxi Wang. "The Interaction between Vegetation Types and Intensities of Freeze-Thaw Cycles during the Autumn Freezing Affected in-Situ Soil N₂O Emissions in the Permafrost Peatlands of the Great Hinggan Mountains, Northeastern China." *Atmospheric Environment: X*, vol. 14 (2022): P. 100175. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2022.100175>.
55. Sputnik Kazakhstan. "Kazakhstan Prevysil Limit Vybrosov Parnikovykh Gazov: Kakiye Regiony 'Dymyat' Bol'she Vsekh [Kazakhstan Exceeded Greenhouse Gas Emission Limit: Which Regions 'Smoke' The Most." Sputnik Kazakhstan.] February 1, 2022. <https://ru.sputnik.kz/20191224/kazakhstan-parnikovye-gazy-12359282.html>.
56. "Statistika Jılıjşnogo Fonda (2022g.)." Qazaqstan Respwblıkası Strategiyalıq josparlaw jáne reformalar agenttigi Ulttıq statistika byurosı – Bastı bet. [Statistics on Housing Fund (2022). Agency for Strategic Planning and Reforms of the Republic of Kazakhstan National Bureau of Statistics – Home page.] Accessed August 31, 2023. https://new.stat.gov.kz/ru/industries/business-statistics/stat-inno-build/publications/14121/?sphrase_id=53829.
57. Ştefănuţ, Sorin, Kinga Öllerer, Anca Manole, Mihaela C. Ion, Marian Constantin, Cristian Banciu, Gabriel M. Maria, and Larisa I. Florescu. "National Environmental Quality Assessment and Monitoring of Atmospheric Heavy Metal Pollution – a Moss Bag Approach." *Journal of Environmental Management*, vol. 248 (2019): P. 109224. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.06.125>.
58. Stenøien, Hans, Solveig Bakken, and Kjell Ivar Flatberg. "Phenotypic Variation in the Sphagnum Recurvum Complex: A Cultivation Experiment." *Journal of Bryology*, vol. 19, no. 4 (1997): pp. 731–50. <https://doi.org/10.1179/jbr.1997.19.4.731>.
59. Świsłowski, Paweł, Arkadiusz Nowak, Stanisław Waclawek, Daniele Silvestri, and Małgorzata Rajfur. "Bioaccumulation of Trace Elements from Aqueous Solutions by Selected Terrestrial Moss Species." *Biology*, vol. 11, no. 12 (2022): P. 1692. <https://doi.org/10.3390/biology11121692>.
60. "Tokayev "Provel Soveshchaniye Po Razvitiyu Astany [Tokayev held a meeting on the development of Astana]." zakon.kz, January 31, 2023. <https://www.zakon.kz/6383032-tokaev-provel-soveshchanie-po-razvitiyu-astany.html>.
61. "Ukaz Prezidenta Respubliki Kazakhstan Ot 2 Fevralya 2023 Goda № 121 'Ob Utverzhdenii Strategii Dostizheniya Uglerodnoy Neytral'nosti Respubliki Kazakhstan Do 2060 Goda.'" Informatsionnaya sistema PARAGRAF ["Decree of the President of the Republic of Kazakhstan dated February 2, 2023 No. 121 'On Approval of the Strategy for Achieving Carbon Neutrality of the Republic of Kazakhstan Until 2060.'" Information system PARAGRAPH], April 11, 2023. https://online.zakon.kz/Document/?doc_id=32669610.
62. "Vybrozy Zagryaznyayushchikh Veshchestv v Atmosfernyy Vozdukh [Emissions of Pollutants into Atmospheric Air]." Old.stat.gov.kz. Accessed August 31, 2023. https://old.stat.gov.kz/for_users/ecologic_indicators/ecologic_indicator/air_pollutant_emissions.
63. Verdin, Anthony, Fabrice Cazier, Richard Fitoussi, Natacha Blanchet, Katell Vié, Dominique Courcot, Isabelle Momas, Nathalie Seta, and Sophie Achard. "An in Vitro Model to Evaluate the Impact of Environmental Fine Particles (PM_{0.3-2.5}) on Skin Damage." *Toxicology Letters*, vol. 305 (2019): pp. 94–102 <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2019.01.016>.
64. Wittig, Rüdiger, Konstantin König, Marco Schmidt, and Jörg Szarzynski. "A Study of Climate Change and Anthropogenic Impacts in West Africa." *Environmental Science and Pollution Research – International*, vol. 14, no. 3 (2007): pp. 182–89. <https://doi.org/10.1065/espr2007.02.388>.
65. Yin, Peng, Michael Brauer, Aaron J Cohen, Haidong Wang, Jie Li, Richard T Burnett, Jeffrey D Stanaway, et al. "The Effect of Air Pollution on Deaths, Disease Burden, and Life Expectancy across China and Its Provinces, 1990–2017: An Analysis for the Global Burden of Disease Study 2017." *The Lancet Planetary Health*, vol. 1, no. 3 (2019). [https://doi.org/10.1016/s2542-5196\(20\)30161-3](https://doi.org/10.1016/s2542-5196(20)30161-3).
66. Zhao, Wenqian, Zeling Li, Yongyue Hu, Min Wang, Shirui Zheng, Qiuping Li, Youfang Wang, et al. "Development of a Method for Protonema Proliferation of Peat Moss (Sphagnum Squarrosom) through Regeneration Analysis." *New Phytologist*, vol. 221, no. 2 (2019): pp. 1160–71. <https://doi.org/10.1111/nph.15394>.