ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИИ

DOI 10.35264/1996-2274-2020-1-132-143

МЕТОД УСКОРЕНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ФИТОРЕМЕДИАЦИИ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ИОНОВ ТЯЖЕЛЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ВОЗДЕЙСТВИИ НА РАСТЕНИЯ-ФИТОСОРБЕНТЫ ФИЗИЧЕСКИМИ ПОЛЯМИ

Л.Н. Ольшанская, проф. каф. Саратовского государственного технического университета (ФГБОУ ВО СГТУ) им. Гагарина Ю.А., д-р хим. наук, проф., ecos123@mail.ru

Р.Ш. Валиев, инж. Саратовского государственного технического университета ФГБОУ ВО СГТУ им. Гагарина Ю.А., канд. биол. наук, rw_84@mail.ru

Т.В. Осипова, вед. аналитик ФГБНУ НИИ РИНКЦЭ, osipovatv@extech.ru

Рецензент: В.М. Питулько

Статья посвящена проблеме повышения эффективности очистки природных и сточных вод от ионов тяжелых металлов методом электрохимической фитореимедиаии. Представлены результаты исследований по управлению процессами фитореимедиаии путем воздействия на высшие водные растения внешними физическими полями (постоянное магнитное поле, сочетанное воздействие постоянного магнитного поля и геомагнитного поля, постоянного магнитного поля и слабых электрических (j) полей). Экспериментально подтвержден эффект ускорения процесса сорбции ионов тяжелых металлов при воздействии внешних физических полей на растения ряски малой (Lemna minor). Определены рациональные условия для управления процессами избирательности и увеличения скорости электрохимической фитореимедиаии и полноты извлечения ионов тяжелых металлов из загрязненных вод с помощью высших водных растений. Предложена принципиальная технологическая схема очистки сточных вод от тяжелых металлов методом фитореимедиаии с использованием биопруда/отстойника, заселенного высшими водными растениями.

Ключевые слова: очистка сточных вод, фитореимедиаия, тяжелые металлы, высшие водные растения, ряска малая, постоянное магнитное поле, геомагнитное поле, слабые электрические поля, биопотенциал, диффузия катионов, биопруд.

A METHOD FOR ACCELERATING ELECTROCHEMICAL PHYTOREMEDIATION OF WASTEWATER FROM HEAVY METAL IONS WHEN EXPOSED TO PHYTOSORBENT PLANTS BY PHYSICAL FIELDS

L.N. Olshanskaya, Professor, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Ph. D., Professor, ecos123@mail.ru

R.Sh. Valiev, Engineer, Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Doctor of Biology, rw_84@mail.ru

T.V. Osipova, Leading Analyst, SRI FRCEC, osipovatv@extech.ru

The article is devoted to the problem of increasing the efficiency of purification of natural and waste waters from heavy metal ions by the method of electrochemical phytoreimедиаии. The results of studies on the management of phytoreimедиаии processes by exposure to higher aquatic plants by external physical fields (constant magnetic field, combined exposure to a constant magnetic field

*and geomagnetic field, constant magnetic field and weak electric (j) fields) are presented. The effect of accelerating the sorption of heavy metal ions under the influence of external physical fields on plants of *Lemna minor* has been experimentally confirmed. Rational conditions for controlling the processes of selectivity and increasing the rate of electrochemical phytoremediation and the completeness of the extraction of heavy metal ions from contaminated waters using higher aquatic plants are determined. A flow chart of the treatment of wastewater from heavy metals by the phytoremediation method using a biopond/settler populated by higher aquatic plants is proposed.*

Keywords: wastewater treatment, phytoremediation, heavy metals, higher aquatic plants, *Lemna minor*, constant magnetic field, geomagnetic field, weak electric fields, biopotential, cation diffusion, biopond.

Введение

Анализ тенденций научно-технического и технологического развития показывает, что проблема загрязнения водных ресурсов давно волнует ученых всего мира. Для многих стран эта проблема создает угрозу национальной безопасности, и для ее решения разрабатываются новые и совершенствуются существующие методы и технологии очистки и доочистки загрязненных сточных вод (СВ). В нашей стране, по данным Российского статистического ежегодника, общий объем сброса сточных вод в 2017 г. составил 42,6 млрд м³, в 2018 г. — 40,1 млрд м³. При этом содержание в сточных водах тяжелых металлов (ТМ) — свинца и ртути — составило 6,2 и 4,2 т соответственно [1].

Несмотря на достаточно крупные государственные инвестиции, направленные на охрану окружающей среды и рациональное использование водных ресурсов (в 2017 г. — 66 496,5 млн руб.; в 2018 г. — 62 749,7 млн руб.), введенные в действие в этот же период новые мощности обеспечили в 2017 г. очистку дополнительно 1,2 млн м³/сут. воды, а в 2018 г. — 0,8 млн м³/сут., что для Российской Федерации нельзя признать достаточным [1].

В связи с повсеместным ужесточением требований к качеству воды многие традиционные методы водоочистки не могут обеспечить необходимую глубину очистки природных и сточных вод и зачастую нерентабельны с экономической точки зрения. Поэтому усилия ученых и специалистов направлены на поиск новых, более эффективных и экономичных методов очистки сточных вод от различных загрязнений, включая ТМ. Одним из таких методов является фиторемедиация — использование высших водных растений (ВВР) и микроорганизмов для очистки загрязненных почв, грунтовых и сточных вод. Фиторемедиация намного дешевле физико-химических методов очистки [2], процесс извлечения поллютантов происходит непосредственно на месте их локализации *in situ*. Источником энергии для процесса является Солнце.

В России исследования и разработки по данной тематике ведутся в различных научно-исследовательских центрах и институтах, специализирующихся на решении проблем защиты окружающей среды. Свой вклад в решение проблемы вносят академии и университеты: Новосибирский институт цитологии и генетики СО РАН разработал технологию очистки СВ различного происхождения с помощью водяного гиацинта (эйхорния отличная) [3]; в Пермском научно-исследовательском политехническом университете предложено извлекать из очищенных СВ биогенные вещества с помощью валлиснерии спиральной и рдеста курчавого [4]; в Пермском государственном педагогическом университете ВВР используют для очистки олиготрофных сточных и природных вод [5]; ученые Белгородского государственного педагогического университета разработали новый способ биологической очистки сточных вод и устройство для его осуществления [6]. В Саратовском государственном техническом университете им. Гагарина Ю.А. в течение ряда лет проводятся исследования и получены результаты по ускорению процессов очистки природных и сточных вод методом электрохимической фиторемедиации путем воздействия на ВВР (рясковые, эйхорния,

лимнофила, криптокарина) внешними физическими полями (ВФП: постоянное магнитное поле (ПМП), ультрафиолетовое (УФ), инфракрасное (ИК), лазерное излучение) [7–11].

Во всех фиторемедиационных технологиях, особенно в процессах очистки загрязненных вод от ионов тяжелых металлов (ИТМ) огромную роль играет растительная клетка, которая выступает в качестве биоэлектрохимического сенсора-нанореактора, распознающего и извлекающего катионы металлов из сточных и промывных вод.

Растительная клетка представляет собой электрохимически активную мембрану (рис. 1). Для того чтобы проникнуть в клетку, ионы тяжелых металлов, как, впрочем, и любые другие вещества, должны пройти клеточные стенки, которые легко проницаемы для ионов из-за наличия сквозных пор, диаметр которых (3–4 нм) на порядок больше, чем размеры гидратированных ионов (K^+ – 0,54 нм, Cd^{2+} – 0,46 нм, Zn^{2+} – 0,42 нм, Cu^{2+} – 0,38 нм) [12]). Клеточные мембраны обладают сложной структурой и химизмом, которые оказывают влияние на метаболизм ТМ. В клеточной стенке имеются белки, пектины, фосфолипиды, микрофибриллы целлюлозы и др., содержащие фиксированные отрицательно заряженные группы (прежде всего – карбоксильные) [13]. Они определяют катионно-обменную способность и влияют на накопление ионов в клетке.

Рис. 1. Принципиальная схема работы биоэлектрохимического нанореактора – растительной клетки (а); распределение потенциалов на клеточной мембране (б):

$E_{в}$, $E_{им}$ – граничные потенциалы; $E_{пов}$, $E_{пов}''$ – поверхностные скачки потенциала; $E_{им}$ – внутримембранный потенциал; $E_{дип}$, $E_{дип}''$ – дипольные потенциалы

Перенос ионов, крупных полярных молекул и др. обеспечивается преимущественно посредством специальных интегральных белков [14]. Перенос может протекать как по градиенту его электрохимического потенциала, так и против него. В первом случае от клетки не требуются затраты энергии, процесс протекает пассивно и представляет собой диффузию. Если вещество переносится против градиента, то это активный транспорт, и клетка вынуждена затратить для его осуществления метаболическую энергию.

Транспорт заряженных частиц через растительную клетку осуществляется за счет биоэлектрического потенциала, который создается на границе раздела «клетка/раствор», величина его изменяется от –60 до –260 мВ [15] и зависит от многих факторов, в том числе от силы и длительности воздействия электромагнитного излучения (ЭМИ). Благодаря диффузионно-электрохимическому механизму проницаемости клеточных мембран растений

происходит извлечение катионов ТМ из растворов растениями (эйхорния, рясковые). Растительная клетка при этом является природным электрохимическим реактором, способным эффективно извлекать и утилизировать ТМ.

Потенциал обуславливает способность клеток и тканей быть источниками электрического тока и выступать в качестве электрических проводников второго рода с неоднородной структурой (в отличие от металлов, являющихся электрическими проводниками первого рода с однородной структурой) [15]. Механизмы поступления металлов в растения различные, однако, попадая в клетки, они взаимодействуют с ее компонентами, инактивируя многие ферменты. Это вызывает разнообразные нарушения метаболизма клеток, с чем связана высокая токсичность ТМ [16].

Известно, что в растительных организмах в стрессовых условиях развиваются более быстрые сдвиги метаболизма, которые проявляются в изменениях электрической активности клеток и тканей (биопотенциалов) [17, 18]. Однако в литературе встречаются лишь некоторые сведения о влиянии условий среды и внешних физических полей (магнитные, электрические и др.) на биопотенциалы рясковых. Вместе с тем известно, что ВФП создают дополнительные электрические токи в биообъектах и, изменяя величины мембранного потенциала, могут управлять течением процессов роста, развития живых организмов, оказывая как стимулирующее, так и тормозящее воздействие [16, 17].

Цель настоящей работы заключается в исследовании повышения эффективности очистки природных и сточных вод от ионов тяжелых металлов методом электрохимической фиторемедиации путем изменения поверхностных потенциалов растений ряски малой (*Lemna minor*) под влиянием различных внешних физических полей (постоянное магнитное поле (ПМП), сочетанного воздействия ПМП и геомагнитного поля Земли (ГМПЗ), ПМП и слабых электрических (j) полей).

Экспериментальные данные и их обсуждение

Объектом исследования служили: 1) высшее водное растение — ряска малая (*Lemna minor*), районированная в Саратовской обл.; 2) модельные растворы сульфатов меди (концентрация катионов $C_{Cu^{2+}} = 1$ мг/л) и кадмия ($C_{Cd^{2+}} = 10$ мг/л).

Растения выращивали в растворе Хогланда¹, замена которого производилась один раз в неделю. Культивирование проводили в нестерильных условиях, в стеклянной емкости при комбинированном освещении и температуре $23 \pm 2^\circ\text{C}$. На рис. 2а представлена схема измерения поверхностного потенциала листочков ряски.

Анализ изменения величины поверхностного потенциала растения в сульфатном растворе кадмия показал (см. рис. 2б), что начальные величины потенциала листочков без воздействия ПМП были на 30–40 мВ выше, а с течением времени значения потенциалов оказались на 50–60 мВ ниже. Величины E возрастали до ~280 мВ в течение первых 10 мин, оставаясь стабильными до ~30 мин от начала измерений. Затем наблюдался скачок потенциала до значений 320 мВ к 1,0–1,5 ч, после чего продолжалось возрастание биопотенциала до ~350 мВ, и далее в оставшееся время наблюдений его величина стабилизировалась. Повышение биопотенциала может быть связано с транспортом катионов кадмия и сульфат-аниона. В случае воздействия постоянного магнитного поля напряженностью 2 кА/м в этом же растворе поверхностный потенциал растения повторял ход изменения потенциала без магнитного облучения. Значимые различия наблюдали лишь через 2 ч от начала измерений: с магнитным полем значение потенциала составило ~386 мВ, в то время как без обработки растения в ПМП его величина была на 40 мВ меньше: ~341 мВ. Возможно, ПМП ускоряет диффузию анионов, и полученные результаты свидетельствуют об усилении воздействия магнитной обработки растворов на процессы электросорбции металлов растением.

¹ Раствор питательных веществ для гидропоники, разработанный Хогландом и Арноном в 1938 г. Рецепт раствора был пересмотрен Арноном в 1950 г.

Рис. 2. Схема измерения биопотенциала листочков ряски (а); динамика поверхностных потенциалов (E , мВ) листочков ряски малой в сульфатном растворе кадмия, $C_{Cd^{2+}} = 10$ мг/л (б)

При изучении влияния физических воздействий на процессы электрохимической фиторемедиации меди из загрязненных вод ВВР одинакового срока вызревания массой 20 г/л помещали в модельные растворы $CuSO_4$ с концентрацией катиона Cu^{2+} 1 мг/л и подвергали облучению в течение различного времени. По истечении определенного времени выдержки растений определяли остаточные концентрации катионов меди в растворе. При всех измерениях проводили не менее 3–5 параллельных опытов.

При исследовании влияния направленного воздействия ПМП различной напряженности на процессы фиторемедиации ионов меди было установлено, что при ПМП 2,0 кА/м ряска сорбирует ионы меди в большем количестве (на 17–23 %), чем при действии полей другой напряженности или без воздействия ПМП. Это может быть обусловлено более эффективным поступлением меди в растения и распределением в клетках, тканях и органах [18].

Анализ полученных данных (рис. 3) указывает на усиление воздействия магнитной обработки растворов на процессы электросорбции. Данный факт можно также объяснить «ионной» гипотезой (Классен А.) влияния магнитного поля на растворы (рис. 4). По данной теории, поле оказывает особое влияние на гидратацию ионов [19].

Чем больше и устойчивее гидратная оболочка, тем труднее ионам вступать в реакции или диффундировать. Под влиянием магнитного поля происходит временная деформация гидратных оболочек ионов, изменяется их распределение в воде, они как бы разворачиваются к полюсам магнитов под действием силы Лоренца, при этом образуются пластинчатые домены ориентированных молекул воды, т. е. происходит процесс омагничивания.

Рис. 3. Зависимость изменения концентрации меди ($C_{нач} Cu^{2+} = 1$ мг/л) в растворе при выдержке в нем ряски:

1 – без МП; 2 – с совпадением ГМПЗ и ПМП; 3 – при воздействии ПМП с $H = 2$ кА/м

Рис. 4. Схема механизма омагничивания раствора, содержащего соль металла:

а) гидратированные ионы в водном растворе без воздействия ПМП; б) структурирование гидратной оболочки в ПМП; в) образование пластинчатых доменов ориентированных молекул в омагниченной воде

В этом случае достигаются уменьшение степени гидратации ионов, ускорение диффузии катионов к клеточной мембране и повышение эффективности их извлечения растением. Кроме этого, известно, что ПМП воздействует на объемные электрические заряды за счет энергии живой системы, накапливающейся в ходе электрохимических реакций, и разделения зарядов, протекающих в мембране. Магнитные поля в разной степени влияют на белковые образования растительного происхождения, выбивая у них электроны, которые перемещаются к поверхности клеточной мембраны, усиливая отрицательный заряд и способствуя тем самым формированию слоя с высоким значением разности потенциалов на границе «клетка/раствор» [20]. При этом ускоряются подвод катионов меди и их проникновение внутрь клетки за счет отрицательно заряженной внутренней поверхности клеточной мембраны.

Исследование совместного влияния ПМП и ГМПЗ (при совпадении направления севера прибора с севером ГМПЗ) на процессы поглощения меди из сульфатных растворов рясковой показала (см. рис. 3), что в случае совпадения полей очистка воды происходит более интенсивно – примерно в 1,3–1,5 раза. После 24 ч содержание меди уменьшается почти в 2 раза по сравнению с экспериментом без совмещения направления магнитных полей. Полученный эффект можно объяснить тем, что совместное действие полей оказывает благоприятное влияние на растительную клетку, а именно: на ускорение процесса фиторемедиации.

Далее было изучено влияние слабых электрических (j) полей и сочетанное влияние ПМП и j (рис. 5) на процессы извлечения меди рясковой.

Рис. 5. Схема для исследования действия на растения ПМП + j :

1 – источник питания постоянного тока Б5-43; 2 – магнитная катушка; 3 – батареи НК; 4 – магазин сопротивлений Р-33; 5 – вольтамперметр; 6 – электроды А1; 7 – ВВР; 8 – графитовый электрод

Растения помещали в электрохимическую ячейку (с алюминиевым катодом и графитовым анодом, находящимися в рабочем растворе CuSO_4) и воздействовали на растения заданными плотностями тока j , мкА/см^2 : 80; 240; 480. Ячейку помещали в установку, создающую ПМП напряженностью $H = 2 \text{ кА/м}$. После выдержки растений в течение различного времени определяли конечную концентрацию меди в растворе методом инверсионной хроновольтамперометрии. Полученные данные представлены на рис. 6 и 7.

Рис. 6. Потенциодинамические кривые J , E , полученные при извлечении Cu^{2+} из растворов CuSO_4 ($C_{\text{нач}} = 1 \text{ мг/л}$) при различном времени выдержки ряски (t , ч: 1–0; 2–1; 3–3; 4–5; 5–24): а) при плотности тока 240 мкА/см^2 ; б) при совместном воздействии тока $j = 240 \text{ мкА/см}^2$ и ПМП $2,0 \text{ кА/м}$

Полученные данные по влиянию величин тока на процесс извлечения меди ряской позволили установить, что максимальный эффект достигался при воздействии $j = 240 \text{ мкА/см}^2$ в течение 48 ч (см. рис. 7). Процессы, связанные с изменениями в клеточной мембране под действием электрического поля, называют электропорацией [21, 22]. При этом в мембране возникает локальная перестройка структуры, приводящая к расширению пор, появлению сквозных каналов, по которым с высокими скоростями перемещаются микро- и макрочастицы (например, ионы металлов). Кроме этого, растительные клеточные мембраны способны концентрировать электрические поля, и в результате приложения к клеткам дополнительного внешнего поля происходит рост проницаемости мембран, что благоприятно воздействует на процессы электросорбции ионов металлов. При высокой плотности поля (480 мкА/см^2) может достигаться необратимое разрушение части клеток, что снижает сорбционную способность и зачастую приводит к электрическому пробоем мембран.

Рис. 7. Динамика изменения концентрации меди ($C_{\text{нач}} = 1 \text{ мг/л Cu}^{2+}$) при извлечении ее ряской без ВФП и при сочетанном воздействии ПМП и ПМП + j в течение различного времени (1–48 ч)

Для использования процессов электрохимической фиторемедиации нами предложена схема очистки СВ от ИТМ (медь) с помощью ВВР (рис. 8).

Рис. 8. Принципиальная технологическая схема фиторемедиации металлов из СВ при использовании биопруда/отстойника

Процесс с использованием постоянного магнитного поля включает следующие стадии: сбор загрязненной воды в усреднитель (1); перекачку СВ насосом (2) в искусственный биопруд/отстойник (3), заселенный ряской и оборудованный сетчатым поддоном (4) для сбора

и удержания ВВР при сбросе очищенной воды; обработку растения в водной среде постоянным магнитным полем $H = 2 \text{ кА/м}$ (5); контроль остаточного содержания катионов меди в растворе с помощью оборудования (6) для контроля остаточного содержания катионов меди в растворе; сброс очищенной воды насосом (7) в водоем; подъем отработанной фитомассы поддоном и перенос ее из биопруда в ванну (9) для приготовления раствора элюата (вытяжка CuSO_4 из фитомассы); дозирование серной кислоты (10); перекачку полученного раствора CuSO_4 в ванну электролиза (11), где на катоде выделяется медь, направляемая потребителю; обезвреженная фитомасса собирается в емкость (12) и направляется на утилизацию.

Заключение

1. Проведенные исследования по изучению влияния внешних физических полей различной природы на изменение мембранных потенциалов растений ряски (*Lemna minor*) позволили выбрать оптимальные условия, управляющие процессами избирательности и скорости электрохимической фиторемедиации ионов тяжелых металлов из загрязненных вод с помощью высших водных растений. Показано, что количество извлекаемого металла зависит от предварительной обработки раствора и растения различными физическими полями и убывает в ряду: ПМП + ГМПЗ > ПМП > ПМП + j > без ВФП.

2. Магнитные поля оказывают влияние на белки, выбивая у них электроны и способствуя формированию на границе «клетка/раствор» слоя с высокой разностью потенциалов. Это ускоряет приток положительно заряженных катионов металлов и их проникновение внутрь клетки за счет отрицательно заряженной внутренней поверхности клеточной мембраны. Совместное влияние ПМП (2 кА/м) и ГМПЗ повышает интенсивность очистки в 1,3–1,5 раза, что обусловлено благоприятным взаимным действием полей на скорость электрохимического переноса ИТМ.

3. Эффект действия ПМП, вероятнее всего, обусловлен образованием пластинчатых доменов ориентированных молекул воды вследствие ее омагничивания. При этом достигаются уменьшение степени гидратации катионов, повышение скорости их диффузии к клеточной мембране, что вызывает изменение поверхностного биопотенциала и ускоряет процесс электросорбции катионов растениями.

4. При сочетанном действии ПМП (2 кА/м) и плотности тока (240 мкА/см^2) определяющую роль играют процессы электропорации: в клеточной мембране происходит локальная перестройка структуры, изменяется величина потенциала на мембране, расширяются ее поры, появляются сквозные каналы, по которым с высокими скоростями перемещаются катионы, о чем свидетельствует ускорение процесса электрохимической фиторемедиации металлов из сточных вод.

5. Для использования процессов электрохимической фиторемедиации предложена схема очистки сточных вод от ионов тяжелых металлов (на примере меди) при воздействии постоянного магнитного поля на высшие водные растения, заселенные в биопруд/отстойник.

Полученные результаты могут быть интересны российским и зарубежным исследователям, специалистам экологических служб и контроля водных объектов.

Список литературы

1. Российский статистический ежегодник. 2019: стат. сб. М.: Росстат, 2019. 708 с.
2. Протасов В.Ф. Экология, здоровье и охрана окружающей среды в России. М.: Финансы и статистика, 2000. С.116–119.
3. Технология создания биопрудов для очистки сточных вод / Ин-т цитологии и генетики СО РАН. URL: <http://www.bionet.nsc.ru> (дата обращения: 30.03.2020); Информационный обзор способа очистки (доочистки) вод с применением эйхорнии (водного гиацинта). URL: <http://www.essentuki.com> (дата обращения: 30.03.2020).

4. Вайсман Я.И., Рудакова Л.В., Калинина Е.В. Использование водных растений для доочистки сточных вод // Экология и промышленность России. 2006. № 11. С. 9–11.
5. Золотухин И.А. Растения как средство очистки олиготрофных сточных и природных вод: учеб. пособие. Пермь: Пермский гос. пед. ун-т, 2001. 235 с.
6. Патент 2107041 Российская Федерация МПК C02F3/32. Способ биологической очистки сточных вод и устройство для его осуществления / Колчанов А.В.; заявитель и патентообладатель — Белгородский гос. пед. ун-т / № 95116908/25, заявл. 03.10.1995; опубл. 20.03.1998. URL: www1.fips.ru (дата обращения: 30.03.2020).
7. Олышанская Л.Н., Собгайда Н.А. Фиторемедиация металлов из вод. Влияние внешних физических полей на ускорение процессов фиторемедиации: монография. Berlin: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2012. 156 p.
8. Стоянов А.В., Собгайда Н.А., Олышанская Л.Н. Влияние лазерного излучения на процессы фиторемедиации меди из сточных вод эйхорнией // Химическое и нефтегазовое машиностроение. 2010. № 6. С. 38–41.
9. Валиев Р.Ш., Олышанская Л.Н. Биоэлектродгенез ряски крошечной *Lemna perpusilla* Torr. в процессе фиторемедиации вод от солей меди // Изв. вузов. Химия и химическая технология. 2015. Т. 58. Вып. 5. С. 49–53.
10. Olshanskaya L.N., Titorenko O.V., Ereemeeva Yu.A. Influence of a Constant Magnetic Field and Ultraviolet Radiation on Growth of Higher Plants and Phytoremediation of Soil from Oil Products // Chemical and Petroleum Engineering. 2015. Vol. 51. Is. 5. P. 361–365.
11. Олышанская Л.Н., Собгайда Н.А., Валиев Р.Ш. Извлечение тяжелых металлов из загрязненных стоков с использованием адсорбентов и фитосорбентов // Экология и промышленность России. 2015. Т. 19. № 11. С. 18–23.
12. Смирнов, П.Р., Тростин В.Н. Структура концентрированных водных растворов электролитов с кислородосодержащими анионами. Иваново: ИХНР РАН, 1994. 260 с.
13. Геннис Р. Биомембраны: молекулярная структура и функции. М.: Мир, 1997. 624 с.
14. Антонов В.Ф. Мембранный транспорт // Соросовский образовательный журнал. 1997. № 6. С. 14–20.
15. Опритов В.А., Пятагин С.С., Ретиван В.Г. Биоэлектродгенез у высших растений. М.: Наука, 1991. 214 с.
16. Линник П.Н., Набиванец Б.И. Формы миграции металлов в пресных поверхностных водоемах. М.: Гидрометеиздат, 1986. 286 с.
17. Воденеев В.А., Опритов В.А., Сухов В.С. Генерация потенциалов действия у высших растений при стрессе // Физико-химические основы структурно-функциональной организации растений: докл. Междунар. научной конф. Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2008. С. 113–114.
18. Демидчик В.В. Поступление меди в растения и распределение в клетках, тканях и органах // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121. № 2. С. 117–121.
19. Классен В.И. Омагничивание водных систем. М.: Химия, 1978. 257 с.
20. Мизун Ю.В., Мизун Ю.Г. Тайны будущего. Влияние магнитного поля на растения. М.: Вече, 2000. 172 с. URL: <http://solncev.narod.ru> (дата обращения: 30.03.2020).
21. Weaver J.C., Chizmadzhev Y. Theory of electroporation: A review // Bioelectroch Bioener. 1996. Vol. 41. P. 135–160.
22. Melikov K.C., Frolov V.A., Shcherbakov A.B., et all. Voltage-induced nonconductive prepores and metastable single pores in unmodified planar lipid bilayer // J. Biophys. 2001. Vol. 80. P. 1829–1836.

References

1. *Rossiyskiy statisticheskiy ezhegodnik* [Russian statistical yearbook] (2019) Rosstat Stat.Collection. Moscow. P. 708.
2. Protasov V.F. (2000) *Ekologiya, zdorov'e i okhrana okruzhayushchey sredy v Rossii* [Ecology, health and environmental protection in Russia] *Finansy i statistika* [Finance and Statistics]. Moscow. P. 116–119.

3. *Tekhnologiya sozdaniya bioprudov dlya ochistki stochnykh vod* [The technology of creating biological ponds for wastewater treatment] *In-t tsitologii i genetiki SO RAN* [Institute of Cytology and Genetics SB RAS]. Available at: <http://www.bionet.nsc.ru> (accessed date: 30.03.2020). *Informatsionnyy obzor sposoba ochistki (doochistki) vod s primeneniem eykhornii (vodnogo giatsinta)* [Information review of the method of purification (post-treatment) of water using eichornia (water hyacinth)]. Available at: <http://www.essentuki.com> (accessed date: 30.03.2020).
4. Vaysman Ya.I., Rudakova L.V., Kalinina E.V. (2006) *Ispol'zovanie vodnykh rasteniy dlya doochistki stochnykh vod* [The use of water plants for wastewater treatment] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. No. 11. P. 9–11.
5. Zolotukhin I.A. (2001) *Rasteniya kak sredstvo ochistki oligotrofnykh stochnykh i prirodnnykh vod: ucheb. Posobie* [Plants as a means of purification of oligotrophic wastewater and natural waters: textbook] *Permskiy gos. ped. un-t* [Perm State. Ped. Univ]. Perm. P. 235.
6. Patent 2107041 Russian Federation IPC C02F3/32. *Sposob biologicheskoy ochistki stochnykh vod i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya. Kolchanov A.V* [The method of biological wastewater treatment and device for its implementation. Kolchanov A.V.] Applicant and patent holder – Belgorod state. ped Univ. No. 95116908/25, declared 10.03.1995; publ. 20.03.1998. Available at: www1.fips.ru (accessed date: 30.03.2020).
7. Olshanskaya L.N., Sobgaida N.A. (2012) *Fitoremediatsiya metallov iz vod. Vliyanie vneshnikh fizicheskikh poley na uskorenie protsessov fitoremediatsii: monografiya* [Phytoremediation of metals from water. The influence of external physical fields on the acceleration of phytoremediation processes: monograph]. LAP LAMBERT Academic Publishing. Berlin. P. 156.
8. Stoyanov A.V., Sobgaida N.A., Olshanskaya L.N. (2010) *Vliyanie lazernogo izlucheniya na protsessy fitoremediatsii medi iz stochnykh vod eykhorniey* [The effect of laser radiation on the processes of phytoremediation of copper from wastewater by eichhornium] *Khimicheskoe i neftegazovoe mashinostroenie* [Chemical and Oil and Gas Engineering]. No. 6. P. 38–41.
9. Valiev R.Sh., Olshanskaya L.N. (2015) *Bioelektrogeenez ryaski kroshechnoy Lemna perpusilla Torr. v protsesse fitoremediatsii vod ot soley medi. Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya* [Bioelectrogenesis of duckweed tiny Lemna perpusilla Torr. in the process of phytoremediation of water from copper salts] *Izv. vuzov* [University News. Chemistry and chemical technology]. 2015. V. 58. Is. 5. P. 49–53.
10. Olshanskaya L.N., Titorenko O.V., Ereemeeva Yu.A. (2015) Influence of a Constant Magnetic Field and Ultraviolet Radiation on Growth of Higher Plants and Phytoremediation of Soil from Oil Products. *Chemical and Petroleum Engineering*. Vol. 51. Is. 5. P. 361–365.
11. Olshanskaya L.N., Sobgaida N.A., Valiev R.Sh. (2015) *Izвлечение tyazhelykh metallov iz zagryaznennykh stokov s ispol'zovaniem adsorbentov i fitosorbentov* [Rossii Extraction of heavy metals from polluted effluents using adsorbents and phytosorbents] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia]. V. 19. No. 11. P. 18–23.
12. Smirnov P.R., Trostin V.N. (1994) *Struktura kontsentrirrovannykh vodnykh rastvorov elektrolitov s kislorodosoderzhashchimi anionami* [The structure of concentrated aqueous solutions of electrolytes with oxygen-containing anions] *IKhNR RAN* [IHRR RAS]. Ivanovo. P. 260.
13. Gennis R. (1997) *Biomembrany: molekulyarnaya struktura i funktsii* [Biomembranes: molecular structure and functions] *Mir* [Mir]. Moscow. P. 624.
14. Antonov V.F. *Membranny transport* [Membrane transport] (1997) *Sorosovskiy obrazovatel'nyy zhurnal* [Soros Educational Journal]. No. 6. P. 14–20.
15. Opritov V.A., Pyatygin S.S., Retivan V.G. (1991) *Bioelektrogeenez u vysshikh rasteniy* [Bioelectrogenesis in higher plants] *Nauka* [Nauka]. Moscow.
16. Linnik P.N., Nabivanets B.I. (1986) *Formy migratsii metallov v presnykh poverkhnostnykh vodoemakh* [Forms of metal migration in fresh surface water bodies] *Gidrometeoizdat* [Gidrometeoizdat]. Moscow. P. 286.
17. Vodeneev V.A., Opritov V.A., Sukhov V.S. (2008) *Generatsiya potentsialov deystviya u vysshikh rasteniy pri stresse. Fiziko-khimicheskie osnovy strukturno-funktsional'noy organizatsii rasteniy* [Generation of action potentials in higher plants under stress. Physico-chemical principles of the structural and functional organization

of plants] *Doklad mezhdunar. nauchnoy konf. Izd-vo Ural'skogo un-ta* [Report at Int. scientific conference. Publishing House of the Ural University]. Ekaterinburg. P. 113–114.

18. Demidchik V.V. (2001) *Postuplenie medi v rasteniya i raspredelenie v kletkakh, tkanyakh i organakh* [Copper intake in plants and distribution in cells, tissues and organs] *Uspekhi sovremennoy biologii* [Successes in modern biology]. V. 121. No. 2. P. 117–121.

19. Klassen V.I. (1978) *Omagnichivanie vodnykh sistem* [Magnetization of water systems] *Khimiya* [Chemistry]. Moscow. P. 257.

20. Mizun Yu.V., Mizun Yu.G. (2000) *Tayny budushchego. Vliyanie magnitnogo polya na rasteniya* [Secrets of the future. The effect of a magnetic field on plants] *Veche* [Veche]. Moscow. P. 172. Available at: <http://solncev.narod.ru> (accessed date: 30.03.2020).

21. Weaver J.C., Chizmadzhev Y. (1996) Theory of electroporation: A review. *Bioelectroch Bioener.* Vol. 41. P. 135–160.

22. Melikov K.C., Frolov V.A., Shcherbakov A.V., et al. (2001) Voltage-induced nonconductive prepores and metastable single pores in unmodified planar lipid bilayer. *J. Biophys.* Vol. 80. P. 1829–1836.