

УДК 550.4:628.35

DOI: [10.46698/VNC.2021.87.18.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014)

Оригинальная статья

Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений

М.А. Пашкевич , А.Э. Коротаева 

Санкт-Петербургский горный университет, Россия, 199106, г. Санкт-Петербург,
Васильевский остров, 21 линия, д. 2, e-mail: s205056@stud.spmi.ru

Статья поступила: 24.10.2021, доработана: 22.11.2021, принята к публикации: 01.12.2021

Резюме: Актуальность работы. Деятельность горнодобывающих предприятий неотрывно сопряжена с ведением взрывных работ. В настоящее время наиболее распространенными взрывчатыми веществами являются эмульсионные взрывчатые вещества, граммониты, амоналы, аммониты и другие взрывчатые вещества, содержащие нитрат аммония, который в процессе взрывания переходит в сточные воды в форме нитрат- и нитрит-ионов, а также ионов аммония. Превышение предельно допустимой концентрации азотных соединений в водных объектах может приводить к эвтрофикации. В результате данного процесса происходит нарушение экологического баланса водоемов, а именно увеличение численности различных гидробионтов, уменьшение прозрачности воды и содержания растворенного кислорода. Помимо этого в водоемах осуществляется преобразование нитратной формы азота в нитритную, которая негативно воздействует на нервную и сердечно-сосудистую системы человека при употреблении воды из такого водоема. На данный момент существуют физико-химические, химические и биологические методы очистки вод от азотных соединений. Использование каждого из перечисленных методов обуславливается параметрами карьерных сточных вод и требованиями, предъявляемыми к качеству очистки. **Цель работы.** Целью работы является обзор методов биологической очистки, которые могут применяться для удаления соединений азота из карьерных сточных вод, а также определение наиболее перспективного метода при условии большого объема образования карьерных сточных вод. **Методы исследования.** Методы исследования включают в себя анализ и сравнение биологических методов очистки, которые могут использоваться для удаления азотных соединений из образующихся сточных вод в карьере. **Результаты работы.** Рассмотрены различные виды процессов и систем, включая процесс нитрификации и денитрификации, Апаттох-процесс, фито-очистные системы, биоплато, биопруды и системы микроводорослей. Приведены факторы, влияющие на эффективность работы данных процессов и систем, а также дана сравнительная характеристика с выделением достоинств и недостатков каждого из них. Наиболее предпочтительным методом биологической очистки большого объема образующихся карьерных сточных вод признан метод комплексной очистки по типу constructed wetlands с комплексным применением видов высшей и низшей растительности.

Ключевые слова: биологические методы, очистка сточных вод, азотные соединения, карьерные воды, удаление азота, constructed wetlands.

Для цитирования: Пашкевич М.А., Коротаева А.Э. Анализ биологических методов для очистки карьерных сточных вод от азотных соединений. *Геология и геофизика Юга России*. 2021. 11(4): 170-182. DOI: 10.46698/VNC.2021.87.18.014.

DOI: [10.46698/VNC.2021.87.18.014](https://doi.org/10.46698/VNC.2021.87.18.014)

Original paper

Analysis of biological methods for quarry wastewater treatment from nitrogen compounds

M.A. Pashkevich , A.E. Korotaeva 

St. Petersburg Mining University, 27 21st Line, St Petersburg 199106, Russian Federation,
e-mail: s205056@stud.spmi.ru

Received: 24.10.2021, revised: 22.11.2021, accepted: 01.12.2021

Abstract: Relevance. The activities of mining enterprises are inextricably linked with the conduct of blasting operations. Currently, the most common explosives are emulsion explosives, grammonites, amons, ammonites and other explosives containing ammonium nitrate, which, during the blasting process, passes into wastewater in the form of nitrate and nitrite ions, as well as ammonium ions. Exceeding the maximum permissible concentration of nitrogen compounds in water bodies can lead to eutrophication. As a result of this process, there is a violation of the ecological balance of reservoirs, as well as an increase in the number of various hydrobionts, a decrease in the transparency of water and the content of dissolved oxygen. In addition, the nitrate form of nitrogen is converted into nitrite in reservoirs, which negatively affects the nervous and cardiovascular system of a person when drinking water from such a reservoir. At the moment, there are physico-chemical, chemical and biological methods of water treatment from nitrogen. The use of each of these methods is determined by parameters of quarry wastewater and the requirements for treatment quality. **Aim.** The aim of the work is to review the methods of biological purification that are used for nitrogen compounds from quarry wastewater. **Methods.** The research methods include the analysis and comparison of biological treatment methods. **Results.** The factors affecting the efficiency of these processes and systems are presented, as well as these comparative characteristics, highlighting the advantages and disadvantages of each of them. The most preferred biological treatment method of a large volume of formed quarry wastewater is the recognized methods of complex treatment according to the type of constructed wetlands with the complex use of higher and lower plant species.

Keywords: Biological methods, wastewater treatment, nitrogen compounds, quarry water, nitrogen removal, constructed wetlands.

For citation: Pashkevich M.A., Korotaeva A.E. Analysis of biological methods for quarry wastewater treatment from nitrogen compounds. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South.* (in Russ.). 2021. 11(4): 170-182. DOI: 10.46698/VNC.2021.87.18.014.

Введение

Горнопромышленные предприятия, осуществляющие открытую разработку месторождений, все чаще сталкиваются с проблемой образования больших объемов сточных вод, загрязненных различными биогенными элементами [Patokin et al., 2020; Солнышкова и др., 2017] и тяжелыми металлами [Chukaeva, Matveeva, 2018; Patokin et al., 2020; Черемисина, 2013]. При ведении буровзрывных работ с использованием взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры образующиеся сточные воды отличаются повышенным содержанием азотных соединений [Petrov et al., 2019]. Данные соединения поступают в воды в результате растворения при зарядке обводненных скажин или при их вымывании из горных пород, сорбирующих оксиды азота при проведении взрывов [Белин и др., 2018]. Сброс таких вод без очистки

в поверхностные водные объекты ведет к эвтрофикации и влияет на здоровье человека [Реутова и др., 2021].

Азот может быть представлен в водных объектах в виде нитратов, нитритов, аммонийного и органического азота [Dong et al., 2019; Korotaeva, 2020]. В настоящее время задача очистки сточных вод от соединений азота решается с помощью биологических методов. По сравнению с существующими физико-химическими и химическими методами они не приводят к образованию вторичных высококонцентрированных растворов и характеризуются меньшими капитальными и эксплуатационными затратами.

Методы биологической очистки

Процесс нитрификации и денитрификации

Последовательное проведение стадий нитрификации и денитрификации является традиционным способом биологической очистки. На первой стадии первостепенно образуются ионы нитрита, далее ионы нитрита при помощи окисляющих их бактерий переходят в нитратную форму. При этом окисление при концентрации растворенного кислорода более 0,8 мг/л сопровождается образованием нитритов, менее 0,8 мг/л – образованием газообразного азота, нитрита и оксидов азота [Benáková et al., 2018; Ge et al., 2015]. Вторая стадия протекает в анаэробных условиях при помощи денитрифицирующих бактерий с образованием молекулярного азота. Во время данного процесса бактерии используют углерод в качестве питательного вещества для восстановления нитратов и нитритов. Распространенными источниками углерода являются глюкоза, спирты и соли спиртов [Dong et al., 2019; Ge et al., 2015; Студенок и др., 2013].

Значительные объемы сточных вод поступают на очистку в аэротенки. Обязательным условием протекания процессов метаболизма в данных сооружениях является обеспечение вод растворенным кислородом посредством пневматических, механических и смешанного типа устройств [Ветошкин, 2004; Студенок и др., 2013]. Помимо аэротенков биологическая очистка сточных вод реализуется в биофильтрах. Отличие биофильтра от вышеупомянутого аппарата заключается в уменьшении продолжительности очистки в связи с наличием значительной концентрации различных групп микроорганизмов активного ила [Долина, 2011; Студенок и др., 2013].

Реализация процессов нитрификации и денитрификации обуславливается такими факторами как температура, значение pH, соотношение C/N, время гидравлического удержания, концентрация растворенного кислорода и другими. Наибольшее влияние на протекание очистки оказывают время удержания ила и скорость разбавления [Dong et al., 2019].

Рассмотренный метод обеспечивает высокую эффективность удаления азотных соединений. В то же время протекание стадии денитрификации требует внесения дополнительного источника углерода, если в очищаемых сточных водах наблюдается его недостаток. Кроме того, денитрифицирующие бактерии чувствительны к токсичным веществам. В результате протекания процессов образуется избыточное количество активного ила, поэтому требуются дополнительные затраты на его переработку или захоронение [Dong et al., 2019; Студенок и др., 2013]. Помимо этого, процессы нитрификации и денитрификации проходят в сооружениях ограниченного объема, что не применимо при очистке крупных объемов карьерных сточных вод.

ANAMMOX-процесс

ANAMMOX-процесс обеспечивает одновременное удаление аммонийной и нитритной форм азота анаэробными бактериями, использующими в качестве акцептора электронов нитрит-ионы и аммиак в качестве поставщика электронов. Данные бактерии могут быть представлены различными литотрофными группами [Dong et al., 2019; Гогина, 2010; Дубовик, Маркевич, 2016]: *V. Anammoxidans* в виде субстрата используют нитрит-ионы, а *Nitrosomonas* – диоксидазот. Среди перечисленных видов бактерий существует конкуренция за усвоение аммоний-иона. Тем не менее, результаты исследований показали, что *V. Anammoxidans* и *Nitrosomonas* могут одновременно существовать в водной системе [Гогина, 2010].

В результате ANAMMOX-процесса изначально преобразуется аммонийный и нитратный азот в нитритную форму, которая взаимодействует с аммоний-ионами с образованием газообразного азота. В дальнейших исследованиях было показано, что окисление в анаэробных условиях может протекать и в присутствии нитрат-иона. Характерным свойством процесса является отсутствие потребности в органическом субстрате, а также низкая скорость роста бактерий [Geetal., 2015; Дубовик, Маркевич, 2016; Студенок и др., 2013].

На эффективность протекания процесса ANAMMOX влияют внешние факторы, а именно температура, pH, субстраты, концентрация растворенного кислорода и прочее. Например, значение pH определяет концентрацию нитратов и аммоний-ионов, влияющих на активность бактерий. Исследования показывают, что температура 20–40°C, pH 6,7–8,3 и DO в пределах 4,0–1,0 мг/л являются оптимальными условиями [Dong et al., 2019; Гогина, 2010].

К преимуществам ANAMMOX-процесса по сравнению с биологической очисткой в аэротенках и биофильтрах можно отнести снижение концентрации нитритной и аммонийной форм азота без одновременного увеличения концентрации нитратной формы в очищаемых сточных водах. Кроме того, наблюдается уменьшение эксплуатационных затрат на электроэнергию на аэрацию в связи с неполным окислением ионов аммония. Также при протекании ANAMMOX образуется меньшее количество активного ила, что приводит к низким расходам на его удаление [Dong et al., 2019; Студенок и др., 2013].

Однако анаэробные бактерии чрезвычайно чувствительны к условиям окружающей среды, поэтому могут возникать трудности с контролем условий реакции для достижения эффективного ANAMMOX-процесса. Существуют следующие проблемы: низкая скорость роста бактерий *anammox*, трудности в поддержании их в системе и в контроле процесса частичной нитрификации [Benáková et al., 2018; Dong et al., 2019].

Фито-очистные системы

Фито-очистные системы (ФОС) представляют собой природно или искусственно созданные системы очистки, состоящие из водоупорного и фильтрующего слоев, на которых закреплены растения-макрофиты с техническими элементами для регулирования потока. В качестве макрофитов используются древесные и травянистые растения, например осока, которая интенсивно поглощает азотсодержащие соединения. Очистка сточных вод осуществляется при помощи природных механизмов самоочищения, а также технических устройств интенсифицирующих их [Рыбка и др., 2016; Щукин и др., 2014].

Очистка сточных вод в фито-очистных системах протекает за счет минеральной загрузки, растительности и ассоциированной с ней биоты. Первостепенно удаление загрязняющих веществ осуществляется биотой, для жизнедеятельности которой требуются азотсодержащие вещества. Растения преимущественно усваивают азот в виде нитратов и аммоний-ионов корневой системой [Рыбка и др., 2016; Щукин и др., 2014]. Часть протекающих процессов, например осаждение, ресуспендирование и транслокация не сопровождается изменением молекулярной структуры азотных соединений при их преобразовании. Помимо процесса физической транслокации в системе дополнительно протекают процессы восстановления и окисления азота, а именно аммонификация, нитрификация и денитрификация, ассимиляция, трансформация органического азота [Benáková et al., 2018; Рыбка и др., 2016].

Существует три разновидности фито-очистных систем. Азот в ФОС с открытой водной поверхностью удаляется в водной толще и далее в слое подстилки путем денитрификации. Помимо этого процесса происходит вывод аммиака в результате фотосинтеза водорослей. В ФОС с горизонтальным подповерхностным потоком главным механизмом удаления азота является процесс денитрификации. Удаление аммиака ограничено из-за недостатка кислорода в фильтрующем слое. Однако при внедрении процесса нитрификации из вышеописанной ФОС можно достичь полного удаления азота. В ФОС с вертикальным подповерхностным стоком создаются условия для диффузии кислорода из воздуха. В данной системе формируются условия для протекания процесса нитрификации [La Varga De et al., 2017; Rahimi et al., 2020; Vymazal, 2010].

Выделяются фито-очистные системы по типу биоплато, которые состоят из растительного и фильтрующего блоков и включает в себя плотики, соединенные в решетки посредством тросов. Каждая решетка содержит биосубстрат, который служит основой для роста водных растений – гидрофитов [Солнышкова и др., 2017]. Процесс очистки на биоплато базируется на использовании природных механизмов очистки с помощью растений гидрофитов и бактерий [Евдокимова и др., 2015; Сивкова и др., 2013; Солнышкова и др., 2017].

В зарубежных странах аналогом вышеописанных систем являются искусственно сконструированные водно-болотные экосистемы – «constructed wetlands». В этих системах в процесс очистки также вовлечены болотная растительность, почвы и естественные микробные сообщества [Dashko et al., 2016]. Следует отметить, что главную роль в процессах трансформации азотных соединений играют нитрифицирующие и денитрифицирующие бактерии.

Помимо бактерий большое значение в процессе очистки имеет высшая растительность. Вклад растений, с точки зрения удаления азота, варьируется в пределах 0,5–40 % [La Varga De et al., 2017]. Наиболее используемыми видами являются тростник, рогоз и камыш [Ji et al., 2020; Vymazal, 2011; Vymazal, 2013]. Их основная роль заключается в создании условий для микроорганизмов в корневой зоне, увеличивая эффективность химических и биохимических процессов. Также растительность выступает в качестве ассимиляторов загрязняющих веществ в свои ткани [Aleksenko et al., 2020; Гусев, 2013; Пашкевич и др., 2020].

Эксплуатация биоплато в странах Скандинавии и Северной Америке показывает, что они эффективно доочищают сточные воды и при минусовых температурах. Это достигается изоляцией заболоченного участка снежным, ледяным и естественным растительным покровом [Varma et al., 2021; Евдокимова и др., 2015; Сивков и др., 2013].

Биопруды

Схожими по технологии очистки с биоплато являются биопруды, представляющие естественные или искусственно созданные понижения рельефа для очистки сточных вод [Тимофеева и др., 2016]. Водная растительность в этих сооружениях располагается по определенной схеме и представлена камышом, тростником, рогозом, рдестом, телорезом и другими макрофитами, занимающими 30–40% водной поверхности. Перечисленная растительность выполняет следующие функции: фильтрационную, поглотительную (поглощение биогенных элементов и некоторых органических веществ, накопительную, окислительную, детоксикационную [Лу-кьянчиков, 2010].

Аналогично биоплато в биопрудах в процессе очистки помимо растительности принимает участие и сообщество микроорганизмов. Например, зеленые водоросли способствуют снижению концентрации не только соединений азота, но и других остаточных загрязняющих веществ. В то же время применение в биологических прудах искусственной аэрации позволяет достичь эффективной производительности, качественных характеристик очищенных вод, а также минимизировать влияние климатических условий [Долина, 2011].

Применение на предприятии ООО «Сахар Золотухино» трех проточных биологических прудов-отстойников, в которых произрастают хлорелла и рогоз, способствует эффективному очищению от аммоний-иона на 45%, от нитрат-иона – на 11%, нитрит-иона – на 96% [Лу-кьянчиков, 2010].

Микроводоросли

Микроводоросли широко используются при биотестировании отходов [Ivanov et al., 2018]. Многие российские исследователи и их коллеги из зарубежья предлагают производить очистку сточных вод от широкого спектра органических и неорганических загрязнителей [Mohsenpour et al., 2021; Политаева и др., 2017].

Микроводоросли ассимилируют аммонийную, нитратную и нитритную формы азота. Среди них предпочтительна первая форма, поскольку микроводоросли могут ассимилировать ее, затрачивая меньше энергии. Перед процессом ассимиляции происходит уменьшение концентрации нитратов и нитритов в результате двухступенчатого процесса, который протекает при участии нитритредуктазы [Jia et al., 2016; Rahimi et al., 2020]. На систему микроводорослей оказывают влияние такие факторы как свет, его длина волны и интенсивность, длительность освещения и pH среды [Jia et al., 2016].

Применение микроводорослей для очистки сточных вод осуществляется и совместно с бактериями. При этом микроводоросли синтезируют органические вещества, ассимилирующиеся бактериями. Некоторые виды бактерий, в свою очередь, могут выделять гормоны, способствующие росту водорослей.

Существуют системы, в которых микроводоросли выступают в роли помощников, поставляя в водную систему растворенный кислород. Микроводоросли выделяют в воду до 14 мг/дм³ атомарного кислорода, который обладает повышенной способностью к окислению азотных соединений и прочих загрязнителей. Помимо этого, кислород потребляется бактериями для разложения органических соединений до неорганических [Jia et al., 2016].

Изучение процесса очистки при помощи консорциумов водоросли *Chlorella* и микроорганизмов, а также водоросли и водной растительности проводилось в

Казанском национальном исследовательском техническом университете. В ходе проведенных экспериментов было установлено, что эффективность очистки от нитрат-иона при индивидуальном культивировании микроводоросли *Chlorellavulgaris* достигает около 56%, а от нитрит-иона – более 97%. При совместном культивировании *Chlorellavulgaris* и микроорганизмов активного ила была достигнута 100%-ная эффективность извлечения аммоний-иона из сточных вод, начиная с десятого дня эксперимента [Кирилина и др., 2013].

Результаты работы и их обсуждение

Удаление азотных соединений из сточных вод может осуществляться при помощи различных методов биологической очистки. Выбор и реализация того или иного метода на производстве обуславливается целями, исходными условиями и результатом, которого необходимо достичь.

Особенностью карьерных сточных вод, которая лимитирует применение различных вариантов удаления азотных соединений, является большой объем их образования. Не каждый из вышерассмотренных методов может обеспечить достаточную пропускную способность для достижения их эффективной очистки. Ниже приведена сравнительная таблица (табл. 1) с достоинствами и недостатками рассмотренных биологических методов.

Таблица 1 / Table 1

Сравнительная таблица рассмотренных методов очистки /

Comparative table of the considered treatment methods

Метод очистки / Purification method	Достоинства / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Процесс нитрофикации и денитрификации (аэротенки, биофильтры) / The process of nitrification and denitrification (aerotanks, biofilters)	1. Отсутствие неприятных запахов / Absence of unpleasant odors. 2. Долгий срок службы сооружений / Long service life of structures	1. Образование избыточного количества активного ила / Formation of the excess amount of activated sludge. 2. Высокие энергозатраты на аэрацию / High energy consumption for aeration. 3. Нехватка производительности для очистки больших объемов сточных вод / Lack of the efficiency for large volumes of waste-water treatment
Анаммох-процесс / Anammox-process	1. Уменьшение концентрации аммонийной и нитритной форм азота без одновременного увеличения концентрации нитратов / Decrease in the concentration of ammonium and nitrite forms of nitrogen without a simultaneous increase in the concentration of nitrates. 2. Снижение затрат на электроэнергию на аэрацию / Cost cutting of electrical energy for aeration. 3. Меньшие объемы образования активного ила по сравнению с аэротенками и биофильтрами / Smaller volumes of activated sludge formation compared to aerotanks and biofilters	1. Необходимость поддержания возраста ила и его удержания в очистном сооружении / Necessity of maintaining the age of sludge and its retention in the purification plant. 2. Необходимость поддержания высокой концентрации ила для эффективности очистки / Necessity of maintaining a high concentration of sludge for purification efficiency

Метод очистки / Purification method	Достоинства / Advantages	Недостатки / Disadvantages
Фито-очистные системы / Phyto-purification system Constructed wetlands Биоплато / Bioplato Биопруды / Bioponds	1. Использование только солнечной энергии для процесса очистки / Use of only solar energy for the purification process. 2. Отсутствие необходимости в химических реагентах/No need for chemicals	1. Необходимость значительных площадей для проведения очистки / Necessity of considerable areas for purification. 2. Зависимость эффективности очистки от расхода сточных вод / Dependence of purification efficiency on wastewater consumption
Использование микроводорослей / Use of microalgae	1. Комплексная очистка загрязняющих веществ / Complex purification of pollutants. 2. Минимизация капитальных и эксплуатационных затрат / Minimization of capital and operating costs. 3. Не образуется отходов, требующих утилизации / No waste is generated that needs to be disposed	1. Часть штаммов не эффективна при низких температурах / Some strains are not effective at low temperatures

В ходе проведенного сравнительного анализа видно, что перспективным методом биологической очистки карьерных сточных вод от азотных соединений является система комплексной очистки по типу constructed wetlands с комплексным применением видов высшей и низшей растительности. Внесение микроводорослей приведет не только к аддитивному эффекту удаления питательных элементов, но и поспособствует обогащению воды кислородом, который необходим для деятельности высшей растительности.

Внедрение данной системы в эксплуатирующиеся гидротехнические сооружения на горнопромышленных предприятиях (например, пруд-отстойник) не требует изъятия и отчуждения дополнительных земель под строительство объектов очистки вод или монтирование оборудования. Обеспечение работоспособности данного метода на протяжении всего срока эксплуатации не требует значительных затрат в связи с протеканием естественных процессов жизнедеятельности без вмешательства человека. Также не требуется внесение химических реагентов для удаления азотных соединений, так как снижение их концентрации происходит в процессе жизнедеятельности растений и микроорганизмов. Помимо этого в процессе эксплуатации не осуществляется образование отходов (высококонцентрированных растворов, избыточного активного ила), следовательно, отсутствует необходимость затрачивать ресурсы на их обезвреживание или захоронение.

ВЫВОДЫ

В настоящее время удаление азотных соединений посредством биологической очистки может осуществляться различными методами, а именно в результате процесса нитрификации и денитрификации, Анаммох-процесса, фито-очистных систем, биоплато, биопрудов и систем микроводорослей. Применимость того или иного метода ограничивается условиями окружающей среды, пропускной способностью сооружений и прочими факторами.

Наиболее предпочтительным методом очистки карьерных сточных вод была признана система комплексной очистки constructed wetlands и ее внедрение в су-

ществующую систему очистки предприятий. Данный метод можно применять в условиях большого объема образования сточных вод, а также при минимальных капитальных и эксплуатационных затратах.

Литература

1. Бекузарова, С.А., Бурдзиева, О.Г., Качмазов, Д.Г., Майсурадзе, М.В. Экологические проблемы на территориях с горнодобывающей промышленностью и активная рекультивация токсических почв. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2018. – №4. – С. 127–138. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.20130.
2. Белин В.А., Парамонов Г.П., Жамьян Ж. Особенности изготовления и применения смесевых взрывчатых веществ типа АСДТ на горных предприятиях Монголии. // *Записки Горного института*. – 2018. – Т. 232. – С. 364–367. DOI:10.31897/pmi.2018.4.364.
3. Ветошкин А.Г. Процессы и аппараты защиты гидросферы. Учебное пособие. / А.Г. Ветошкин. – Пенза: Изд-во Пенз. гос. ун-та, 2004. – 188 с.
4. Гавришин А.И. Шахтные воды в управлении качеством грунтовых вод в Восточном Донбассе. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2020. – Т. 10. №3. – С. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008.
5. Гогина Е.С. Удаление биогенных элементов из сточных вод: монография. // ГОУ ВПО Моск. гос. строит. уни-т. – М.: МСГУ, 2010. – 120 с.
6. Гусев А.И. Биогеохимические индикаторы техногенного загрязнения экосистем горно-рудными предприятиями рудного и Горного Алтая. // *Записки Горного института*. – 2013. – Т. 203. – С. 155–159.
7. Долина Л.Ф. Очистка сточных вод от биогенных элементов: монография. – Днепропетровск: Континент, 2011. – 198 с.
8. Дубовик О.С., Маркевич Р.М. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод. // *Труды БГТУ*. – 2016. – №4. – С. 232–238.
9. Евдокимова Г.А., Иванова Л.А., Мозгова Н.П., Мязин В.А., Фокина Н.В. Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях. // *Экология и промышленность России*. – 2015. – Т. 19. №9. – С. 35–41. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-9-35-41
10. Кирилина Т.В., Ханг Д.Т., Сироткин А.С. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов. // *Вестник Казанского технологического университета*. – 2013. – Т. 16. №8. – С. 200–203.
11. Культивирование и использование микроводорослей *Chlorella* и высших водных растений ряски *Lemna*: монография. / Н.А. Политаева, Ю.А. Смятская, Т.А. Кузнецова, Л.Н. Ольшанская, Р.Ш. Валиев. – СПб: Издательство Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого, 2017. – 87 с.
12. Лукьянчиков Д.И. Использование биологических прудов в процессе промышленных вод от загрязнений и использование их илистых осадков в сельском хозяйстве. // *Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии*. – 2010. – №6. – С. 55–57.
13. Пашкевич М.А., Бек Дж., Матвеева В.А., Алексеенко А.В. Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга. // *Записки Горного института*. – 2020. – Т. 241. – С. 125–130. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.125.
14. Реутова Н.В., Реутова Т.В., Дреева Ф.Р., Хутуев А.М. Микроэлементный состав поверхностных вод бассейна реки Малка и геохимические особенности региона. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2021. – Т. 11. №3. – С. 172–184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014.
15. Рыбка К.Ю., Щеголькова Н.М. Механизмы очистки сточных вод от биогенных элементов (азота и фосфора) в фито-очистных системах. // *Экосистемы: экология и динамика*. – 2018. – Т. 2. №4. – С. 144–171. DOI:10.1017/SBO9781107415324.004
16. Сивкова Е.Е., Семёнов С.Ю. Использование технологии «constructed wetlands» для

очистки сточных вод малых населенных пунктов и предприятий. // Известие Томского государственного университета. Биология. –2013. – Т. 4. № 12. – С. 123–130.

17. Солнышкова М.А., Журавкова М.А., Пашкевич М.А. Бионидикация как способ оценки эффективности очистки карьерных сточных вод с использованием биоплато. // Инновационные подходы в современной науке. – 2017. – Т. 10. №10. – С. 82–86.

18. Студенок А.Г., Студенок Г.А., Ревво А.В. Оценка методов очистки сточных вод от соединений азота для дренажных вод горных предприятий. // Известия Уральского государственного горного университета. – 2013. – №2(30). – С. 26–30.

19. Тимофеева С.С., Ульрих Д.В., Тимофеев С.С. Фитофильтры для очистки сточных вод. // Вестник технологического университета. – 2016. – Т. 19. №16. – С. 162–165.

20. Черемисина О.В. Технологические аспекты защиты гидросферы от ионов тяжелых металлов в зоне влияния объектов цветной металлургии. // Записки Горного института. – 2013. – Т. 203. – С. 116–119.

21. Щукин И.С., Авдеева М.А., Галкина А.А., Луферчик Я.С. Выбор растений для фитофильтров очистки поверхностных сточных вод. // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. – 2014. – №1. – С. 200–213.

22. Alekseenko V.A., Shvydkaya N.V., Alekseenko A.V., Machevariani M.M., Bech J., Pashkevich M.A., Puzanov A.V., Nastavkin A.V., Roca N. Element Accumulation Patterns of Native Plant Species under the Natural Geochemical Stress. // Plants. – 2020. – Vol. 10. No.1. – Article 33. DOI:10.3390/plants10010033.

23. Benáková A., Johanidesová I., Kelbich P., Pospíšil V., Wanner J. The increase of process stability in removing ammonia nitrogen from wastewater // Water Science and Technology. – 2018. – Vol. 77. No.9. pp. 2213–2219. DOI: 10.2166/wst.2018.135.

24. Chukaeva M.A., Matveeva V.A. The present-day hydrochemical state of hydroecosystems suffering the technogenic effect of AO Apatit. // Water Resources. – 2018. – Vol. 45. No.6. – pp. 935–940. DOI: 10.1134/s0097807818060040.

25. Dashko R., Shidlovskaya A. Impact of microbial activity on soil properties // Canadian Geotechnical Journal. – 2016. – Vol. 53. No.9. – pp. 1386–1397. DOI: 10.1139/cgj-2015-0649

26. De la Varga D., Soto M. Arias C.A., Dion van Oirschot, Kilian R., Pascual A., Álvarez Juan A. Chapter 8. Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients. // Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater. – PA: IGI Global, 2017. – pp. 202–230. DOI:10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008.

27. Dong Y., Yuan H., Zhang R., Zhu N. Removal of ammonia nitrogen from wastewater: A review. // Transactions of the ASABE. –2019. – Vol. 62. No.6. – pp. 1767–1778.

28. Ge S., Wang Sh., Yang X., Qiu S., Li B., Peng Y.. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review. // Chemosphere. – 2015. – Vol. 140. – pp. 85–98. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.02.004.

29. Ivanov A.V., Smirnov Y.D., Petrov G.I. Investigation of waste properties of subway construction as a potential component of soil layer. // Journal of Ecological Engineering. –2018. – Vol. 19. No.5. – pp. 59–69. DOI: 10.12911/22998993/91267.

30. Ji B., Zhao Ya., Vymazal J., Qiao S., Wei T., Li J., Mander Ü. Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge. // Ecological Engineering. –2020. – Vol. 157. – Article. 105992. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105992.

31. Jia H., Yuan Q. Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae-bacteria consortia. // Cogent Environmental Science. – 2016. – Vol. 2. No.1. – Article 1275089. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.

32. Korotaeva A. Wastewater treatment of mining enterprises from nitrogen compounds in the Arctic. // SHS Web of Conferences. – 2020. – Vol. 84. – Article 04001. DOI: 10.1051/shsconf/20208404001.

33. Mohsenpour S.F., Hennige S., Willoughby N., Adeloye A., Gutierrez T. Integrating microalgae into wastewater treatment: A review. // Science of the Total Environment. –2021. – Vol. 752. – Article. 142168. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142168.

34. Patokin D., Danilov A., Isakov A. Environmental monitoring of natural waters in the zone of impact of an enterprise producing explosives. // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – Vol. 578. No.1. – Article 012038. DOI:10.1088/1755-1315/578/1/012038.
35. Petrov D.S. et al. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds. // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1399. No.5. – Article. 055044. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055044.
36. Rahimi S., Modin O., Mijakovic I. Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater. // Biotechnology Advances. – 2020. – Vol. 43. – Article. 107570. DOI:10.1016/j.biotechadv.2012.01.019.
37. Varma M., Gupta A.K., Ghosal P.S., Majumder A. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. // Science of the Total Environment. – 2021. – Vol. 755. – Article 142540. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.142540.
38. Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment // Water (Switzerland). – 2010. – Vol. 2. No.3. – pp. 530–549. DOI:10.3390/w2030530.
39. Vymazal J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. // Hydrobiologia. – 2011. – Vol. 674. – pp. 133–156. DOI: 10.1007/s10750-011-0738-9.
40. Vymazal J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. // Ecological Engineering. – 2013. – Vol. 61. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.023.

References

1. Bekuzarova S.A., Burdzieva O.G., Kachmazov D.G., Maysuradze M.V. Environmental problems in the territories with the mining industry, and active remediation of toxic soils. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2018. No.4. pp. 127–138. DOI: 10.23671/VNC.2018.4.20130. (In Russ.)
2. Belin V.A., Paramonov G.P., Jamiyan J. Peculiarities of manufacturing and application of mixed explosives of anfo type at mining enterprises of Mongolia. *Journal of Mining Institute*. 2018. Vol. 232. pp. 364-367. DOI: 10.31897/pmi.2018.4.364. (In Russ.)
3. Vetoshkin A.G. Hydrosphere protection processes and devices. Tutorial. A.G. Vetoshkin. Penza. Publishing house Penz. state University, 2004. 188 p. (In Russ.)
4. Gavrishin A.I. The mine water in the management of groundwater pollution in the Eastern Donbass. *Geology and Geophysics of Russian South*, 2020. Vol. 10. No.3. pp. 127–138. DOI: 10.46698/VNC.2020.62.81.008. (In Russ.)
5. Gogina E.S. Removal of biogenic elements from wastewater: monograph / GOU VPO Mosk. state builds. uni-t. Moscow. MSGU, 2010. 120 p. (In Russ.)
6. Gusev A.I. Biogeochemical indicators of the technogenic pollution ecosystems by mining enterprises of rudny and mountain Altai. *Journal of Mining Institute*, 2013. Vol. 203. pp. 155-159. (In Russ.)
7. Dolina L.F. Wastewater treatment from biogenic elements: monograph. Dnepropetrovsk. Continent, 2011. 198 p. (In Russ.)
8. Dubovik O.S., Markevich R.M. Biotechnological advancement of nitrogen and phosphorus removal from city sewage. *Proceedings of BSTU*, 2016. No.4. pp. 232-238. (In Russ.)
9. Yevdokimova G.A., Ivanova L.A., Mozgova N.P., Myazin V.A., Fokina N.V. Floating Bioplateau for Treatment of Waste Quarry Waters from Mineral Nitrogen Compounds at the Arctic Conditions. *Ecology and industry of Russia*, 2015. Vol. 19. No.9. pp. 35-41. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-9-35-41 (In Russ.)
10. Kirilina T.V., Hang D.T.T., Sirotkin A.S. Evaluation of the efficiency of wastewater treatment using unicellular and multicellular hydrobionts. *Bulletin of Kazan Technological University*, 2013. Vol. 16. No.8. pp. 200-203. (In Russ.)
11. Cultivation and use of microalgae *Chlorella* and higher aquatic plants *Lemna* duckweed: monograph. N.A. Politaeva, Yu.A. Smyatskaya, T.A. Kuznetsova, L.N. Olshanskaya, R.Sh.

Valiev. St. Petersburg: Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University Publishing House, 2017. 87 p. (In Russ.)

12. Lukyanchikov D.I. The use of biological ponds in the process of industrial waters from pollution and the use of their muddy sediments in agriculture. Bulletin of the Kursk State Agricultural Academy. 2010. No.6. pp. 55-57. (In Russ.)

13. Pashkevich M.A., Bech J., Matveeva V.A., Alekseenko A.V. Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. Journal of Mining University. 2020. Vol. 241. pp. 125-130. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.125. (In Russ.)

14. Reutova N.V., Reutova T.V., Dreeva F.R., Khutuev A.M. Microelements in the surface waters of the Malka River basin and geochemical features of the region. Geology and Geophysics of Russian South. 2021. Vol. 11 No.3. pp 172-184. DOI: 10.46698/VNC.2021.20.60.014. (In Russ.)

15. Rybka K.Yu., Shchegolkova N.M. Mechanisms of nutrients (nitrogen and phosphorus) removal from wastewater in constructed wetlands. Ecosystems: ecology and dynamics. 2018. Vol. 2. No.4. pp. 144-171. DOI:10.1017/CBO9781107415324.004. (In Russ.)

16. Sivkova E.E., Semenov S.Yu. Using «constructed wetlands» technology for wastewater treatment in small communities and enterprises. Famous Tomsk State University. Biology. 2013. Vol. 4. No.12. pp. 123-130. (In Russ.)

17. Solnyshkova M.A., Zhuravkova M.A., Pashkevich M.A. Bionidication as a method for assessing the efficiency of pit wastewater treatment using bioplato. Innovative approaches in modern science. 2017. Vol. 10. No.10. pp. 82–86. (In Russ.)

18. Studenok A.G., Studenok G.A., Revvo A.V. Evaluation of waste water purification methods from nitrogen compounds for drainage water of mining enterprises. Bulletin of the Ural State Mining University, 2013. No.2(30). pp. 26-30. (In Russ.)

19. Timofeeva S.S., Ulrich D.V., Timofeev S.S. Fito filters for waste water purification // Technological University Bulletin, 2016. Vol. 19. No.16. pp. 162-165. (In Russ.)

20. Cheremisina O.V. Aspect of technology protection of hydrosphere against ions of heavy metals in a zone of influence of objects. Journal of Mining Institute. 2013. Vol. 203. pp. 116-119. (In Russ.)

21. Shchukin I.S., Avdeeva M.A., Galkina A.A., Luferschik Ja.S. Plants selection for stormwater phytofilters. PNRPU Bulletin. Construction and architecture, 2014. No.1. pp. 200-213 (In Russ.)

22. Alekseenko, V.A., Shvydkaya, N.V., Alekseenko, A.V., Machevariani, M.M., Bech, J., Pashkevich, M.A., Puzanov, A.V., Nastavkin, A.V., Roca, N. Element Accumulation Patterns of Native Plant Species under the Natural Geochemical Stress. Plants, 2020. Vol. 10. No.1. Article 33. DOI:10.3390/plants10010033.

23. Benáková A., Johanidesová I., Kelbich P., Pospíšil V., Wanner J. The increase of process stability in removing ammonia nitrogen from wastewater. Water Science and Technology, 2018. Vol. 77. No.9. pp. 2213-2219. DOI: 10.2166/wst.2018.135.

24. Chukaeva M.A., Matveeva V.A. The present-day hydrochemical state of hydroecosystems suffering the technogenic effect of AO Apatit. Water Resources, 2018. Vol. 45. No.6. pp. 935-940. DOI: 10.1134/s0097807818060040.

25. Dashko R., Shidlovskaya A. Impact of microbial activity on soil properties. Canadian Geotechnical Journal, 2016. Vol. 53. No.9. pp. 1386-1397. DOI: 10.1139/cgj-2015-0649

26. De la Varga D., Soto M. Arias C.A., Dion van Oirschot, Kilian R., Pascual A., Álvarez Juan A. Chapter 8. Constructed wetlands for industrial wastewater treatment and removal of nutrients. Technologies for the Treatment and Recovery of Nutrients from Industrial Wastewater. PA: IGI Global, 2017. pp. 202-230. DOI:10.4018/978-1-5225-1037-6.ch008.

27. Dong Y., Yuan H, Zhang R., Zhu N. Removal of ammonia nitrogen from wastewater: A review. Transactions of the ASABE, 2019. Vol. 62. No.6. pp. 1767-1778.

28. Ge S., Wang Sh., Yang X., Qiu S., Li B., Peng Y. Detection of nitrifiers and evaluation of partial nitrification for wastewater treatment: A review. Chemosphere, 2015. Vol. 140. pp. 85-98.

DOI: 10.1016/j.chemosphere.2015.02.004.

29. Ivanov A.V., Smirnov Y.D., Petrov G.I. Investigation of waste properties of subway construction as a potential component of soil layer. *Journal of Ecological Engineering*, 2018. Vol. 19. No.5. pp. 59-69. DOI: 10.12911/22998993/91267.

30. Ji B., Zhao Ya., Vymazal J., Qiao S., Wei T., Li J., Mander Ü. Can subsurface flow constructed wetlands be applied in cold climate regions? A review of the current knowledge. *Ecological Engineering*, 2020. Vol. 157. Article. 105992. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2020.105992.

31. Jia H., Yuan Q. Removal of nitrogen from wastewater using microalgae and microalgae-bacteria consortia. *Cogent Environmental Science*, 2016. Vol. 2. No.1. Article 1275089. DOI: 10.1080/23311843.2016.1275089.

32. Korotaeva A. Wastewater treatment of mining enterprises from nitrogen compounds in the Arctic. *SHS Web of Conferences*, 2020. Vol. 84. Article 04001. DOI: 10.1051/shsconf/20208404001.

33. Mohsenpour S.F., Hennige S., Willoughby N., Adeloye A., Gutierrez T. Integrating micro-algae into wastewater treatment: A review. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 752. Article. 142168. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142168.

34. Patokin D., Danilov A., Isakov A. Environmental monitoring of natural waters in the zone of impact of an enterprise producing explosives. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 578. No.1. Article 012038. DOI:10.1088/1755-1315/578/1/012038.

35. Petrov D.S. et al. Phytoremediation efficiency of duckweed communities for mining enterprises wastewater treatment from nitrogen compounds. *Journal of Physics: Conference Series*. 2019. Vol. 1399. No.5. Article. 055044. DOI: 10.1088/1742-6596/1399/5/055044.

36. Rahimi S., Modin O., Mijakovic I. Technologies for biological removal and recovery of nitrogen from wastewater. *Biotechnology Advances*. 2020. Vol. 43. Article. 107570. DOI:10.1016/j.biotechadv.2020.01.019.

37. Varma M., Gupta A.K., Ghosal P.S., Majumder A. A review on performance of constructed wetlands in tropical and cold climate: Insights of mechanism, role of influencing factors, and system modification in low temperature. *Science of the Total Environment*. 2021. Vol. 755. Article 142540. DOI:10.1016/j.scitotenv.2020.142540.

38. Vymazal J. Constructed wetlands for wastewater treatment. *Water (Switzerland)*. 2010. Vol. 2. No.3. pp. 530-549. DOI:10.3390/w2030530.

39. Vymazal J. Plants used in constructed wetlands with horizontal subsurface flow: A review. *Hydrobiologia*. 2011. Vol. 674. pp. 133-156. DOI: 10.1007/s10750-011-0738-9

40. Vymazal J. Emergent plants used in free water surface constructed wetlands: A review. *Ecological Engineering*. 2013. Vol. 61. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2013.06.023.