



Научная статья

2.6.13 – Процессы и аппараты химических технологий (технические науки)
УДК 628.169.2

doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029

 EDN: LVJAFK

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

Дарья Петровна Скорикова¹, Юлия Сергеевна Лазуткина²,
Ольга Михайловна Горелова³

^{1, 2, 3} Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, Барнаул, Россия

¹ skorikova_daria@mail.ru

² lazutkina.us@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8782-6443>

³ osgor777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7397-7803>

Аннотация. Работа посвящена исследованиям по обезвоживанию придонных осадков пресноводного озера. Необходимость уплотнения ила обусловлена технологией реабилитации водоема. При поиске флокулянта руководствовались следующими требованиями: высокой скоростью седиментации взвешенных частиц, эффективностью при осветлении надосадочной воды и уплотнении сгущенного осадка. При исследованиях выполнялись эксперименты с илом озера Завьялово, применялись флокулянты Гринлайф К35, ПолиДАДМАХ, полиакриламид. В работе проводилась оценка фитотоксичности уплотненных осадков методом биотестирования и выявлялось соответствие обезвоженного и высушенного ила требованиям ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия» по содержанию тяжелых металлов.

Ключевые слова: флокулянт, Гринлайф К35, ПолиДАДМАХ, мутность, обезвоживание осадков, восстановление озер, биотестирование, тяжелые металлы, сапропель.

Для цитирования: Скорикова Д. П., Лазуткина Ю. С., Горелова О. М. Исследования по применению флокулянтов для восстановления пресноводных озер // Ползуновский вестник. 2025. № 1, С. 232–237. doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029. EDN : <https://elibrary.ru/LVJAFK>.

Original article

STUDIES ON THE APPLICATION OF FLOCCULATION FOR FRESHWATER LAKE RESTORATION

Daria P. Skorikova¹, Yulia S. Lazutkina², Olga M. Gorelova³

^{1, 2, 3} Polzunov Altai State Technical University, Barnaul, Russia

¹ skorikova_daria@mail.ru

² lazutkina.us@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8782-6443>

³ osgor777@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7397-7803>

Abstract. The work is devoted to research on dewatering of bottom sediments of a freshwater lake. The necessity of sludge thickening is caused by the rehabilitation technology. The search for flocculant was guided by the following requirements: high sedimentation rate of suspended particles, efficiency in clarification of supernatant water and thickening of thickened sludge. Experiments with sludge from Lake Zavyalovo were carried out, flocculants Greenlife K35, polyDADMAH, polyacrylamide were used. Phytotoxicity of compacted sludge was assessed by biotesting method and compliance of dewatered and dried sludge with the requirements of GOST R 54000-2010 "Organic fertilizers. Sapropels. General technical conditions" on the content of heavy metals.

Keywords: flocculant, Greenlife K35, PolyDADMAH, turbidity, sludge dewatering, lake restoration, biotesting, heavy metals, sapropel.

For citation: Skorikova, D. P., Lazutkina, Yu. S. & Gorelova, O. M. (2025). Studies on the application of flocculation for freshwater lake restoration. *Polzunovskiy vestnik*, (1), 232-237. (In Russ). doi: 10.25712/ASTU.2072-8921.2025.01.029. EDN : <https://elibrary.ru/LVJAFK>.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение водных ресурсов является актуальной задачей для органов государственной власти и населения нашей страны. Поиск технологических решений, направленных на сохранение и

рекультивацию водных объектов, позволит восстановить качество водных объектов и получить эффективные органические удобрения.

В России с 2019 года реализуется проект «Сохранение уникальных водных объектов» в

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЭСНОВОДНЫХ ОЗЕР

рамках национального проекта «Экология». В связи с этим Администрацией Завьяловского района Алтайского края было сформулировано техническое задание по расчистке озера Завьялово (Завьяловский район Алтайского края). Ученые ИВЭП СО РАН (г. Барнаул) провели анализ современного состояния водного объекта для обоснования мероприятий по его реабилитации. В изученном экспертном заключении представлена оценка природных предпосылок формирования, функционирования и эволюции экосистемы озера Завьялово, влияния антропогенных факторов и его современного экологического состояния [1].

Антропогенные факторы в современных природных условиях накладываются на естественные отрицательные процессы, приводящие к заливанию водоема, а зачастую усугубляют негативные процессы. В озере Завьялово в настоящее время находится значительный объем иловых отложений, что сократило глубину и акваторию водоема.

Также наблюдается смена одного биоценоза другим – озеро превращается в болото. Сукцессия водоема проявляется в замене одних видов флоры и фауны на другие, появлении большого количества сорной растительности, росте популяции насекомых, при этом утрачивается народно-хозяйственное и рекреационное значение водоема. Потенциальная ценность озера сделала целесообразным его восстановление в рамках федеральной программы.

МЕТОДЫ

Технология оздоровления водоема предполагает изъятие придонного ила, намыв его на иловые карты и в геотубы. Извлекаемый осадок является сильно обводненным, а естественное обезвоживание его происходит продолжительное время. Ускорить процесс поможет введение специальных реагентов – коагулянтов или флокулянтов.

Флокулянты используют там, где нужно агрегировать мелкие частицы в большие группы. Целью данного процесса может являться как очищенная вода, так и сами частицы [2].

В сельском хозяйстве флокулянтами укрепляют почвы, состоящие из мелких частиц, добавка такого реагента способствует удержанию в почве влаги. В горно-обогатительной промышленности флокулянты способствуют повышению выхода концентрата цветных и черных металлов, а также угля.

Для очистки воды флокулянты применяют:

- предприятия, чтобы очистить подтоварную и попутно добываемую воду или промышленные стоки до показателей, при которых можно сбросить её на очистные сооружения без вреда для окружающей среды или вернуть в производственный цикл;

- станции водоочистки, где реагенты добавляются в воду перед отстойниками и осветлителями, что ускоряет формирование и осаждение хлопьев, делает воду прозрачнее, позволяет сочетать компактность оборудования и производительность станции;

- узлы обезвоживания осадков, где флокулянты способствуют обезвоживанию осадков с целью сокращения площадей участков размещения и сушки [3].

Существенным недостатком флокуляции является использование реагентов, зачастую продуктов органического синтеза. При этом флокулянт концентрируется в получаемом осадке, что может ограничивать его использование.

При обезвоживании озерного ила, как правило, используются флокулянты, которые представляют собой полиэлектролиты на основе полиакриламида.

Подбор оптимальной дозы реагента для обезвоживания придонного осадка будет способствовать ресурсосбережению при реализации технологии реабилитации пресноводного озера. Восстановление озера с последующим использованием его в качестве водоисточника и рекреационного объекта является примером рационального природопользования.

Осадок пресноводных озер (сапропель) может применяться в качестве почвообразующего сельскохозяйственного удобрения [4]. Сочетание процессов восстановления озера с одновременным получением товарного продукта «Сапропель» позволит повысить инвестиционную привлекательность проекта.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Целью научной работы являлся поиск флокулянта, способствующего быстрому обезвоживанию ила озера Завьялово. Важным условием при выборе реагента являлась его безопасность для растительного и животного мира водоема. Еще одним направлением исследований являлась оценка возможности использования полученного обезвоженного ила в качестве удобрения «Сапропель».

Извлекаемые земснарядом природные залежи сильно обводнены, вследствие чего процесс естественного их обезвоживания характеризуется большой продолжительностью. Использование различных приемов интенсификации разделения жидкой и твердой фазы является целесообразным. В большинстве случаев для ускорения обезвоживания осадка нашел применение процесс флокуляции.

На первом этапе исследований проводился подбор оптимальной концентрации раствора флокулянта, также определялась доза его введения в иловую смесь. Изучалось действие как флокулянта, рекомендованного в проектной документации Гринлайф К35 (ГК35), так и других реагентов: полиакриламида (ПАА) и ПолиДАДМАХ (ПДМ).

Оценка эффективности действия флокулянта проводилась путем определения мутности осветленного слоя по ГОСТ Р 57164-2016 [5, 6].

При изучении процесса флокуляции варьировались:

- концентрации рабочих растворов флокулянтов в диапазоне от 0,4 до 4 г/л;

- дозы флокулянтов в диапазоне от 1 до 5 мл рабочего раствора на 100 мл образца суспензии придонного осадка.

Для исследований использовалась суспензия, откачанная земснарядом из озера Завьялово. Несколько образцов были смешаны между собой для усреднения состава.

Концентрация раствора флокулянта принималась исходя из рекомендаций производителя

(4 г/л вещества в воде) [7]. Однако в ходе лабораторных исследований было выявлено, что Гринлайф К35 при таком содержании представляет собой густую вязкую массу, которую будет технически сложно и энергозатратно перемещать по трубопроводу, а также смешивать с илом. Исходя из этого, было решено снизить его концентрацию в 10 раз до 0,4 г/л. Для остальных флокулянтов, которые удовлетворительно растворялись в дистиллированной воде, были приняты более высокие концентрации – 4 г/л.

В ходе экспериментов к 100 мл суспензии добавляли от 1 до 5 мл растворов реагентов Гринлайф К35, ПАА и ПолиДАДМАХ (органический коагулянт). В течение 30 минут происходило осветление, после

чего определялась мутность надосадочного слоя. Зависимости мутности воды от дозы введенного реагента представлены на рисунке 1.

Органический коагулянт ПолиДАДМАХ показал лучший результат – введение его раствора в количестве 3 мл на 100 мл осадка, снизило мутность надосадочной воды с 70 мг/л до 3 мг/л (на 96 %), тогда как в аналогичных условиях Гринлайф К35 показал эффективность всего 43 %.

Наилучшим по проведенным исследованиям показал себя органический коагулянт, но, учитывая, что его концентрация была относительно высокой, было решено ее уменьшить до 0,4 г/л. Результаты экспериментальных исследований представлены на рисунке 2.

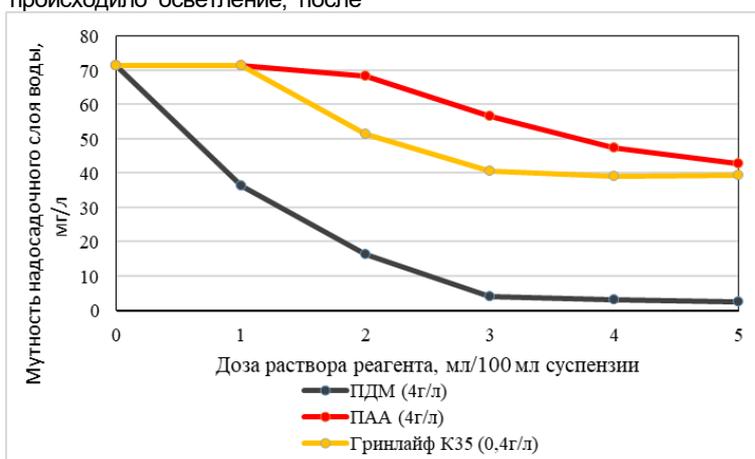


Рисунок 1 – Зависимость мутности надосадочной воды от дозы введенного флокулянта (коагулянта)

Figure 1 – Dependence of turbidity of supernatant water on the dose of introduced flocculant (coagulant)

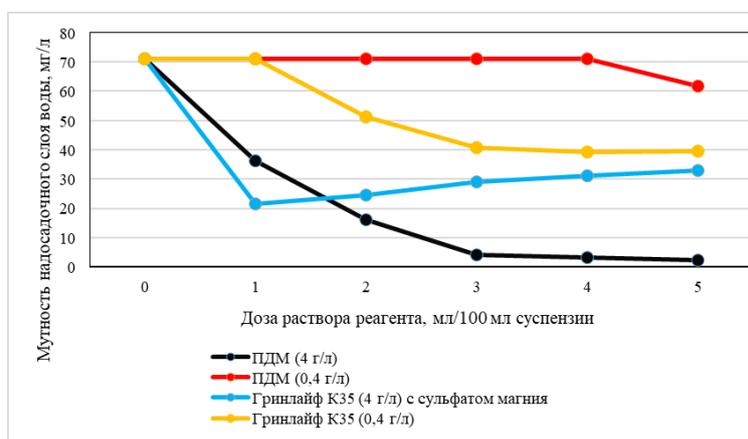


Рисунок 2 – Зависимость мутности надосадочной воды от дозы введенного коагулянта (флокулянта) при сравнении влияния концентрации реагентов

Figure 2 – Dependence of supernatant turbidity on the dose of the introduced coagulant (flocculant) when comparing the effect of reagent concentration

Аналогичные испытания показали, что при разведении рабочего раствора до 0,4 г/л ПолиДАДМАХ уступает по эффективности осветления Гринлайф К35, при введении 3 мл на 100 мл ила мутность надосадочной воды составила 71 мг/л, тогда как для Гринлайф К35 в такой же концентрации – 41 мг/л. Таким образом, Гринлайф К35 в более низкой концентрации проявил себя лучше,

снизил мутность на 42,3 %, тогда как введение ПДМ не изменило исходную мутность надосадочной воды.

В работе также рассматривалась возможность повышения концентрации ГК35 при приемлемых вязкости и текучести. Этому может способствовать присутствие электролитов в воде. Для проверки данного предположения к раствору ГК35

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

в концентрации 4 г/л добавляли небольшими дозами сухой сульфат магния. В количестве 20 г на 1 л раствора ГК35 его вязкость значительно снизилась.

Испытания по флокуляции показали нецелесообразность разжижения флокулянта. Как видно по ходу кривой на рисунке 2, при дозе 1 мл рабочего раствора на 100 мл воды мутность воды составила 22 мг/л, но при повышении дозы флокулянта мутность начала возрастать. Это можно объяснить негативным влиянием минерализации воды на процесс флокуляции: происходит распад коллоидов при росте концентрации электролитов.

Таким образом, при концентрации рабочего раствора 0,4 г/л наилучшим флокулянтом является Гринлайф К 35, при высоких концентрациях лучше всех реагентов осветляет воду ПолиДАД-МАХ.

Для определения экотоксичности придонного ила и используемых в работе флокулянтов было

решено провести биотестирование образцов полученных осадков.

Для проведения эксперимента было взято 100 г почвы, в которую добавлено по 10 и 30 г осадка. В качестве контрольных было использовано три образца:

- первый состоял только из почвенного субстрата,
- во втором к 100 г почвы добавлено 10 г уплотненного необработанного флокулянта ила;
- в третий почвенный субстрат было добавлено 30 г ила, который отстаивался также без использования флокулянтов.

В контейнеры с почвенным субстратом высаживались семена редиса сорта «Жара» по десять штук в каждый контейнер. После двух недель со дня посадки редиса измерялись длины побегов и корней растений [8].

Результаты замеров биометрических показателей представлены на диаграмме (рисунок 3).

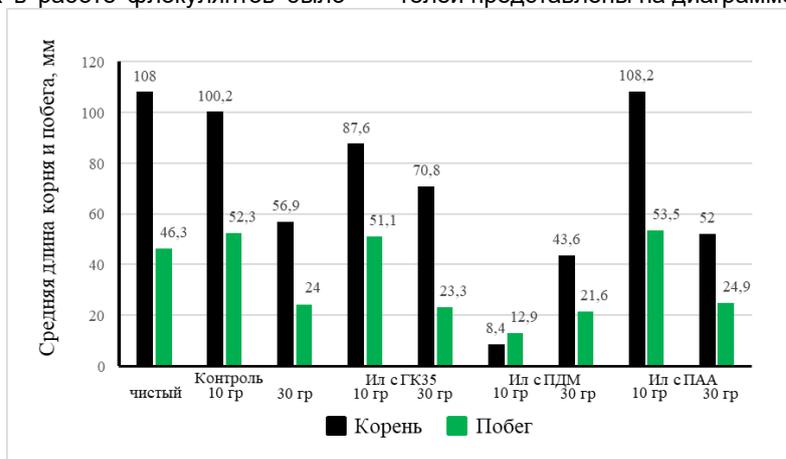


Рисунок 3 – Зависимость биометрических показателей от дозы внесенного осадка (10 и 30 г) и вида флокулянта

Figure 3 – Dependence of biometric indices on the dose of sludge (10 and 30 g) and type of flocculent

Учитывая то, что реагент ПДМ при концентрации рабочего раствора 4 г/л показал максимальную эффективность по осветлению надосадочной воды, но при этом оказался самым экотоксичным, было решено оценить, происходит ли естественная деградация флокулянта при хранении обработанного осадка и как изменится при этом влияние ила на биотестеры.

В работе проводилось дополнительное тестирование выдержанного две недели образца придонного осадка после флокуляции с применением вышеуказанного реагента. Результаты представлены на рисунке 4. Выявлено, что флокулянт ПДМ существенно понижает свою токсичность с течением времени хранения, что можно объяснить химическими или биологическими процессами его деградации.

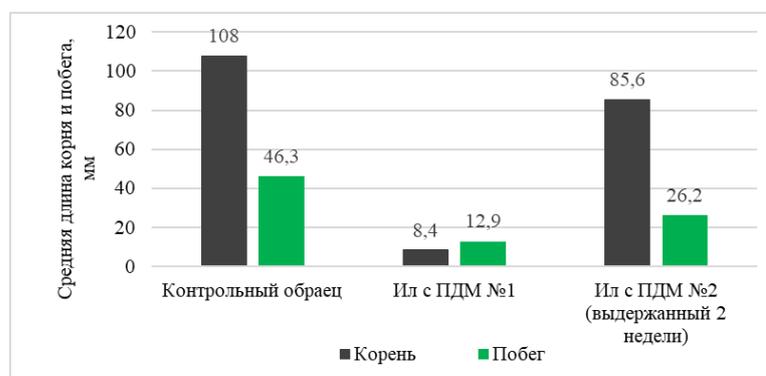


Рисунок 4 – Зависимость размеров корня и побега биотестеров при внесении осадка (10 г), свежееобработанного ПДМ и выдержанного 2 недели после обработки ПДМ

Figure 4 – Dependence of biotester root and shoot size when sludge (10 g) freshly treated with PM and aged 2 weeks after PM treatment was applied

По результатам биотестирования можно сделать выводы:

- наибольшей экотоксичностью обладает ПолиДАДМАХ, наименьшей – полиакриламид;
- ил, не обработанный флокулянтами, угнетает биотестеры, хотя и в меньшей степени, чем обработанный реагентами;
- выдержка обезвоженного ила, обработанного ПДМ, в закрытой таре в течение 2 недель существенно понизила его токсические свойства.

По результатам исследований можно рекомендовать для осветления осадка озера Завьялово два флокулянта:

- Гринлайф К35 целесообразно применять при рабочей концентрации 0,4 г/л, его использование не дает быстрого эффекта осветления воды и уплотнения осадка, потребуется больший промежуток времени для обезвоживания, но способствует ресурсосбережению из-за меньшего расхода флокулянта; Гринлайф К35 характеризуется сравнительно меньшей фитотоксичностью;

- ПолиДАДМАХ показал наилучшую эффективность при концентрации рабочего раствора 4 г/л, что более ресурсоемко, это вещество в большей степени угнетало биотестеры, но установлен эффект деструкции флокулянта, что снижает экотоксичность; при необходимости быстрого осветления целесообразно использовать ПолиДАДМАХ;

- проектные сроки выполнения работ по восстановлению озера Завьялово позволяют применять Гринлайф К35 в концентрации рабочего раствора 0,4 г/л и дозе 0,03 м³ на 1 м³ обводненного ила.

Дальнейшими исследованиями явилась оценка возможности применять извлеченный и обезвоженный озерный ил в качестве удобрения типа «Сапропель».

Согласно требованиям ГОСТ Р 54000-2010, товарные свойства сапропеля определяются содержанием биогенных элементов, а также тяжелых металлов. Данный документ определяет содержание в сапропеле кадмия, цинка, свинца, меди, ртути, марганца, никеля, хрома, кобальта и молибдена. В данной работе оценивалась концентрация кобальта, свинца и кадмия.

Содержание тяжелых металлов в анализируемом образце донных отложений было определено на атомно-абсорбционном спектрометре МГА-915 [9]. При подготовке проб использовался метод мокрой минерализации, основанный на полном разложении органических веществ при нагревании их с концентрированными кислотами [9].

При подготовке пробы бралась навеска ила, высушенного при температуре 105 °С до постоянной массы, в количестве 1 г сухой осадок помещался в колбу Кьельдаля, к нему добавлялось 10 см³ концентрированной азотной кислоты для удаления органических соединений, раствор выдерживался 15 минут, а затем упаривался до объема от 3 до 5 см³. После добавлялся порциями по 1 см³ 30%-ный раствор перекиси водорода, далее раствор вновь упаривался. Полученную вытяжку пропускали через фильтр «синяя лента», фильтрат помещали в мерную колбу и доводили бидистиллированной водой до объема 50 см³.

Пробу объемом 40 мкл с коэффициентом разбавления 1:100 испытывали на содержание массовой концентрации металлов. Был получен усредненный результат, представленный в таблице 1.

Таблица 1 – Содержание тяжелых металлов (мг/кг) в товарном сапропелевом удобрении (ГОСТ Р 54000-2010) и исследуемом осадке

Table 1 – Heavy metal content (mg/kg) in commercial sapropel fertilizer (GOST R 54000-2010) and the studied sludge

Металл	Концентрация в иле	Норма по ГОСТ 54000-2010
Кобальт	8,5	20,0
Свинец	12,5	50
Марганец	128	500

Как видно из таблицы 1, содержание обнаруженных ионов металлов не превышает концентрации, установленные ГОСТ Р 54000-2010 [10]. Сделать окончательный вывод о возможности использования придонного осадка озера Завьялово для повышения продуктивности сельхозугодий будет справедливо только при оценке всех нормируемых показателей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований была доказана необходимость применения флокулянтов для обезвоживания озерного ила. При этом применяемые реагенты являются фитотоксичными, что негативно скажется на растительности рекультивированных территорий, а также в случае возможного использования ила в качестве удобрения снизит его потребительские свойства. При развитии данной тематики исследования целесообразно рассмотреть в качестве возможных флокулянтов вещества природного происхождения: хитозан, желатин, агар-агар, крахмал, дубильные вещества и т.п.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. В Алтайском крае начали восстанавливать озеро Завьялово по нацпроекту «Экология» [Электронный ресурс]: официальный сайт «Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации» URL: https://www.mnr.gov.ru/press/news/v_altayskom_krae_nach_ali_vosstanavlivat_ozero_zavyalovo_po_natsproektu_ekologii/ (дата обращения 27.01.2025).
2. Запольский А.К. Коагулянты и флокулянты в процессах очистки воды: Свойства. Получение. Применение / А.К. Запольский, А.А. Баран. Л. : Химия, 1987. 208 с.
3. Черников Н.А. Применение коагуляции, флокуляции и флотации при очистке воды / А.С. Наврузова, М.В. Попова. БРНИ. 2012. № 4. С. 182–187.
4. Митюков А.С., Румянцев В.А., Крюков Л.Н., Ярошевич Г.С. Сапропель и перспективы его использования в аграрном секторе экономики // Общество. Среда. Развитие (Terra Humana). 2016. № 2 (39). С. 110–114.
5. Методика выполнения измерений мутности питьевых, природных и сточных вод турбидиметрическим методом по каолину и формазину [Электронный ресурс]: оф. сайт «files.stroyinf.ru» URL : <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4293850/4293850853.pdf> (дата обращения 27.01.2025).
6. ГОСТ Р 57164-2016 «Вода питьевая. Методы определения запаха, вкуса и мутности» [Электронный ресурс]: оф. сайт «rosgos.ru» URL: file/gost/13/060/gost_r_57164-2016.pdf (дата обращения 27.01.2025).

ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ПРИМЕНЕНИЮ ФЛОКУЛЯЦИИ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРЕСНОВОДНЫХ ОЗЕР

7. Гринлайф К35 [Электронный ресурс]: оф. сайт «Кондор.рф» URL: <https://www.xn----7sbnojdkjddgsex2t.xn--p1ai/grinlajf-k-35/?ysclid=lvtna2fvkw416915410> (дата обращения 27.01.2025).

8. Скорилова Д.П. Исследования по утилизации осадков при очистке пресноводного озера [Электронный ресурс] / Д.П. Скорилова, А.П. Банникова, О.М. Горелова // Х46 Химия. Экология. Урбанистика : матер. Всерос. науч. практ. конф. (с междунар. участием), в 4 т. Т. 1. Пермь. 2024. С. 111–114. URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=68547432> (дата обращения: 27.01.2025).

9. ГОСТ Р 57162-2016 «Вода. Определение содержания элементов методом атомно-абсорбционной спектроскопии с электрометрической атомизацией» [Электронный ресурс] : официальный сайт «ohranatruda.ru» URL: <upload/iblock/128/4293751162.pdf> (дата обращения 27.01.2025).

10. ГОСТ Р 54000-2010 «Удобрения органические. Сапропели. Общие технические условия» [Электронный ресурс]: официальный сайт «rosgosts.ru» URL: https://rosgosts.ru/file/gost/65/080/gost_r_54000-2010.pdf (дата обращения 27.01.2025).

Информация об авторах

Д. П. Скорилова – студент института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Ю. С. Лазуткина – кандидат технических

наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

О. М. Горелова – кандидат технических наук, доцент Международной кафедры ЮНЕСКО «Инженерная экология» института биотехнологий, пищевой и химической инженерии, ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Information about the authors

D.P. Skorikova - student of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.

Yu.S. Lazutkina - candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the UNESCO International Chair "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering, Polzunov Altai State Technical University.

O.M. Gorelova - Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the UNESCO International Chair "Engineering Ecology" of the Institute of Biotechnology, Food and Chemical Engineering Polzunov Altai State Technical University.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Статья поступила в редакцию 02 мая 2024; одобрена после рецензирования 28 февраля 2025; принята к публикации 05 марта 2025.

The article was received by the editorial board on 02 May 2024; approved after editing on 28 Feb 2025; accepted for publication on 05 Mar 2025.