

ПОТЕНЦИАЛ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ БАКТЕРИЙ ПРИ ДЕФОСФОТАЦИИ КОММУНАЛЬНЫХ СТОКОВ В УСЛОВИЯХ КРАЙНЕГО СЕВЕРА

Фокина Н. В., Горбачева Т. Т.

POTENTIAL OF BACTERIA USE IN MUNICIPAL WASTEWATER DEPHOSPHORIZATION IN THE FAR NORTH

Fokina N. V., Gorbacheva T. T.

Аннотация

Введение. Рассматривается роль бактерий активного ила в процессах денитрификации и дефосфотации сточных вод городских очистных сооружений. Описываются отдельные параметры процесса и их влияние на аккумуляцию фосфора клетками бактерий. Рассматривается необходимость чередования аэробной, анаэробной и анаэробной стадий дефосфотации сточных вод. **Методы.** В работе использованы общепринятые методы микробиологических исследований, заключающиеся в использовании набора селективных питательных сред, световой микроскопии, лабораторных опытов для определения оптимальных условий аккумуляции фосфора аборигенными штаммами бактерий. **Результаты.** Исследована численность и трофическое разнообразие микробиологической составляющей после первичных отстойников водоочистных сооружений г. Апатиты. Показано, что высокой численности достигают не только сапротрофные и фосфатаккумулялирующие бактерии, но и микроскопические грибы и дрожжи. Выделены доминирующие штаммы фосфатаккумулялирующих бактерий. Оценена способность аборигенных микроорганизмов к аккумуляции фосфора. **Заключение.** Показана возможность повышения эффективности процесса биологической дефосфотации сточных вод путем чередования кислородных и бескислородных условий. Составлен консорциум из наиболее эффективных штаммов бактерий, способный снижать содержание фосфора в сточных водах на 17%. **Ключевые слова:** городские очистные сооружения, дефосфотация, активный ил, фосфатаккумулялирующие бактерии, аэробная и анаэробная стадии.

Abstract

Introduction. The paper addresses the role of activated sludge bacteria in the denitrification and dephosphorization of wastewater at municipal wastewater treatment facilities. Various process parameters and their influence on phosphorus accumulation by bacterial cells are described. The authors also consider the necessity of alternating aerobic, anoxic, and anaerobic stages of wastewater dephosphorization. **Methods.** During the study, standard methods of microbiological research were used, which included the use of selective nutrient media, light microscopy, and laboratory experiments to determine optimal conditions for phosphorus accumulation by indigenous bacterial strains. **Results.** The authors investigated the microbiological abundance and trophic diversity of wastewater treated in primary tanks of wastewater treatment facilities in Apatity. The study revealed high abundance of not only saprotrophic and phosphate-accumulating bacteria but microscopic fungi and yeast as well. The dominant strains of phosphate-accumulating bacteria were identified. The ability of indigenous microorganisms to accumulate phosphorus was evaluated. **Conclusion.** The authors show the possibility of increasing the efficiency of the biological dephosphorization of wastewater by alternating oxygen and oxygen-free conditions. A bacteria consortium, capable of reducing the phosphorus content in wastewater by 17%, was developed.

Keywords: municipal wastewater treatment facilities, dephosphorization, activated sludge, phosphate-accumulating bacteria, aerobic and anaerobic stages.

Введение

Основными соединениями, приводящими к эвтрофированию природных водоемов, являются соединения азота и фосфора, содержащиеся как в промышленных, так и в городских сточных водах. Наиболее экономически и экологически приемлемые методы очистки сточных вод от соединений

фосфора — биологические методы, основанные на использовании фосфатаккумулялирующих бактерий (ФАБ), которые способны извлекать фосфор из среды в значительно больших количествах, чем необходимо для их физиологических нужд [7, 21]. Среди ФАБ наиболее подробно описаны бактерии родов *Acinetobacter* (ацинетобактерии могут

использовать большое разнообразие органических субстратов), *Pseudomonas*, *Hydrogenomonas*, *Aeromonas*, *Nitrosomonas*, *Klebsiella*, *Escherichia*, *Rhodococcus*, *Corynebacterium*, *Propionibacterium*, *Rhodopseudomonas*, *Chlorobium*, некоторые дрожжи, мицелиальные грибы и водоросли. Они запасают ортофосфаты (F_n) в форме волютиновых гранул, состоящих преимущественно из высокомолекулярных полифосфатов металлов, и расходуют их в ходе фосфорилирования АМФ и гексоз на биосинтез фосфолипидов и нуклеиновых кислот [1, 13, 17]. Эти микроорганизмы используют дополнительное количество фосфора в аэробных условиях, что позволяет им использовать его в качестве источника энергии и поддерживать свою жизнедеятельность в анаэробных условиях. В связи с этим проводятся исследования по потреблению фосфора в биологических реакторах с чередованием анаэробных и аэробных зон [12, 16].

За счет потребления фосфатов бактерии активного ила в аэробных очистных сооружениях способны удалять около 10–30 % растворенных форм фосфора [2, 5, 22]. Как показывают исследования, растворимость фосфатов зависит от pH среды. При снижении значений pH стоков усиливаются процессы извлечения и накопления фосфора в клетках бактерий, а также его осаждение на поверхности хлопьев в результате биофлокуляции, что позволяет увеличить эффективность удаления соединений фосфора в процессе биологической очистки до 50 % [4, 18].

Многие канализационные очистные сооружения (КОС) северных регионов, в том числе и КОС-3 АО «Апатитыводоканал», функционируют с существенной недогрузкой, что связано с миграционной убылью населения и совершенствованием политики водопотребления. Фактическая производительность КОС-3 составляет 26 400 м³/сут, в то время как проектная производительность — 47 000 м³/сут. В сложившейся ситуации КОС-3 г. Апатиты предполагает реконструировать имеющиеся в их составе четыре секции аэротенка с выделением аноксидной, анаэробной и аэробной зон, устройством рецикла нитрифицированной смеси и реконструкцией системы аэрации [3].

Цель данной работы заключалась в изучении фосфатаккумуляционной способности штаммов бактерий, доминирующих в аэротенках, к дефос-

фотации осветленных сточных вод очистных сооружений АО «Апатитыводоканал».

Методы и материалы

Исследованы пробы циркуляционного ила на входе в аэротенки и иловой смеси на выходе из аэротенков. Точки отбора проб представлены на технологической схеме КОС-3 АО «Апатитыводоканал» (рис. 1).

Микробиологические анализы выполнены путем посева на плотные селективные питательные среды и прямого микроскопирования (микроскоп фирмы ZEISS) с использованием темноокрашенных поликарбонатных фильтров Nucleopor Black с диаметром пор 0,2 мкм. Фильтры для учета бактерий окрашивали акридином оранжевым [6]. Определяли численность сапротрофных бактерий на мясопептонном агаре (МПА); ФАБ на специфической среде следующего состава: глюкоза — 10 г, NaNO_3 — 3 г, K_2HPO_4 — 1 г, KH_2PO_4 — 0,5 г, MgSO_4 — 0,5 г, KCl — 0,5 г, FeSO_4 — 0,001 г, дрожжевой экстракт — 0,5 г, агар-агар — 20 г [8]. Для фосфорных бактерий, способных к экскреции минеральных кислот, растворяющих фосфаты, была использована среда Пиковской, содержащая $\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$. Также была оценена численность микроскопических грибов на сусло-агаре и дрожжей на среде YPG Agar.

Для выявления штаммов бактерий, способных к аккумуляции фосфора, проводили окрашивание фиксированных препаратов активного ила раствором метиленового синего по Леффлеру с последующим микроскопированием. Данный метод позволяет выявить в бактериальных клетках наличие волютиновых гранул [19, 20].

Моделирование процесса фосфатаккумуляции осуществлялось путем периодического культивирования ФАБ в питательной среде следующего состава (на 1 л): пептон из мяса — 0,27 г, KH_2PO_4 — 0,028 г, NaCl — 0,007 г, $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,004 г, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ — 0,002 г, $\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ — 0,1 г, $\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,2 г, $\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ — 0,1 г, $\text{CuCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,02 г, $\text{NaMoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ — 0,0026 г [9].

Культивирование проводили в колбах объемом 250 мл на перемешивающем устройстве ELMi SkyLine Digital Orbital Shaker S-3,02 L при температуре 24 ± 1 °C. Исследовались доминирующие штаммы бактерий, а также консорциум из нескольких штаммов. Была приготовлена

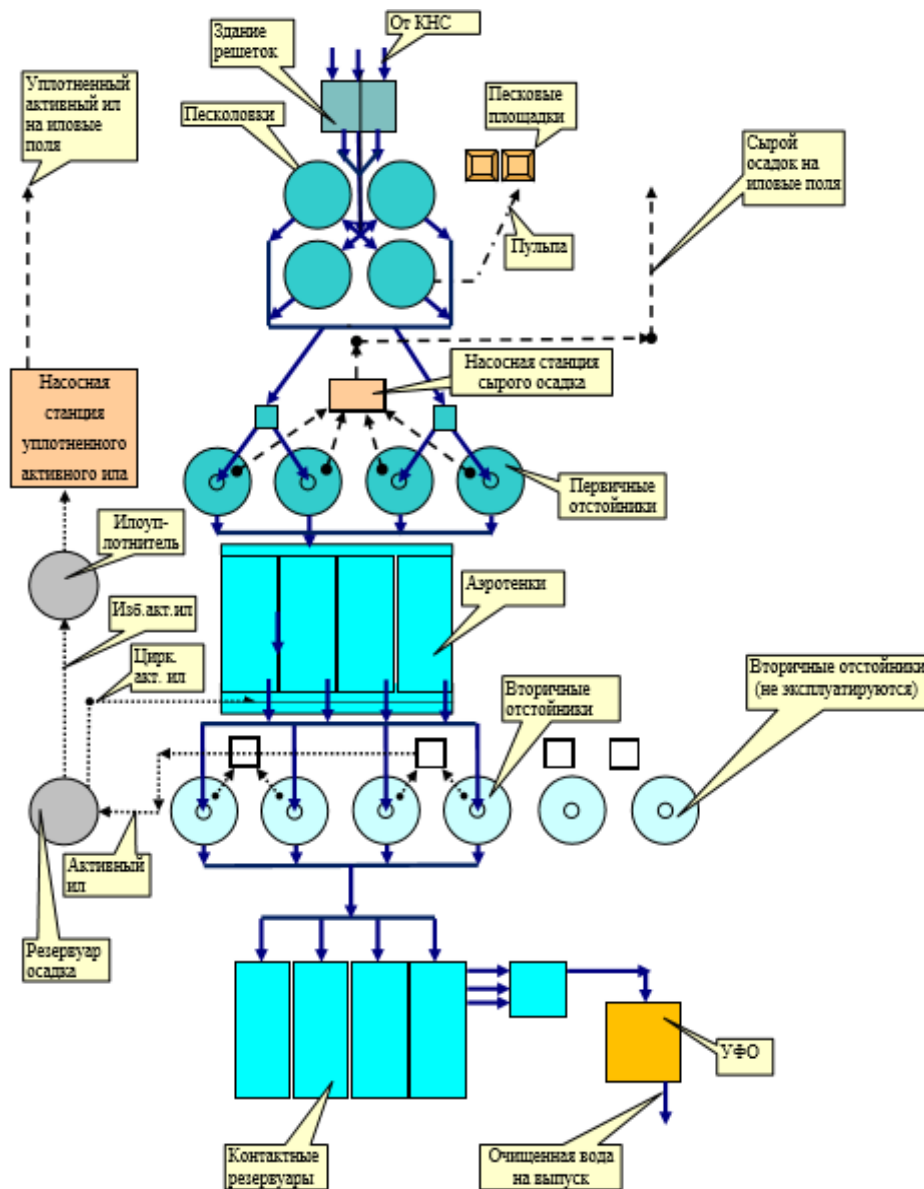


Рис. 1. Точки отбора проб для микробиологических исследований:
1 — иловая смесь на выходе из аэротенков; 2 — циркулирующий ил на входе в аэротенки

бактериальная суспензия с численностью клеток 10^8 кл/мл. После внесения суспензии в колбы со средой численность бактерий составляла 10^7 кл/мл. В ходе эксперимента происходила смена кислородного режима путем прекращения (возобновления) перемешивания каждые 2 часа на протяжении 6 часов [4].

После каждой смены кислородного режима бактериальную массу отделяли от среды путем центрифугирования при 10 000 об/мин в течение 15 мин. Оценку количества извлекаемого фосфо-

ра из питательной среды проводили колориметрическим методом по стандартной методике ПНД Ф 14.1:2.112-97. К 1 см^3 исследуемого раствора добавляли 1 см^3 смешанного реактива (10 см^3 2,5 %-ного раствора молибдата аммония, 10 см^3 10 %-ного раствора аскорбиновой кислоты и 30 см^3 2 н. серной кислоты). Концентрацию фосфора фосфатов определяли по калибровочному графику.

Результаты исследования и обсуждение

Как показали предыдущие исследования основных параметров осветленных стоков КОС-3

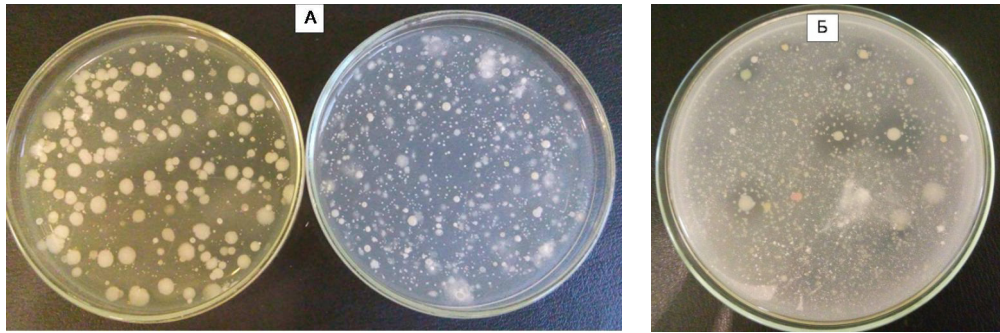


Рис. 2. Численность и разнообразие бактерий в образцах активного ила:
 А — фосфатаккумулялирующие бактерии; Б — фосфорные бактерии

АО «Апатитыводоканал», показатели температуры, pH, БПК₅/Р, ХПК/Р, концентрации легкоокисляемых органических соединений и их соотношение свидетельствуют о потенциальной возможности ретехнологизации этих сооружений в условиях Крайнего Севера с включением стадии глубокого биологического удаления фосфора в существующих объемах сооружений [3].

Результаты микробиологических исследований показали, что в состав микробценоза активного ила входят фосфатаккумулялирующие и фосфорные бактерии (рис. 2). Численность как сапротрофной, так и фосфатаккумулялирующей и фосфорной группы бактерий циркуляционного ила и иловой смеси находилась в пределах 72—207 тыс. кл/мл (рис. 3, А). Численность бактерий была достоверно выше в иловой смеси (при $\alpha = 0,01$). Также следует отметить высокое содержание микроскопических грибов в обеих фракциях активного ила. Численность микромицетов колебалась в пределах от 2,7 до 3,6 тыс. КОЕ/мл, что в разы превышает их численность в природных водоемах Кольского п-ва (рис. 3, Б) [14].

Доминировали микромицеты родов *Penicillium* и *Trichoderma*. Численность дрожжей достигала 20 тыс. КОЕ/мл в иловой смеси и снижалась до 3 тыс. КОЕ/мл в циркуляционном иле.

Метод флуоресцентной микроскопии позволяет учитывать как живые, так и нежизнеспособные бактерии, по некоторым данным составляющие от 7 до 12 % от общего числа клеток [10, 15]. Полученные при исследовании данные свидетельствуют о незначительном превышении общей численности и биомассы бактериальной составляющей в иловой смеси по сравнению с циркулирующим илом (табл. 1).

Были описаны и выделены в чистую культуру 6 штаммов доминирующих бактерий, в основном относящиеся к родам *Acinetobacter* и *Pseudomonas* spp., способным к накоплению полифосфатов в форме волютиновых гранул (рис. 4).

Полученные в процессе экспериментальных исследований результаты соответствуют литературным данным о зависимости концентрации фосфат-ионов от аэрирования в процессе биоло-

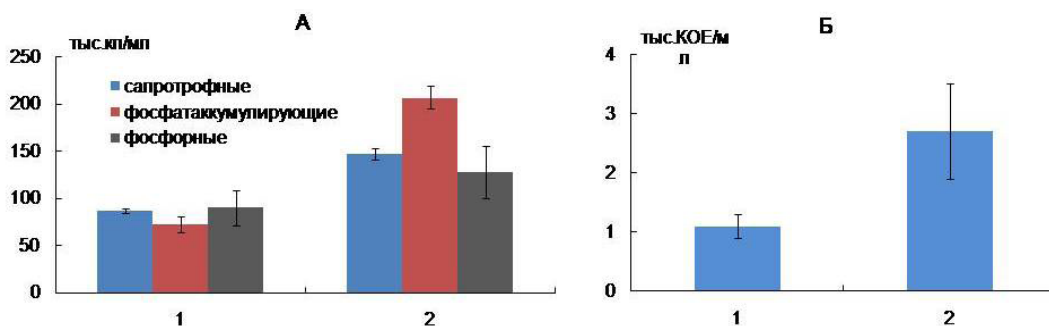


Рис. 3. Численность бактерий (А), тыс. кл./мл и микроскопических грибов (Б), тыс. КОЕ/мл в образцах активного ила: 1 — иловая смесь на выходе из аэротенков; 2 — циркулирующий ил на входе в аэротенки

Таблица 1
Общая численность бактерий (10^6 кл/г)
и бактериальная биомасса (мг/мл)
в образцах активного ила

Образец	Численность	Биомасса
Циркулирующий ил	0,23	0,0092
Иловая смесь	0,28	0,0112

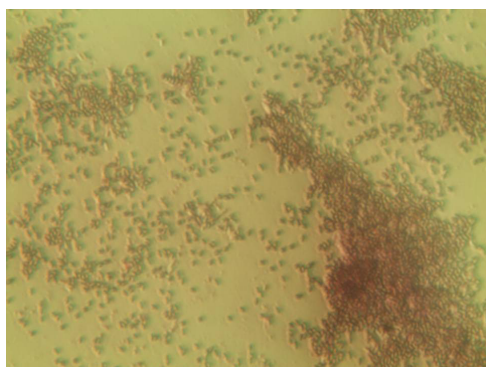


Рис. 4. Фотография бактериальных клеток с окрашенными полифосфатными гранулами, увеличение $\times 1000$

гической очистки сточных вод [11, 20]. Процент извлечения фосфатов из среды для разных штаммов колебался от 3 до 6,7 % за 2 часа культивирования на качалке (табл. 2).

После изучения фосфатаккумулирующей способности доминирующих бактерий был составлен консорциум из наиболее активных штаммов, который продемонстрировал более значимые результаты извлечения фосфора. Так, если после первой стадии аэрации содержание фосфора фосфатного в среде снизилось на 9,9 %, то после второй стадии аэрации наблюдалось снижение на 17,2 % (рис. 5).

Средняя эффективность удаления фосфора фосфатного в процессе периодического культивирования доминирующими штаммами бактерий при периодической аэрации составила 5 %. При исследовании фосфатаккумулирующей способности консорциума доминирующих бактериальных штаммов удалось снизить содержание фосфат-ионов в среде на 17,2 %.

Заключение

Проведенное исследование позволяет говорить о наличии в составе активного ила как фосфатаккумулирующей, так и фосфорной группы бактерий. Их численность составляет порядка

Таблица 2
Извлечение фосфат-ионов (%) из среды
в условиях аэрации

Номер штамма	Извлечение фосфатов, %
1	3
2	5,7
4	6,7
5	3,7
6	4,6

10^5 кл/мл. Доминирующие штаммы ФАБ, относящиеся к родам *Acinetobacter* и *Pseudomonas* spp., способны снижать содержание фосфора в среде на 6,7 %. Чередование кислородных и бескислородных условий ведет к повышению эффективности процесса биологической дефосфотации сточных вод.

Используя консорциум наиболее эффективных аборигенных микроорганизмов, можно снизить содержание соединений фосфора в воде на 17 %. В связи с предполагаемой реконструкцией системы аэрации аэротенков КОС-3 г. Апатиты и выделением аноксидной, анаэробной и аэробной зон появляется возможность усовершенствовать технологию биологической очистки сточных вод с учетом других технологических параметров процесса.

Финансирование

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Министерства образования и науки Мурманской области в рамках научного проекта 17-45-510205 «Дефосфотация коммунальных стоков в условиях снижения водопотребления». Микробиологические исследования

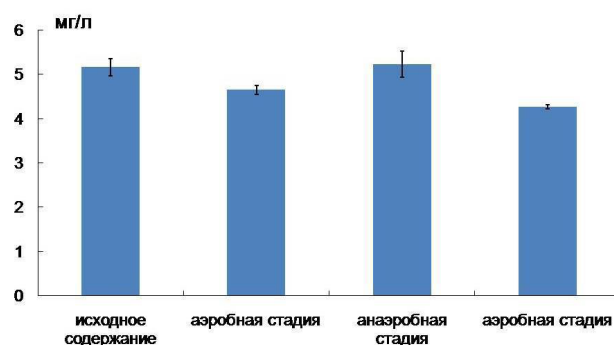


Рис. 5. Извлечение фосфат-ионов (мг/л) из среды консорциумом бактерий

выполнялись в рамках темы НИР по госзаданию АААА-А18-118021490070-5.

Литература

1. Асонов, Н. Р. (1997). Микробиология. 3-е изд. М.: Колос, 352 с.
2. Вильсон, Е. В. и Мельник, Е. А. (2012). Оптимальные условия реагентной дефосфотизации в присутствии активного ила. *Вода: химия и экология*, № 5 (47), сс. 33–39.
3. Горбачева, Т. Т., Евшин, П. Н., Горбачев, А. А. и Артемкина, Н. А. (2019). К вопросу о применимости биологических методов дефосфотации коммунальных стоков на Крайнем Севере. *Вода и экология: проблемы и решения*, № 2 (78), сс. 9–16. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.9-16.
4. Дубовик, О. С. и Маркевич, Р. М. (2016). Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод. *Труды БГТУ*, № 4 (186), сс. 232–238.
5. Жмур, Н. С. (2003). Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М.: АКВАРОС, 512 с.
6. Звягинцев, Д. Г. (1991). Методы почвенной микробиологии и биохимии. 2-е изд. М.: Изд-во МГУ, 304 с.
7. Михайлова, Ю. В. (2017). Разработка технологии улучшения качества очистки сточных вод с использованием биоаугментации. Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. Москва: Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет.
8. Мотавкина, Н. С. и Пянова, Р. Е. (1973). Микробиологическая диагностика некоторых капельных инфекций и токсоплазмоза: методическая разработка для студентов. Владивосток: Изд-во ВГМУ, 80 с.
9. Мудрецова-Висс, К. А. (1997). Микробиология, санитария и гигиена. Владивосток: Изд-во ДВГАЭУ, 312 с.
10. Паринкина, О. М. (1989). Микрофлора тундровых почв. Л.: Наука, 159 с.
11. Пахомов, А. Н., Стрельцов, С. А., Козлов, М. Н., Харькина, О. В., Хамидов, М. Г., Ершов, Б. А. и Белов, Н. А. (2010). Опыт эксплуатации сооружений биологической очистки сточных вод от соединений азота и фосфора. *Водоснабжение и санитарная техника*, № 10, ч. 1, сс. 35–41.
12. Хабибуллина, А. Р., Вдовина, Т. В., Кобелева, Й. В. и Сироткин, А. С. (2017). Исследование процесса биологической дефосфотации модельных сред с использованием фосфатаккумулялирующих бактерий. *Вестн. технол. ун-та*, Т. 20, № 19, сс. 131–133.
13. Чеботарь, И. В., Лазарева, А. В., Масалов, Я. К., Михайлович, В. М. и Маянский, Н. А. (2014). *Acinetobacter*: микробиологические, патогенетические и резистентные свойства. *Вестн. РАМН*, Т. 69, № 9–10, сс. 39–50.
14. Bubnova, E. N. and Nikitin, D. A. (2017). Fungi in bottom sediments of the Barents and Kara seas. *Russian Journal of Marine Biology*, Vol. 43, Issue 5, pp. 400–406. DOI: 10.1134/S1063074017050029.
15. Bunnell, F. L., Miller, D. K., Flanagan, P. W. and Benoit, R. E. (1980). The microflora: composition, biomass, and environmental relations. In: Brown, J., Miller, P. C., Tieszen, L. L. and Bunnell, F. L. (eds.) *An arctic ecosystem: the coastal tundra of northern Alaska*. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson, and Ross Inc., pp. 255–290.

16. Ginige, M. P., Lashkajani, S. S. and Cheng, K. Y. (2013). Biological recovery of phosphorus from municipal wastewater. *Microbiology Australia*, Vol. 34, No. 4, pp. 194–196. DOI: 10.1071/MA13068.

17. Günther, S., Trutnau, M., Kleinstaub, S., Hause, G., Bley, T., Röske, I., Harms, H. and Müller, S. (2009). Dynamics of polyphosphate-accumulating bacteria in wastewater treatment plant microbial communities detected via DAPI (4',6'-diamidino-2-phenylindole) and tetracycline labeling. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 75, Issue 7, pp. 2111–2121. DOI: 10.1128/AEM.01540-08.

18. Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J. and Arvin, E. (1997). *Wastewater treatment: biological and chemical processes*. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 383 p.

19. Kallistova, A. Yu., Pimenov, N. V., Kozlov, M. N., Nikolaev, Yu. A., Dorofeev, A. G., Aseeva, V. G., Grachev, V. A., Men'ko, E. V., Berestovskaya, Yu. Yu., Nozhevnikova, A. N. and Kevbrina, M. V. (2014). Microbial composition of the activated sludge of Moscow wastewater treatment plants. *Microbiology*, Vol. 83, Issue 5, pp. 699–708. DOI: 10.1134/S0026261714050154.

20. Lemzikova, I. P. and Markevich, R. M. (2013). Consumption of phosphates from medium by activated sludge bacteria under various conditions of aeration. *Proceedings of BSTU. Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, No. 4, pp. 200–202.

21. Richardsen, K. L. (2017). Enhanced biological phosphorus removal in typical Norwegian wastewater. MSc Thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

22. Wisconsin Department of Natural Resources (2009). *Advanced phosphorus removal study guide*. Madison: Wisconsin Department of Natural Resources, 23 p.

References

1. Asonov, N. R. (1997). *Microbiology*. 3rd edition. Moscow: Kolos, 352 p.
2. Wilson, E. V. and Melnik, E. A. (2012). Reagent dephosphatization in presence of activated sludge. *Water: Chemistry and Ecology*, No. 5 (47), pp. 33–39.
3. Gorbacheva, T. T., Evshin, P. N., Gorbachev, A. A. and Artemkina, N. A. (2019). Revisiting applicability of biological methods for dephosphotation of municipal wastewater in Far North. *Water and Ecology*, No. 2 (78), pp. 9–16. DOI: 10.23968/2305-3488.2019.24.2.9-16.
4. Dubovik, O. S. and Markevich, R. M. (2016). Biotechnological advancement of nitrogen and phosphorus removal from city sewage. *Proceedings of BSTU*, No. 4 (186), pp. 232–238.
5. Jmour, N. S. (2003). *Technological and biochemical processes of waste water treatment on treatment plants with aerotanks*. Moscow: AKVAROS, 512 p.
6. Zvyagintsev, D. G. (1991). *Methods of soil microbiology and biochemistry*. 2nd edition. Moscow: Publishing House of Moscow State University, 304 p.
7. Mikhailova, Yu. V. (2017). *Development of a technology to improve the quality of wastewater treatment using bioaugmentation*. PhD Thesis in Engineering. Moscow: National Research Moscow State University of Civil Engineering.
8. Motavkina, N. S. and Pianova, R. Ye. (1973). *Microbiological diagnostics of some airborne infections and*

toxoplasmosis. Guidelines for students. Vladivostok: Publishing House of Vladivostok State Medical University, 80 p.

9. Mudretsova-Wiss, K. A. (1997). Microbiology, sanitation, and hygiene. Vladivostok: Publishing House of Far Eastern State Academy of Economics and Management, 312 p.

10. Parinkina, O. M. (1989). Microflora of tundra soils. Leningrad: Nauka, 159 p.

11. Pakhomov, A. N., Streltsov, S. A., Kozlov, M. N., Kharkina, O. V., Khamidov, M. G., Ershov, B. A. and Belov, N. A. (2010). Experience of operation of facilities of wastewater biological treatment for nitrogen and phosphorus compounds. *Water Supply and Sanitary Technique*, No. 10, Part 1, pp. 35–41.

12. Khabibullina, A. R., Vdovina, T. V., Kobeleva, Y. V. and Sirotkin, A. S. (2017). Investigation of the process of biological dephosphatation of model media using phosphate-accumulating bacteria. *Herald of Technological University*, Vol. 20, No. 19, pp. 131–133.

13. Chebotar, I. V., Lazareva, A. V., Masalov, Ya. K., Mikhailovich, V. M. and Mayanskiy, N. A. (2014). Acinetobacter: microbiological, pathogenetic and resistant properties. *Annals of the Russian Academy of Medical Sciences*, Vol. 69, No. 9–10, pp. 39–50.

14. Bubnova, E. N. and Nikitin, D. A. (2017). Fungi in bottom sediments of the Barents and Kara seas. *Russian Journal of Marine Biology*, Vol. 43, Issue 5, pp. 400–406. DOI: 10.1134/S1063074017050029.

15. Bunnell, F. L., Miller, D. K., Flanagan, P. W. and Benoit, R. E. (1980). The microflora: composition, biomass, and environmental relations. In: Brown, J., Miller, P. C., Tieszen, L. L. and Bunnell, F. L. (eds.) An arctic ecosystem: the coastal tundra of northern Alaska. Stroudsburg: Dowden, Hutchinson, and Ross Inc., pp. 255–290.

16. Ginige, M. P., Lashkajani, S. S. and Cheng, K. Y. (2013). Biological recovery of phosphorus from municipal wastewater. *Microbiology Australia*, Vol. 34, No. 4, pp. 194–196. DOI: 10.1071/MA13068.

17. Günther, S., Trutnau, M., Kleinstauber, S., Hause, G., Bley, T., Röske, I., Harms, H. and Müller, S. (2009). Dynamics of polyphosphate-accumulating bacteria in wastewater treatment plant microbial communities detected via DAPI (4',6'-diamidino-2-phenylindole) and tetracycline labeling. *Applied and Environmental Microbiology*, Vol. 75, Issue 7, pp. 2111–2121. DOI: 10.1128/AEM.01540-08.

18. Henze, M., Harremoës, P., La Cour Jansen, J. and Arvin, E. (1997). Wastewater treatment: biological and chemical processes. 2nd edition. Berlin: Springer-Verlag, 383 p.

19. Kallistova, A. Yu., Pimenov, N. V., Kozlov, M. N., Nikolaev, Yu. A., Dorofeev, A. G., Aseeva, V. G., Grachev, V. A.,

Men'ko, E. V., Berestovskaya, Yu. Yu., Nozhevnikova, A. N. and Kevbrina, M. V. (2014). Microbial composition of the activated sludge of Moscow wastewater treatment plants. *Microbiology*, Vol. 83, Issue 5, pp. 699–708. DOI: 10.1134/S0026261714050154.

20. Lemzikova, I. P. and Markevich, R. M. (2013). Consumption of phosphates from medium by activated sludge bacteria under various conditions of aeration. Proceedings of BSTU. *Chemistry, Organic Substances Technology and Biotechnology*, No. 4, pp. 200–202.

21. Richardsen, K. L. (2017). Enhanced biological phosphorus removal in typical Norwegian wastewater. MSc Thesis. Trondheim: Norwegian University of Science and Technology.

22. Wisconsin Department of Natural Resources (2009). Advanced phosphorus removal study guide. Madison: Wisconsin Department of Natural Resources, 23 p.

Авторы

Фокина Надежда Викторовна, канд. техн. наук

Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Мурманская область, Россия

E-mail: NadezdaVF@yandex.ru

Горбачева Тамара Тимофеевна, канд. биол. наук

Институт проблем промышленной экологии Севера – обособленное подразделение Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Мурманская область, Россия

E-mail: t.gorbacheva@ksc.ru

Authors

Fokina Nadezhda Victorovna, PhD in Technology

Institute of North Industrial Ecology Problems Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia

E-mail: NadezdaVF@yandex.ru

Gorbacheva Tamara Timofeevna, PhD in Biology

Institute of North Industrial Ecology Problems Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Murmansk region, Russia

E-mail: t.gorbacheva@ksc.ru