

УДК 628.356:[504.61:62](985)

В. В. Ильинский, Е. В. Крамаренко, Е. В. Макаревич

Оценка функциональной активности активного ила локально-очистного сооружения, действующего в условиях Арктического региона

Работа посвящена изучению свойств активного ила локального очистного сооружения (ЛОС), его способности максимально полно очищать бытовые сточные воды в условиях Крайнего Севера. Процесс биохимического разрушения органических загрязнений происходит под воздействием комплекса микроорганизмов, функционирующих в аэротенках. Учитывая климатические условия региона, при которых процессы разложения органических веществ замедлены, а также отсутствие контроля над эксплуатацией, эффективностью и безопасностью работы ЛОСов, представляется важным изучение физиологических особенностей бактерий, используемых при биологической очистке, их способностей максимально полно очищать бытовые сточные воды в условиях Арктического региона. Чрезмерное вмешательство в биосферные системы приводит к нарушению сбалансированности внутренних и внешних связей объектов экосистем. Целью исследования являлось изучение структуры и функционирования бактериоценоза активного ила ЛОС ТОПАС-5 от ГК "ТОПОЛ-ЭКО" в определенных физико-химических условиях среды обитания, а также установление полноты процесса очистки бытовой сточной воды на данном очистном сооружении. В работе изучены структура (количественный и качественный состав) и функционирование бактериоценоза активного ила ЛОС, действующего в условиях Арктического региона. Дана оценка полноты процесса очистки активным илом бытовой сточной воды на данном очистном сооружении. Результаты исследований позволили выявить и определить численность основных физиологических групп бактерий, принимающих участие в очистке бытовых сточных вод; выделить на экспериментальных средах культуры биофлокулянт-продуцирующих бактерий активного ила; оценить эффективность работы ЛОС в условиях Арктического региона.

Ключевые слова: Арктический регион, очистные сооружения, сточные воды, активный ил, бактериоценоз, гидрохимия, аммонификаторы, нитрификаторы, биофлокулянты.

Введение

Повсеместное внедрение индивидуальных очистных установок, обеспечивающих очистку бытовых сточных вод, частично решает проблемы канализационных стоков, идущих от отдельно стоящих домов или частных жилых секторов. В зависимости от локализации и условий выпуска очищенных бытовых стоков вода, содержащая на выходе высокие концентрации биогенов, вследствие неэффективной очистки, с одной стороны, может служить дополнительным источником питательных веществ для почвы, с другой – проблемой эвтрофирования природных водоемов.

Немаловажной проблемой в очистке сточных вод является также нарушение процесса отстаивания очищенной воды для отделения активного ила. Известным считается факт, что бактерии, скапливаясь в колонии посредством выделяемых внеклеточных веществ (биофлокулянтов), образуют крупнодисперсные частицы (хлопья, флокулы), которые впоследствии сравнительно легко могут оседать в водной среде в результате гравитации [1]. Данное свойство бактерий позволяет отделять активный ил от очищенной воды после завершения процессов изъятия содержащихся в ней загрязняющих веществ. Таким образом, бактерии активного ила способны не только на биохимические превращения органических, некоторых неорганических и минеральных веществ, очищая сточные воды, но и обладают ярко выраженными седиментационными свойствами, ускоряя процесс очистки.

В нашей работе пристальное внимание уделяется именно биофлокулянт-продуцирующим бактериям активного ила, поскольку они способны вести себя в качестве некой связывающей площадки в процессе очистки воды. И если по каким-либо причинам активный ил становится менее агрегированным, возникает проблема полноты его осаждения, выноса с очищенной водой, ухудшение качества воды. Поскольку активный ил не должен служить дополнительным источником загрязнения, необходимо весьма серьезно подходить к решению вопроса отделения активного ила от очищенной воды.

Целью нашего исследования является изучение структуры и функционирования бактериоценоза активного ила ЛОС ТОПАС-5 от ГК "ТОПОЛ-ЭКО" в определенных физико-химических условиях среды обитания, а также установление полноты процесса очистки бытовой сточной воды на данном очистном сооружении.

Материалы и методы

Локально-очистные сооружения представляют собой станции индивидуальной очистки сточных вод, как правило, бытового характера, в основе которой лежит биологический метод очистки. Примером такого рода очистного сооружения может служить ЛОС ТОПАС-5, схема работы которого представлена на рис. 1. Бытовые стоки поступают в камеру первичного отстаивания (отсек А) и, очищаясь от крупногабаритных загрязняющих веществ, переходят в аэротенк (Б) для процессов биохимического окисления с помощью микроорганизмов активного ила. Далее иловая смесь следует во вторичный отстойник (В), разделяется на активный ил и очищенную воду, которая направляется к выходу из очистной станции. Активный ил после оседания переходит вновь в аэротенк через камеру стабилизатора (Г).



Рис. 1. Индивидуальное локально-очистное сооружение ТОПАС-5
Fig. 1. Individual local waste water treatment plant TOPAS-5

Уникальность биохимического метода очистки заключается в обработке сточных вод живыми микроорганизмами, участвующими в деструкции и трансформации загрязняющих веществ органической и минеральной природы. Широкое распространение среди биологических методов очистки получил "метод активного ила".

Активный ил представляет собой искусственно выращиваемый биоценоз организмов, развивающихся в аэробных условиях на органических веществах антропогенно загрязненных вод, населенный гелепродуцирующими бактериями гетеротрофами, простейшими и многоклеточными животными, которые, трансформируя загрязняющие вещества, очищают сточную воду [2]. Преимущественная роль бактерий в процессах биоразложения обусловлена такими свойствами, как быстрое размножение (в среднем удваивание клеток микроорганизмов происходит каждые 30 секунд [1]), употребление в пищу разнообразных органических и минеральных веществ, быстрая адаптированность к условиям среды обитания.

В рамках вышесказанного был проведен анализ бытовой сточной воды до и после очистки, а также бактериоценоза активного ила ЛОС ТОПАС-5, работающей в условиях Арктического региона. Данная область характеризуется низкой температурой окружающей среды, многолетней мерзлотой, пониженной скоростью распада загрязняющих веществ и большим разнообразием постоянно меняющихся условий. Все это прямо или косвенно отражается и на микромире природных и искусственных экосистем.

Характер поступающих на очистное сооружение стоков – хозяйственно-бытовой. Очистной станцией предусмотрена механическая и биологическая очистка сточных вод с помощью аэротенка. Поскольку была необходимость в изучении условий обитания бактерий активного ила ЛОС, в сточных водах оценивали физико-химические показатели, а именно: температуру воды и воздуха, pH, прозрачность, содержание биогенных формы азота (аммоний, нитриты, нитраты), фосфора (фосфаты) и биологическое потребление

кислорода (БПК). Для оценки эффективности очистки сточной воды параллельно проводили физико-химический анализ вышеуказанных параметров очищенной сточной воды. Измерения осуществляли по стандартным методикам нормативных документов и рекомендациям [3].

Количественный и качественный состав бактериоценоза активного ила, участвующего в трансформации органических веществ и биогенных форм азота (аммонификаторы, автотрофные I–II фазы и гетеротрофные нитрификаторы), определяли стандартными методами посева в жидкие и плотные питательные среды [4; 5]. Первичная идентификация бактерий осуществлялась посредством биохимических анализов, а флокулирующая способность выделенной культуры – при помощи модифицированного метода Курана с использованием суспензии каолиновой глины. Также был проведен санитарно-гигиенический анализ сточной воды до и после очистки по общепринятым методикам¹. Все микробиологические анализы проводили с учетом условий функционирования бактерий и выделения групп бактерий, способных культивироваться на питательных средах в условиях лаборатории.

Для интерпретации полученных результатов использовали стандартные методы представления результатов исследований.

Результаты и обсуждение

Бытовые сточные воды в большей части содержат углеводы, азотсодержащие соединения (белки, аминокислоты), жиры, детергенты и небольшое количество других веществ (полимерные и полициклические соединения). Из неорганических соединений наиболее значимыми являются нитриты, нитраты, фосфаты и соединения аммония [1]. Физико-химические условия среды обитания бактериоценоза активного ила определяют характер протекающих в аэротенке биохимических процессов. Результаты оценки гидрохимических параметров сточной воды ЛОС ТОПАС-5 приведены в табл. 1.

Таблица 1. Физико-химические показатели сточной воды до и после очистки активным илом ЛОС ТОПАС-5
Table 1. Physicochemical characteristics of waste water and stabilized sewage by activated sludge in LWTP TOPAS-5

Сточная вода	$T, ^\circ\text{C}$	pH	Прозрачность, см	БПК ₅ , мг/л	Аммоний, мг/л	Нитриты, мг/л	Нитраты, мг/л	Фосфаты, мг/л
До очистки	$+15 \pm 2$	$7,0 \pm 0,2$	4	$65,4 \pm 2,2$	$67 \pm 3,1$	$0,44 \pm 0,1$	$3,02 \pm 0,5$	$40 \pm 5,6$
После очистки	+10	$7,0 \pm 0,1$	6	$19,6 \pm 3,5$	$56 \pm 3,4$	$0,3 \pm 0,1$	$5,78 \pm 1,2$	$96 \pm 4,1$

Водородный показатель сточных вод до и после очистки остался практически на одном уровне и составил 7,0.

Температура воды в аэротенке составила 10 °С, что ниже оптимальной на (6–13) °С. Такое понижение температуры приводит к замедлению процессов биологической очистки, вследствие снижения интенсивности обмена веществ бактерий активного ила, и уменьшению эффективности процесса механического отстаивания. Однако было отмечено, что активный ил исследуемого объекта при снижении температуры на (5 ± 2) °С в целом сохранял достаточную трансформирующую способность.

Бытовые сточные воды, поступающие на очистку, по величине БПК₅ (65,4 мг/л) можно оценить как высокоразбавленные, а нагрузку на активный ил – как низкую. Однако низкая нагрузка еще не означает, что все поступившие в сооружение загрязняющие вещества будут изъяты активным илом. При полной биологической очистке сточных вод, после отделения от очищенной воды активного ила, количество загрязняющих веществ в воде составляет 12–20 мг/л по БПК_{полн.} [1]. В данном случае снижение БПК₅ в очищенной воде в 3 раза, по сравнению с неочищенной, свидетельствует об эффективной очистке сточной воды в результате протекающих окислительных процессов, а значение 19,6 мг/л по БПК₅ очищенной сточной воды позволяет говорить о идущих процессах полной биологической очистки бытовых стоков.

Биодеградация органических веществ сопровождается изменением концентрации минеральных форм азота (аммония, нитритов, нитратов) и фосфора. Высокое содержание солей аммония в сточной воде до очистки (67 мг/л) и после (56 мг/л), а также незначительное их снижение (17 %) может свидетельствовать как об интенсивно протекающих в момент исследования процессах аммонификации, так и о гетеротрофной денитрификации.

¹ МУК 4.2.1884–04. Санитарно-микробиологический и санитарно-паразитологический анализ воды поверхностных водных объектов. М., 2004. 43 с. ; МУ 2.1.5.800–99. Организация госсанэпиднадзора за обеззараживанием сточных вод. М., 2000. 12 с.

Повышение уровня нитратов на 91 % после очистки говорит об активно протекающих окислительных реакциях и высокой степени очистки стоков с нитрификацией аммонийного азота несмотря на сохраняющиеся высокие значения NH_4^+ [3].

В процессе биотрансформации загрязняющих веществ наблюдалось увеличение концентрации ортофосфатов в 2,5 раза. Отмеченный уровень фосфатов после очистки (96 мг/л), в сотни раз превышающий ПДК для водоемов любого типа, может указывать на недостаточное развитие бактерий активного ила, способных депонировать растворенные соединения фосфора (в частности, нитрификаторов). Замедление прироста микробной биомассы обуславливается смещением оптимального соотношения С : Р за счет низкой нагрузки на бактериоценоз очистных сооружений [3].

Исследования структуры бактериологического сообщества активного ила (табл. 2) показали наличие аммонифицирующих бактерий в количестве 10^6 КОЕ/мл. Следует также отметить, что численность аммонификаторов белков на 5 порядков превосходила группу аммонификаторов мочевины. Интенсивное развитие микроорганизмов данной физиологической группы закономерно приводит к снижению БПК₅ в очищенной воде.

Таблица 2. Бактерии цикла превращения азота
Table 2. Nitrogen-assimilating bacteria

Физиологическая группа	Численность, КОЕ/мл
Аммонификаторы белков, КОЕ/мл	$1 \cdot 10^6$
Аммонификаторы мочевины, КОЕ/мл	$1 \cdot 10^1$
Автотрофные нитрификаторы, КОЕ/мл	$1 \cdot 10^1$
Гетеротрофные нитрификаторы, КОЕ/мл	$3 \cdot 10^7$

Гетеротрофные нитрифицирующие бактерии присутствовали в активном иле в целом на довольно высоком уровне – $3 \cdot 10^7$ КОЕ/мл (табл. 2 и рис. 2).



Рис. 2. Рост гетеротрофных нитрификаторов на плотной питательной среде
Fig. 2. Growth of heterotrophic nitrate bacteria on the solid medium

Незначительное количество автотрофных нитрификаторов при этом может объясняться достаточной концентрацией органического азота для развития гетеротрофов – основных представителей активного ила.

К важным показателям полноты очистки сточных вод относится их прозрачность, напрямую зависящая как от степени окисления загрязняющих веществ, так и от наличия в ней мелких, не оседающих хлопьев активного ила и одиночных бактерий. По окончании биологической очистки прозрачность очищенной воды должна составлять не менее 12 см [2; 3].

Показатель прозрачности исследуемой воды после очистки составил 6 см, что соответствует нормативам мутности сточных вод, поступающих на очистные сооружения. Пробы очищенной воды характеризовались большим количеством мелкодисперсных взвешенных веществ, не оседающих за два часа мелких хлопьев активного ила и свободноплавающих бактерий, не связанных хлопьями (рис. 3).

Причинами снижения прозрачности воды за счет выноса взвешенных веществ и измельчения хлопьев активного ила могут служить нарушения его флокуляционных и седиментационных свойств, вызванные голоданием и лизисом клеток.

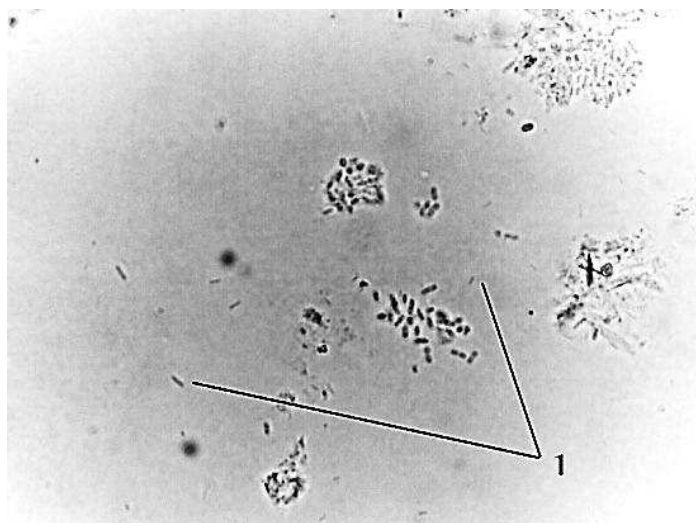


Рис. 3. Очищенная вода под микроскопом (ув. 1000×)
1 – одиночные свободноплавающие бактериальные клетки
Fig. 3. Stabilized sewage under the microscope (z. 1000×)
1 – single free-swimming bacterial cells

В ходе анализа активного ила была определена доза осажденного ила по объему в определенные временные отрезки. На основании полученных данных построена кривая, отражающая динамику оседания активного ила (рис. 4).

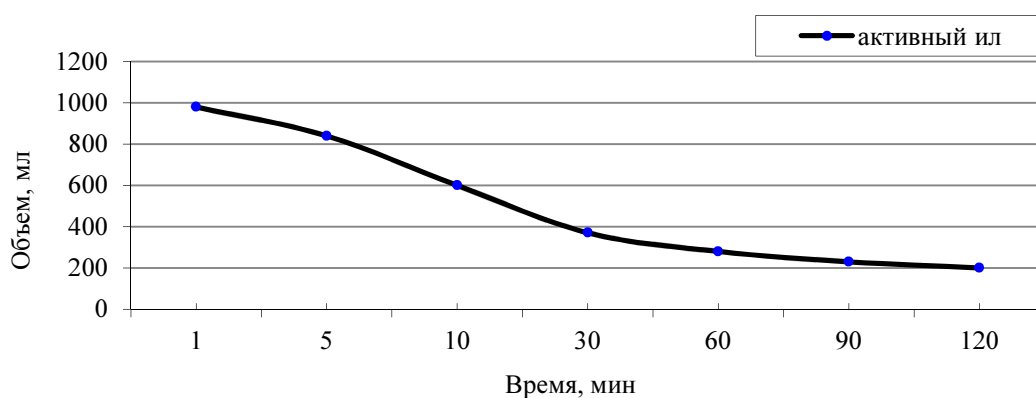


Рис. 4. Динамика оседания активного ила
Fig. 4. Dynamics of activated sludge settleability

В начале измерения наблюдалось быстрое оседание лишь крупных взвешенных частиц и хлопьев самого ила. Скорость оседания мелкодисперсных частиц, в том числе свободноплавающих бактерий, установилась лишь после двухчасовой экспозиции.

Снижение способности активного ила к флокуляции приводит к сохранению в очищенной воде и значительного количества санитарно-показательных микроорганизмов (табл. 3).

Таблица 3. Санитарные показатели сточной воды
Table 3. Sanitary indicators of waste water bacteria

Сточная вода	КМАФАнМ, КОЕ/мл	Бактерии р. <i>Escherichia</i> , КОЕ/мл	Бактерии р. <i>Pseudomonas</i> , КОЕ/мл
До очистки	$3 \cdot 10^8$	$3 \cdot 10^5$	$3,4 \cdot 10^5$
После очистки	$6 \cdot 10^6$	$2,4 \cdot 10^4$	$1,8 \cdot 10^3$

Обнаружение в сточной воде, до и после очистки, микроорганизмов, относящихся к семейству кишечных палочек, также свидетельствует о сниженной активности работы ЛОС. Обычно их численность в очищенной воде на 90–99 % ниже, чем в воде, поступающей на очистку [6].

Согласно литературным данным активный ил обеспечивает высокую скорость окисления загрязняющих веществ только во флокулированном состоянии [3]. Таким образом, степень очистки стоков от большинства загрязняющих веществ определяется также способностью активного ила к флокуляции. Процесс образования флокул в активном иле возможен за счет взаимодействия загрязняющих веществ сточных вод как непосредственно с клеточной поверхностью микроорганизмов, так и с продуктами их синтеза (биофлокулянтами).

Первичными маркерами биофлокулянт-продуцирующей способности бактерий являются их культуральные и морфологические признаки (слизь, глянцевый блеск, вязкость, наличие слизистых чехлов и капсул) [7]. Для дальнейших исследований авторами были отобраны колонии бактерий, обладающие указанными свойствами (рис. 5). Изолированные культуры относились к р. *Pseudomonas* и были выделены из группы гетеротрофных нитрификаторов активного ила.

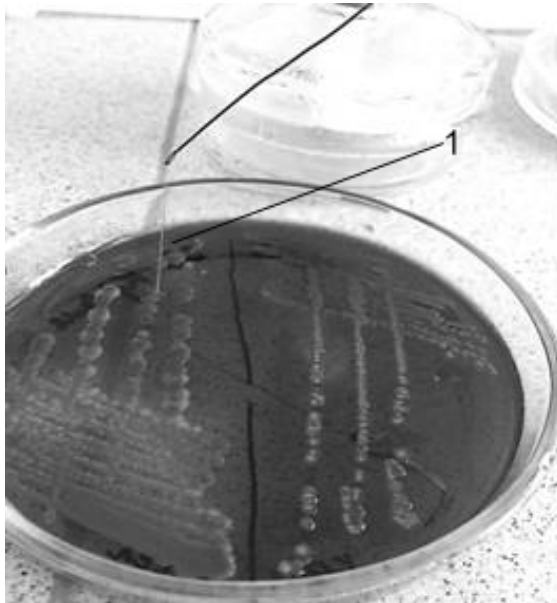


Рис. 5. Культуральные свойства бактерий р. *Pseudomonas*: 1 – тяж
Fig. 5. Cultural properties of bacteria of the *Pseudomonas* genus: 1 – cord

Известно, что агрегирование бактерий в сточных водах определяется как их способностью синтезировать биофлокулянты, так и физико-химическими условиями среды обитания – концентрацией растворенного кислорода, рН, соотношением С : N, С : Р и пр. [8]. В работе проведено сравнение способности осажждать каолиновую суспензию бактериями р. *Pseudomonas* в зависимости от условий культивирования. Культуральные жидкости полимер-продуцирующих бактерий обладали наибольшей флокулирующей активностью (74 %) при выращивании их на питательных средах, приближенных по составу к очищенной сточной воде. Состав среды характеризовался высоким содержанием аммонийного азота (56 мг/л) и низким содержанием углеводов (19 мг/л). Таким образом, при данном соотношении источников биогенных веществ, бактерии р. *Pseudomonas* в процессе гетеротрофной нитрификации способны проявлять высокую флокулирующую активность.

Заключение

В результате проведенных исследований изучен гидрохимический состав среды обитания бактерий активного ила, который характеризовался низким содержанием органических веществ и большим количеством солей аммония и фосфатов. Количественный и качественный состав бактериоценоза активного ила ЛОС ТОПАС-5 представлен различными физиологическими группами с преобладанием гетеротрофных нитрификаторов по численности, основных представителей активного ила. Смещение оптимального соотношения С : Р за счет низкой нагрузки на бактериоценоз очистных сооружений привело к замедленному приросту микробной биомассы и, как следствие, к снижению степени очистки сточной воды. Достигнуть полного эффекта можно, повышая способность ила к осаждению, который будет адсорбировать на себе недоокисленные вещества.

Выделенная из активного ила культура бактерий подтвердила связь между первичными морфологическими признаками флокулирующей способности бактерий и условиями культивирования. Поэтому важной задачей в изучении видового разнообразия активного ила является необходимость разработки специфических питательных сред для выделения бактерий, продуцирующих биофлокулянты.

Библиографический список

1. Воронов Ю. В., Яковлев С. В. Водоотведение и очистка сточных вод. 4-е изд. М. : АСВ, 2006. 704 с.
2. Жмур Н. С. Технологические и биохимические процессы очистки сточных вод на сооружениях с аэротенками. М. : АКВАРОС, 2003. 512 с.
3. Рекомендации по проведению гидробиологического контроля на сооружениях биологической очистки с аэротенками / ОГУ "Аналитический центр" ; под ред. М. В. Деминой. Пермь : Пермский ГТУ, 2004. 53 с.
4. Практическая гидробиология. Пресноводные экосистемы / под ред. В. Д. Федорова, В. И. Капкина. М. : ПИМ, 2006. 367 с.
5. Кузнецов С. И., Дубинина Г. А. Методы изучения водных микроорганизмов. М. : Наука, 1989. 288 с.
6. Нетрусов А. И., Бонч-Осмоловская Е. А., Горленко В. М. и др. Экология микроорганизмов. М. : Академия, 2004. 272 с.
7. Gao H. Y. et al. Characterization of a bioflocculant from a newly isolated *Vagococcus* sp. W31 // J. Zhejiyan Univ. Sci. 2006. V. 7, N 3. P. 186–192.

References

1. Voronov Yu. V., Yakovlev S. V. Vodootvedenie i ochildka stochnyh vod [Sewage and wastewater treatment]. 4-e izd. M. : ASV, 2006. 704 p.
2. Zhmur N. S. Tehnologicheskie i biohimicheskie protsessy ochildki stochnyh vod na sooruzheniyah s aerotenkami [Technological and biochemical processes of wastewater treatment plants with the aeration tanks]. M. : AKVAROS, 2003. 512 p.
3. Rekomendatsii po provedeniyu gidrobiologicheskogo kontrolya na sooruzheniyah biologicheskoy ochildki s aerotenkami [Recommendations for the hydro-biological monitoring on the biological treatment plants with aeration tanks] / OGU "Analiticheskiy tsentr" ; pod red. M. V. Deminoy. Perm : Permskiy GTU, 2004. 53 p.
4. Prakticheskaya gidrobiologiya. Presnovodnye ekosistemy [Applied Hydrobiology. Freshwater ecosystems] / pod red. V. D. Fedorova, V. I. Kapkova. M. : PIM, 2006. 367 p.
5. Kuznetsov S. I., Dubinina G. A. Metody izucheniya vodnyh mikroorganizmov [Methods of studying aquatic organisms]. M. : Nauka, 1989. 288 p.
6. Netrusov A. I., Bonch-Osmolovskaya E. A., Gorlenko V. M. i dr. Ekologiya mikroorganizmov [Microbial ecology]. M. : Akademiya, 2004. 272 p.
7. Gao H. Y. et al. Characterization of a bioflocculant from a newly isolated *Vagococcus* sp. W31 // J. Zhejiyan Univ. Sci. 2006. V. 7, N 3. P. 186–192.

Сведения об авторах

Ильинский Владимир Викторович – Ленинские горы, 1, стр. 12, г. Москва, Россия, 119991; Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова, д-р биол. наук, профессор; e-mail: vladilinskiy@gmail.com

Ильинский В. В. – 1/12, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991; M. V. Lomonosov Moscow State University, Dr of Biol. Sci., Professor; e-mail: vladilinskiy@gmail.com

Крамаренко Екатерина Вячеславовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра микробиологии и биохимии, аспирант; e-mail: kramarenkoev@mstu.edu.ru

Крамаренко Е. В. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Microbiology and Biochemistry, PhD Student; e-mail: kramarenkoev@mstu.edu.ru

Макаревич Елена Викторовна – ул. Спортивная, 13, г. Мурманск, Россия, 183010; Мурманский государственный технический университет, Естественно-технологический институт, кафедра микробиологии и биохимии, канд. биол. наук, доцент; e-mail: makarevichev@mstu.edu.ru

Макаревич Е. В. – 13, Sportivnaya Str., Murmansk, Russia, 183010; Murmansk State Technical University, Institute of Natural Science and Technology, Department of Microbiology and Biochemistry, Cand. of Biol. Sci., Associate Professor; e-mail: makarevichev@mstu.edu.ru

V. V. Il'inskiy, E. V. Kramarenko, E. V. Makarevich

Evaluation of the functional activity of activated sludge from local waste water treatment plant in the Arctic region

The paper considers characteristics of the activated sludge in the local wastewater treatment plant (LWTP) and its ability to purify fully domestic sewage water in the Far North. Biochemical process of destruction of organic pollutants is influenced by a microbial complex functioning in aeration tanks. Taking into account climatic conditions of the region where the organic matter degradation processes are slowed, and lack of control over the operation, efficiency and occupational safety of LWTPs, it seems to be important to study the physiological characteristics of the bacteria used in bioremediation, and their ability to maximize the purifying domestic sewage in the Arctic region. Undue intervention in the biosphere systems leads to disruption of the balance of internal and external ecosystems communications. The goal of research is studying structural determination and functioning of activated sludge bacteriogenesis of LWTP TOPAS-5 (GK "Topol-ECO") in certain physical and chemical conditions of the habitat, and establishing completeness of cleaning process in this treatment plant. The paper considers the structure (quantitative and qualitative composition) and function of LWTP activated sludge bacteriogenesis functioning in the Arctic region. The estimation of the activated sludge of full waste water treatment process of the LWTP has been given. The research's results have allowed to identify and determine the bacterial count of physiological groups of microorganisms purified domestic sewage; to isolate from activated sludge the bioflocculant-producing microorganisms' on the experimental medium; to evaluate efficiency of LWTP work in the Arctic region.

Key words: Arctic region, waste water treatment plant, wastewater, activated sludge, bacteriogenesis, hydrochemistry, ammonifier, nitrate bacteria, bioflocculant.