Вестник Евразийской науки / The Eurasian Scientific Journal https://esj.today

2026, Том 18, № 5 / 2026, Vol. 18, Iss. 5 https://esj.today/issue-5-2026.html

URL статьи: https://esj.today/PDF/06SAVN526.pdf

DOI: 10.15862/06SAVN526 (https://doi.org/10.15862/06SAVN526)

2.1.4. Водоснабжение, канализация, строительные системы охраны водных ресурсов (технические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:
Гогина, Е. С. Ограничения традиционных технологий биологической очистки сточных вод при низких температурах / Е. С. Гогина, А. А. Кадысева, М. М. Пукемо // Вестник евразийской науки. — 2026. — Т. 18. — № 5. — URL: https://esj.today/PDF/06SAVN526.pdf. DOI: 10.15862/06SAVN526.

For citation:
Gogina E.S., Kadyseva A.A., Pukemo M.M. Limitations of conventional biological wastewater treatment technologies at low temperatures. *The Eurasian Scientific Journal*. 2026;18(5): 06SAVN526. Available at: https://esj.today/PDF/06SAVN526.pdf. DOI: 10.15862/06SAVN526. (In Russ., abstract in Eng.).

УДК 628.35

Гогина Елена Сергеевна
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Главный научный сотрудник
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», Москва, Россия
Заведующий кафедрой
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: Gogina-es@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4893-8922
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=298730
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/P-7887-2015
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55841908100

Кадысева Анастасия Александровна
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Ведущий инженер
ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе», Москва, Россия
Профессор кафедры
Доктор биологических наук, доцент
E-mail: kadyseva@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8703-5684
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=698088

Пукемо Михаил Михайлович
ФГБУ «Научно-исследовательский институт строительной физики Российской академии архитектуры и строительных наук», Москва, Россия
Инженер
ГК «Альта Групп», Москва, Россия
Директор
Кандидат технических наук
E-mail: 2336122@alta-group.ru
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=890851

Ограничения традиционных технологий биологической очистки сточных вод при низких температурах

Аннотация. В статье представлен систематический обзор литературы за период 1994–2025 гг., посвящённый ограничениям традиционных технологий биологической очистки сточных вод при низких температурах (< 15°C). Авторами рассмотрены три уровня температурного воздействия: физиолого-биохимический, кинетический и технологический. На физиолого-биохимическом уровне проанализированы молекулярные механизмы ингибирования микробных сообществ — изменение липидного состава мембран, снижение активности ферментов, нарушение экспрессии генов. В статье показано, что нитрификация является наиболее чувствительным процессом: при 12°C её скорость снижается на 50 %, при 5°C в суспензионных системах она практически останавливается, а при резком снижении температуры с 20 до 10°C скорость падает на 58 %. Авторами установлено, что денитрификация при 3°C составляет лишь 55 % от скорости при 15°C. Биологическое удаление фосфора при 10°C требует увеличения SRT с 2,5 до 4,5 сут, а эффективность EBPR падает до 73 %. В статье рассмотрено ухудшение седиментационных свойств ила: снижение температуры с 10 до 4°C удваивает необходимое время отстаивания; в холодном климате развивается нитчатое вспухание с доминированием norank_f_Saprospiraceae (10,24 %) и Candidatus Microthrix (8,40 %). Авторами проанализировано лимитирование анаэробных процессов: при 7°C метаногенная активность подавляется, хотя сульфатредукторы сохраняют активность. В статье рассмотрены традиционные стратегии компенсации (увеличение HRT, SRT, DO) и показаны их энергетические и экономические ограничения. Авторами сделан вывод о необходимости поиска альтернативных подходов к низкотемпературной биоочистке.

Ключевые слова: низкие температуры; активный ил; нитрификация; денитрификация; биологическое удаление фосфора; нитчатое вспухание ила; седиментационные свойства; анаэробная очистка; традиционные технологии

Введение

Биологическая очистка сточных вод, основанная на метаболической активности микроорганизмов активного ила и биоплёнок, остаётся доминирующей технологией удаления органических загрязнений и биогенных элементов [1]. Для большинства функциональных групп микроорганизмов очистных сооружений — аэробных гетеротрофов, аммонийокисляющих бактерий (AOB), нитрит-окисляющих бактерий (NOB), денитрификаторов, фосфор-аккумулирующих бактерий (PAO) — температурный оптимум лежит в диапазоне 20–35°C [1; 2]. Однако в регионах с холодным климатом — на большей части территории России, в Канаде, Скандинавии, северном Китае — температура сточных вод зимой опускается до 8–15°C, а нередко и до 1–5°C [1; 3–5]. Это приводит к резкому ухудшению качества очистки, нарушению работы очистных сооружений и, как следствие, к сбросу недостаточно очищенных вод в водные объекты [1; 3; 4; 6]. По данным исследований, проведённых на северо-востоке Китая, в зимний период эффективность удаления аммонийного азота на станциях биологической очистки снижается в 1,5–3 раза по сравнению с летними месяцами, что напрямую связано с температурной депрессией нитрифицирующего сообщества [4].

Особенно остро проблема стоит для малых и средних очистных сооружений. В зимний период температура сточной воды в небольших северных посёлках (например, в Ямало-Ненецком автономном округе) в септиках составляет всего 2–4°C, на входе станций — 6–7°C [6]. В Канадской Арктике температура воды в лагунах зимой опускается до 1–4°C, а биологическая активность ограничена коротким летним сезоном [7]. Аналогичная ситуация наблюдается в скандинавских странах: норвежские исследователи отмечают, что на станциях с биореакторами подвижной загрузки (MBBR) при зимних температурах 3–8°C эффективность нитрификации снижается до критических значений, что требует существенного увеличения объёма реакторов для соблюдения нормативов сброса [5]. Таким образом, проблема низкотемпературной биоочистки

носит глобальный характер и требует системного рассмотрения — от молекулярных механизмов холодного стресса у микроорганизмов до инженерных стратегий адаптации технологий [1; 8].

Ряд исследователей обращали внимание на отдельные аспекты этой проблемы: температурную зависимость кинетики нитрификации [10; 11], ухудшение седиментационных свойств ила при низких температурах [12], вспухание активного ила в холодный период [13; 14], адаптацию микробных сообществ к хроническому холодовому стрессу [15; 16], а также модификацию метаболических путей фосфор-аккумулирующих бактерий при понижении температуры [17]. Тем не менее комплексного анализа, охватывающего все уровни воздействия низких температур на традиционные технологии биологической очистки — от молекулярных механизмов до эксплуатационных проблем и экономических ограничений компенсационных стратегий — в доступной литературе не представлено. Отдельно следует отметить, что подавляющее большинство исследований рассматривает лишь один-два аспекта температурного воздействия, в то время как реальная эксплуатация очистных сооружений в холодном климате требует понимания взаимосвязей между всеми уровнями — от изменения липидного состава мембран до экономической целесообразности применения той или иной компенсационной стратегии.

Цель настоящей работы — систематический анализ ограничений традиционных технологий биологической очистки сточных вод при низких температурах, включая физиолого-биохимические механизмы ингибирования, количественную оценку снижения эффективности ключевых процессов, а также анализ технологических проблем, возникающих в холодный период. Научная новизна заключается в комплексном анализе ограничений по трём уровням: физиолого-биохимическому (молекулярные механизмы), кинетическому (количественная оценка снижения скорости процессов) и технологическому (седиментационные свойства, вспухание ила, эксплуатационные проблемы). На основе этого анализа обоснована необходимость поиска альтернативных подходов к низкотемпературной биоочистке.

Методы

Исследование выполнено на основе анализа и обобщения данных, представленных в рецензируемой научной литературе за период 1994–2025 гг. Источниками информации служили оригинальные экспериментальные работы, опубликованные в журналах, индексируемых в базах данных Scopus, Web of Science и PubMed, а также материалы специализированных научных конференций и полноразмерных исследований очистных сооружений. Всего в анализ было включено 43 источника, охватывающих как лабораторные, так и полноразмерные исследования.

Методология анализа включала несколько взаимосвязанных направлений. Анализ физиолого-биохимических механизмов воздействия низких температур на микроорганизмы проводился на основе данных молекулярной биологии и биохимии [1; 8; 9]. Особое внимание уделялось изменениям липидного состава мембран, ферментативной активности и экспрессии генов, ответственным за адаптацию микроорганизмов к холодовому стрессу. Количественная оценка температурной зависимости кинетических параметров ключевых процессов биологической очистки (нитрификация, денитрификация, биологическое удаление фосфора, анаэробные процессы) выполнялась на основе уравнения Аррениуса-Вант-Гоффа и моделей температурной поправки (θ-коэффициент) [1; 2; 10]. Использование θ-модели позволяет сравнивать данные, полученные в различных системах и при различных температурных режимах, приводя их к единому безразмерному показателю. Анализ технологических проблем, возникающих при низких температурах — ухудшение седиментационных свойств, нитчатое вспухание ила, увеличение времени отстаивания, — опирался на данные эксплуатационных исследований

06SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

[12; 13]. Обобщение опыта эксплуатации полноразмерных очистных сооружений в холодном климате (Скандинавия, Канада, северный Китай, российская Арктика) проводилось по опубликованным результатам мониторинга [18–20]. Для сравнительной оценки температурной чувствительности различных процессов применялся стандартизованный подход: для каждого процесса определялись температурный коэффициент θ, критический температурный порог и относительная скорость при 5°C по сравнению с 20°C.

В работе приняты следующие обозначения и единицы измерения: T — температура, °C; θ — температурный коэффициент, безразмерный; SRT — sludge retention time (возраст ила), сут; HRT — hydraulic retention time (время гидравлического удержания), ч; DO — dissolved oxygen (растворённый кислород), мг/л; MLVSS — mixed liquor volatile suspended solids (концентрация летучих взвешенных веществ в аэротенке), г/л; EPS — extracellular polymeric substances (внеклеточные полимерные вещества); AOB — ammonia-oxidizing bacteria (аммонийокисляющие бактерии); NOB — nitrite-oxidizing bacteria (нитрит-окисляющие бактерии); PAO — phosphorus-accumulating organisms (фосфор-аккумулирующие бактерии); EBPR — enhanced biological phosphorus removal (биологическое удаление фосфора).

Результаты и обсуждение

Физиолого-биохимические механизмы ингибирования. Снижение температуры оказывает комплексное негативное воздействие на микробные клетки на молекулярном и физиологическом уровнях [1; 8]. При падении температуры происходит изменение липидного состава мембран: увеличивается доля ненасыщенных жирных кислот для поддержания текучести. Этот процесс, известный как гомеовискозная адаптация, направлен на сохранение жидкокристаллического состояния мембраны при понижении температуры. Однако, несмотря на адаптационные механизмы, текучесть и проницаемость мембран снижаются, что нарушает транспорт субстратов и работу мембранных белков [1; 8]. В частности, замедление диффузии субстратов через мембрану лимитирует скорость их поступления в клетку, что напрямую отражается на удельной скорости потребления органического субстрата и энергетическом балансе микроорганизмов.

Холодовой стресс замедляет транскрипцию и трансляцию, снижает активность ферментов, нарушает экспрессию генов [1]. Снижение ферментативной активности следует правилу Аррениуса: при каждом понижении температуры на 10°C каталитическая активность ферментов уменьшается примерно в 2–3 раза. В соответствии с уравнением Аррениуса скорость микробного роста снижается примерно вдвое при каждом снижении температуры на 10°C [1; 2]. Для большинства микроорганизмов очистных сооружений оптимальная температура составляет 20–35°C [2]; при температуре ниже 15°C наблюдается существенное снижение метаболической активности [1; 2]. Низкая температура изменяет структуру микробного сообщества: снижаются разнообразие и видовое богатство, меняется соотношение функциональных групп [1; 15]. Это приводит к потере функциональной избыточности и снижению устойчивости системы к нагрузкам [15; 16]. Исследования финских очистных сооружений показали, что при длительной экспозиции при низких температурах формируются специализированные холодоадаптированные нитрифицирующие сообщества, отличающиеся от мезофильных как по видовому составу, так и по кинетическим параметрам [15; 18]. В частности, было установлено, что бактерии рода *Nitrotoga*, ранее не считавшиеся значимыми нитрит-окисляющими организмами, играют ключевую роль в нитрификации при низких температурах в полноразмерных очистных сооружениях [9].

Ингибирование нитрификации. Нитрификация — двухступенчатое окисление аммония до нитрата — является наиболее чувствительным к низким температурам процессом биологической очистки [1; 2; 10]. Скорость нитрификации описывается температурным коэффициентом $\theta \approx 1{,}09$ в диапазоне 5–30°C [1; 11]. При постоянной концентрации растворённого кислорода

06SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

истинный температурный коэффициент для нитрификации в биоплёночных системах составляет θ = 1,09 [21]. Для диапазона 5–15°C был получен температурный коэффициент θ = 1,07 [21], а в диапазоне 5–20°C значения θ могут достигать 1,172 [1; 22]. Различия в значениях θ, по-видимому, обусловлены типом системы (суспензионная или биоплёночная), составом микробного сообщества и условиями акклимации.

Резкое падение скорости нитрификации наблюдается ниже 15°C: при 12°C скорость снижается на 50 % [1]. При 5°C нитрификация в суспензионных системах практически останавливается [1; 23], и многочисленные исследования подтверждают, что при температуре ниже 5°C жизнедеятельность нитрифицирующих бактерий практически прекращается [1; 2]. В SBR-реакторах при резком снижении температуры с 20 до 10°C скорость нитрификации падала на 58 % [1]. В гранульных PAO SBR при снижении температуры до 10°C эффективность удаления NH_4^+-N снижалась с 99,1 % до 54,5 % [24]. В пилотной A^2/O системе нитрификация значительно ингибировалась при температуре ниже 10°C; максимальная скорость нитрификации при этом составляла всего 36,0 мг NH_4^+-N/(г MLVSS·сут) [25].

Степень ингибирования зависит от температуры акклимации биомассы [1; 26]. При охлаждении биомассы, адаптированной к 20, 25 и 30°C, до 10°C среднее снижение скорости нитрификации составляло 58 %, 71 % и 82 % соответственно [1]. Это указывает на то, что микроорганизмы, адаптированные к более высоким температурам, значительно сильнее страдают от холодового шока [26; 27]. Биоплёночные системы демонстрируют более высокую устойчивость к низким температурам по сравнению с суспензионными: при длительной акклимации в MBBR-реакторах нитрификация сохранялась при температурах 4°C и даже 2°C, хотя и при сниженной скорости [11; 27]. Это связано с тем, что биоплёнка обеспечивает более высокую концентрацию биомассы и защиту от вымывания, что особенно важно для медленно растущих нитрификаторов [28].

Ингибирование денитрификации. Денитрификация также существенно подавляется холодом, хотя и в меньшей степени, чем нитрификация [1; 2]. Для денитрификации в MBBR с внешним источником углерода истинный температурный коэффициент составляет θ = 1,07 для диапазона 5–15°C [11]. При этом температурный эффект может частично маскироваться различиями в соотношении C/N и нагрузке по нитратам [11; 29]. При 3°C скорость денитрификации составляет около 55 % от скорости при 15°C [1], а при снижении температуры инкубации с 22 до 4°C скорость падает примерно на 77 % [1]. В EGSB-реакторе при 10°C наблюдалось накопление нитрита, что свидетельствует о неполной денитрификации [30]. При низких температурах происходит перестройка сообщества денитрификаторов: в EGSB-реакторе при 10°C возрастала роль *Halomonas*, тогда как *Azoarcus* подавлялись [30]. Для пре-денитрификации в MBBR концентрация легко биоразлагаемой органики, рециркуляция нитрата и количество кислорода, поступающего в реактор, могут оказаться более важными факторами, чем собственно температура [19; 29]. Этот вывод имеет важное практическое значение: оптимизация режимных параметров (соотношение C/N, рециркуляция) может частично компенсировать температурное ингибирование денитрификации без существенных капитальных затрат.

Снижение эффективности биологического удаления фосфора. Биологическое удаление фосфора не имеет столь жёсткого нижнего температурного предела, как нитрификация, однако при низких температурах наблюдаются существенные изменения [2; 31]. Снижение температуры увеличивает требуемый возраст ила: для биологического удаления фосфора SRT ~2,5 сут при 20°C возрастает до ~4,5 сут при 10°C [2; 31]. В лабораторных условиях результаты варьируют от снижения эффективности до её улучшения при 5°C; на полноразмерных сооружениях при корректировке режимных параметров удаление фосфора сохранялось даже при 5–10°C [31; 32]. Однако при 4°C в SBR наблюдался резкий рост концентрации фосфора в эффлюенте (> 2 мг/л) [31]. В системе EBPR при 10°C эффективность удаления фосфора составляла лишь 73 %, тогда

06SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

как при 20–30°C достигала 99 % [33]. При SRT = 10 сут EBPR демонстрировала 86 % удаления P при 20°C, но снижение до 71 % при 15°C и прогрессирующую потерю активности при более низких температурах [34].

При снижении температуры изменяется метаболическая стратегия фосфор-аккумулирующих бактерий [17]. В MPSR-реакторе при 15, 12 и 10°C эффективность удаления общего фосфора составляла 97,0 %, 94,0 % и 94,8 % соответственно [17]. Потребление гликогена уменьшалось на 27,44 мг/г MLSS, тогда как накопление и потребление поли-β-гидроксибутирата (PHB) увеличивалось на 33,80 и 37,88 мг/г MLSS соответственно [17]. Два ключевых рода PAO — *Rhodocyclus* и *Dechloromonas* — увеличились с 0,70 % до 3,04 % и с 0,31 % до 2,79 % соответственно [17]. Гликолиз ингибировался при 12 и 10°C, и PAO увеличивали фосфорный метаболизм для удовлетворения энергетических потребностей [17]. Этот сдвиг метаболического пути представляет собой компенсаторный механизм: при подавлении гликолиза бактерии переключаются на полифосфатный цикл как альтернативный источник энергии, что позволяет поддерживать приемлемый уровень удаления фосфора, хотя и при более высоких затратах на управление системой.

Ухудшение седиментационных свойств и вспухание ила. Помимо кинетического ингибирования, низкие температуры вызывают серьёзные технологические проблемы, связанные с изменением физических свойств иловой смеси [1; 12; 13]. Снижение температуры увеличивает вязкость воды: падение температуры с 10 до 4°C удваивало необходимое время отстаивания в SBR [12]. Из-за неполного потребления органики и стресса микроорганизмы продуцируют избыточные внеклеточные полимеры (EPS), флокулы становятся рыхлыми, увеличивается связанная вода, растёт вязкость иловой смеси — всё это снижает скорость осаждения [1; 12]. Увеличение продукции EPS при низких температурах является стрессовой реакцией микроорганизмов: полимеры выполняют защитную функцию, формируя микроокружение вокруг клеток, но при этом ухудшают структурно-механические свойства активного ила.

В холодном климате часто развивается нитчатое вспухание ила [13; 14]. На станции с окислительным каналом в холодном регионе Китая вспухание было вызвано нитчатыми *norank_f_Saprospiraceae* и *Candidatus Microthrix* (10,2 % и 8,4 % соответственно) [13]. Исследования показали, что эти организмы являются доминирующими нитчатыми бактериями в условиях низких температур [13]. При этом анаэробный танк оказывал ингибирующее действие на нитчатые бактерии [13]. *Microthrix Parvicella* является доминирующим нитчатым видом при низких температурах и низких концентрациях DO [35]; этот микроорганизм благоприятствует денитрификации, но негативно влияет на нитрификацию [35; 36]. Вспухание усугубляет вынос биомассы, снижает качество очистки и затрудняет соблюдение нормативов [13; 14]. Кроме того, *Trichococcus* (3,91 %) также является доминирующим нитчатым родом, вызывающим вспухание ила при низких температурах и низком DO [13]. Развитие нитчатого вспухания в холодный период создаёт замкнутый круг проблем: ухудшение седиментации ведёт к выносу биомассы, что снижает концентрацию нитрификаторов в системе, что, в свою очередь, усугубляет ингибирование нитрификации, уже ослабленной низкими температурами.

Лимитирование анаэробных процессов. Анаэробные процессы, включая метаногенез и сульфатредукцию, также лимитируются низкими температурами [37; 38]. При 7°C в комбинированной системе UASB + DHS метаногенная активность подавлялась, тогда как сульфатредукторы сохраняли активность при низких температурах [37]. Это указывает на то, что различные группы анаэробных микроорганизмов имеют разную температурную чувствительность [37; 38]. Сохранение активности сульфатредукторов при низких температурах может быть использовано как преимущество в системах, где серный цикл играет роль в удалении органических загрязнений. В UASB-реакторах при 35°C скорость удаления ХПК достигает 28 кг ХПК/(м³·сут) при HRT 0,26 ч, однако при низких температурах эти показатели существенно

06SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

снижаются [39]. При правильном подборе холодоадаптированных инокулятов анаэробная очистка возможна при 4–15°C [38; 40]. UASB-реакторы, инокулированные холодоадаптированными осадками, при 15°C и HRT 7,7 ч достигали концентрации ХПК в эффлюенте < 125 мг/л [38], а при 4°C непрерывная анаэробная очистка реальных сточных вод оказалась возможна после 40-дневной акклимации [38]. Однако результаты, полученные в лабораторных условиях, не всегда воспроизводятся на полноразмерных сооружениях, где флуктуации состава и расхода сточных вод могут снижать стабильность анаэробного процесса.

Энергетические и экономические ограничения традиционных стратегий компенсации. Традиционные стратегии компенсации низких температур имеют существенные ограничения [1; 41]. Увеличение времени гидравлического удержания требует увеличения объёма реакторов или снижения производительности [1]. В BAF при 6,5°C нитрификация возрастала с 30 % до 95 % при увеличении HRT с 0,5 до 2 ч, однако это требует удвоения объёма сооружений [1]. Для удержания медленно растущих нитрификаторов при 10°C требуется примерно на 45 % больший SRT, чем при 20°C [1], что увеличивает капитальные затраты и риск вымывания биомассы при сбросах. Повышение концентрации растворённого кислорода улучшает массоперенос и компенсирует снижение активности [1; 42]. При 10°C и даже 5°C удаление азота в мембранном биореакторе достигало 90 % и 85 % при достаточной подаче кислорода [1]. Однако повышение DO требует увеличения энергозатрат на аэрацию, которые составляют до 50–70 % энергопотребления очистных сооружений [42]. При температуре ниже 10°C одновременное увеличение DO и MLVSS является необходимой мерой из-за низкой максимальной скорости нитрификации [1; 26], но это требует дополнительных затрат на рециркуляцию и утилизацию избыточного ила.

В удалённых арктических объектах традиционная биологическая очистка часто оказывается нерентабельной [6]. Альтернативные физико-химические схемы могут быть экономически более эффективными: лабораторные испытания на реальных сточных водах септика показали снижение ХПК на 96,6 %, NH_4^+ на 99,5 % и взвешенных веществ на 99,9 %, при этом стоимость очистки оказалась в 2,1 раза ниже традиционной биологической [6], поэтому в условиях Крайнего Севера целесообразнее применять комбинированные физико-химические и биологические схемы либо новые инженерные решения — например, подогреваемую биозагрузку для биоплёночных реакторов, которая поддерживает оптимальную температуру в зоне биоплёнки и обеспечивает стабильную работу системы в холодном климате.

Сравнительная характеристика температурной чувствительности процессов. Обобщённые данные по температурной чувствительности ключевых процессов представлены в таблице 1.

Таблица 1

Сравнительная характеристика температурной чувствительности процессов биологической очистки

Процесс	Температурный коэффициент θ	Критический порог	Скорость при 5°C относительно 20°C	Источник
Нитрификация (суспензионная)	1,09–1,17	10–12°C	≤ 20 % (практически останавливается)	[1; 22]
Нитрификация (биоплёночная)	1,07–1,09	4–2°C	~60–65 % (при длительной акклимации)	[21; 28]
Денитрификация	1,07	3–5°C	~55 % от 15°C	[1; 21]
Биологическое удаление фосфора	—	5–10°C	~73 % EBPR при 10°C	[33]
Аэробная деструкция ХПК	—	<5°C	~83 % при 8,9°C	[41]
Анаэробный метаногенез	—	<10°C	Сильно подавлен при 7°C	[37]

[1; 21; 22; 28; 33; 37; 41]

06SAVN526
Издательство «Мир науки» \ Publishing company «World of science» http://izd-mn.com

Наиболее чувствительным процессом является нитрификация: критический порог — 10°C, скорость при 5°C составляет менее 20 % от уровня 20°C для суспензионных систем [1]. Денитрификация имеет промежуточную чувствительность: при 3°C скорость составляет ~55 % от уровня 15°C [1]. Деструкция органических веществ (ХПК) является наиболее устойчивым процессом: при 8,9°C эффективность удаления может сохраняться на уровне 82,7 % [43]. Анаэробный метаногенез демонстрирует высокую чувствительность: при 7°C метаногенная активность сильно подавлена [37]. Биоплёночная нитрификация существенно устойчивее суспензионной: при длительной акклимации скорость при 5°C может сохраняться на уровне 60–65 % от значения при 20°C [21; 28].

Заключение

Выявленные ограничения традиционных технологий обосновывают необходимость поиска альтернативных подходов к низкотемпературной биологической очистке, включая использование биоплёночных систем с повышенной устойчивостью к холоду [21; 28], холодоадаптированных микробных культур [15; 16], а также локального температурного управления прикреплённым биоценозом [42]. Перспективными направлениями дальнейших исследований можно рассматривать селекцию и биоаугментацию психротолерантных штаммов нитрифицирующих микроорганизмов, создание гибридных биоплёночно-суспензионных систем, внедрение локального температурного управления с применением подогреваемой биозагрузки в биоплёночных реакторах, а также интеграция этих решений в традиционные технологические схемы для обеспечения стабильной работы очистных сооружений и соблюдения нормативов качества воды круглый год.

ЛИТЕРАТУРА

1. Zhou H., et al. Overview of strategies for enhanced treatment of municipal/domestic wastewater at low temperature // Science of The Total Environment. 2018. Vol. 643. P. 225–237. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.100. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969718321016 (дата обращения: 01.09.2026).
2. Alisawi H.A.O. Performance of wastewater treatment during variable temperature // Applied Water Science. 2020. Vol. 10. No. 4. Art. 89. DOI: 10.1007/s13201-020-1171-x. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s13201-020-1171-x (дата обращения: 01.09.2026).
3. Wang F., et al. Treatment of domestic wastewater in step-feeding anoxic/oxic activated sludge-biofilm system at low temperature: Performance, removal characteristics, and community // Desalination and Water Treatment. 2018. Vol. 120. P. 150–157. DOI: 10.5004/dwt.2018.22605. URL: https://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_120/150_2018_22605.pdf (дата обращения: 01.09.2026).
4. Song J., et al. Biochemical Treatment of Municipal Sewage in Northeast China in Winter // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2019. Vol. 237. P. 022048. DOI: 10.1088/1755-1315/237/2/022048. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/237/2/022048 (дата обращения: 01.09.2026).

5. Rusten B., et al. Nitrogen removal in moving-bed biofilm reactor plants at low temperatures: experiences from Norway // Water Science and Technology. 2023. Vol. 87. No. 10. P. 2432–2445. DOI: 10.2166/wst.2023.132. URL: https://iwaponline.com/wst/article/87/10/2432/95423 (дата обращения: 01.09.2026).
6. Vialkova E., Glushchenko E. Wastewater Treatment in Remote Arctic Settlements // Water. 2021. Vol. 13. No. 7. P. 919. DOI: 10.3390/w13070919. URL: https://www.mdpi.com/2073-4441/13/7/919 (дата обращения: 01.09.2026).
7. Ragush C.M., et al. Performance of municipal waste stabilization ponds in the Canadian Arctic // Ecological Engineering. 2015. Vol. 83. P. 413–421. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2015.07.008. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0925857415300726 (дата обращения: 01.09.2026).
8. Mohd Yasin N. H., Sanchez-Torres V., Maeda T. Enhanced reduction of waste activated sludge at a low temperature by locally isolated strains Pseudomonas sp. VNT and Aeromonas sp. VNT // Bioresource Technology. 2014. Vol. 174. P. 134–141. DOI: 10.1016/j.biortech.2014.10.005. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852414015221 (дата обращения: 01.09.2026).
9. Lücker S., et al. Nitrotoga-like bacteria are previously unrecognized key nitrite oxidizers in full-scale wastewater treatment plants // The ISME Journal. 2014. Vol. 9. No. 3. P. 708–720. DOI: 10.1038/ismej.2014.158. URL: https://www.nature.com/articles/ismej2014158 (дата обращения: 01.09.2026).
10. Zhu S., Chen S. The impact of temperature on nitrification rate in fixed film biofilters // Aquacultural Engineering. 2002. Vol. 26. No. 4. P. 221–237. DOI: 10.1016/S0144-8609(02)00022-5. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0144860902000225 (дата обращения: 01.09.2026).
11. Zhang S., Wang Y., He W., et al. Impacts of temperature and nitrifying community on nitrification kinetics in a moving-bed biofilm reactor treating polluted raw water // Chemical Engineering Journal. 2014. Vol. 236. P. 242–250. DOI: 10.1016/j.cej.2013.09.086. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1385894713012797 (дата обращения: 01.09.2026).
12. Morling S., Plaza E. Biological nitrogen removal at low water temperatures — long term experience // Desalination and Water Treatment. 2011. Vol. 25. No. 1-3. P. 226–232. DOI: 10.5004/dwt.2011.1928. URL: https://www.deswater.com/DWT_abstracts/vol_25/25_2011_226.pdf (дата обращения: 01.09.2026).
13. Liang Z., et al. A sludge bulking wastewater treatment plant with an oxidation ditch-denitrification filter in a cold region: bacterial community composition and antibiotic resistance genes // Environmental Science and Pollution Research. 2022. Vol. 30. No. 12. P. 33767–33779. DOI: 10.1007/s11356-022-24591-4. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-022-24591-4 (дата обращения: 01.09.2026).
14. Guo F., et al. Enhancement of denitrification in biofilters by immobilized biochar under low-temperature stress // Bioresource Technology. 2022. Vol. 347. P. 126664. DOI: 10.1016/j.biortech.2021.126664. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852421017928 (дата обращения: 01.09.2026).
15. Kruglova A., et al. Low-Temperature Adapted Nitrifying Microbial Communities of Finnish Wastewater Treatment Systems // Water. 2020. Vol. 12. No. 9. P. 2450. DOI: 10.3390/w12092450. URL: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2450 (дата обращения: 01.09.2026).

16. Ahmed W., Delatolla R. Biofilm and microbiome response of attached growth nitrification systems across incremental decreases to low temperatures // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 39. P. 101730. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101730. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420306741 (дата обращения: 01.09.2026).
17. Tian X., et al. The treatment effect and denitrification mechanism of low-temperature and low-carbon source municipal wastewater treated by micro pressure swirl reactor // Journal of Water Process Engineering. 2022. Vol. 49. P. 103027. DOI: 10.1016/j.jwpe.2022.103027. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714422004347 (дата обращения: 01.09.2026).
18. Kruglova A., et al. Low-Temperature Adapted Nitrifying Microbial Communities of Finnish Wastewater Treatment Systems // Water. 2020. Vol. 12. No. 9. P. 2450. DOI: 10.3390/w12092450. URL: https://www.mdpi.com/2073-4441/12/9/2450 (дата обращения: 01.09.2026).
19. Gonzalez-Martinez A., et al. Performance and microbial community structure of a polar Arctic Circle aerobic granular sludge system operating at low temperature // Bioresource Technology. 2018. Vol. 256. P. 22–29. DOI: 10.1016/j.biortech.2018.01.147. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852418301757 (дата обращения: 01.09.2026).
20. Xu G., et al. Enhanced physicochemical-biological sewage treatment process in cold regions // Water Science and Technology. 2014. Vol. 70. No. 9. P. 1456–1464. DOI: 10.2166/wst.2014.376. URL: https://iwaponline.com/wst/article/70/9/1456/19203 (дата обращения: 01.09.2026).
21. Rusten B., et al. Nitrogen removal in moving-bed biofilm reactor plants at low temperatures: experiences from Norway // Water Science and Technology. 2023. Vol. 87. No. 10. P. 2432–2445. DOI: 10.2166/wst.2023.132. URL: https://iwaponline.com/wst/article/87/10/2432/95423 (дата обращения: 01.09.2026).
22. Hoang V., Delatolla R., Laflamme E., et al. An investigation of moving bed biofilm reactor nitrification during long-term exposure to cold temperatures // Water Environment Research. 2014. Vol. 86. No. 1. P. 36–42. DOI: 10.2175/106143013X13807328848694. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2175/106143013X13807328848694 (дата обращения: 01.09.2026).
23. Zou J., et al. Domestic Wastewater Treatment Using Sequencing Batch Biofilm Reactor in Low Temperature // 2012 International Conference on Biomedical Engineering and Biotechnology. IEEE, 2012. P. 1357–1360. DOI: 10.1109/icbeb.2012.158. URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/6245471 (дата обращения: 01.09.2026).
24. Yun G., et al. Morphological characteristics and nutrient removal efficiency of granular PAO and DPAO SBRs operating at different temperatures // Membrane and Water Treatment. 2024. Vol. 15. No. 1. P. 1–9. URL: https://www.researchgate.net/publication/382876519 (дата обращения: 01.09.2026).
25. Yang Y.H., et al. Recovering biological nitrogen removal in pilot-scale variable-velocity oxidation ditch under low concentration // China Environmental Science. 2013. Vol. 33. No. 3. P. 436–442. EDN: РИНЦ. URL: https://elibrary.ru/item.asp?id=20335848 (дата обращения: 01.09.2026).
26. Ahmed W., Delatolla R. Microbial response of nitrifying biofilms to cold-shock // Environmental Science: Water Research & Technology. 2020. Vol. 6. No. 12. P. 3428–3439. DOI: 10.1039/d0ew00614a. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2020/ew/d0ew00614a (дата обращения: 01.09.2026).

27. Ahmed W., Delatolla R. Biofilm and microbiome response of attached growth nitrification systems across incremental decreases to low temperatures // Journal of Water Process Engineering. 2021. Vol. 39. P. 101730. DOI: 10.1016/j.jwpe.2020.101730. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714420306741 (дата обращения: 01.09.2026).
28. Пукемо М. М. Устройство для биологической очистки сточных вод: пат. RU 2743556 C1. Заявл. 03.06.2020; опубл. 19.02.2021. URL: https://patents.google.com/patent/RU2743556C1/ru (дата обращения: 01.09.2026).
29. Young B., Delatolla R., Kennedy K., et al. Low temperature MBBR nitrification: Microbiome response to cold temperature conditions // Science.gov. 2014. URL: https://www.science.gov/topicpages/l/low+temperature+mbbr (дата обращения: 01.09.2026).
30. Liao R., et al. Temperature dependence of denitrification microbial communities and functional genes in an expanded granular sludge bed reactor treating nitrate-rich wastewater // RSC Advances. 2018. Vol. 8. No. 73. P. 42087–42094. DOI: 10.1039/c8ra08256a. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ra/c8ra08256a (дата обращения: 01.09.2026).
31. Kumar P., Mehrotra I., Viraraghavan T. Biological Phosphorus Removal: Effect of Low Temperature // Journal of Cold Regions Engineering. 1996. Vol. 10. No. 2. P. 63–76. DOI: 10.1061/(asce)0887-381x(1996)10:2(63). URL: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290887-381X%281996%2910%3A2%2863%29 (дата обращения: 01.09.2026).
32. Pfluger A., et al. An anaerobic hybrid bioreactor for biologically enhanced primary treatment of domestic wastewater under low temperatures // Environmental Science: Water Research & Technology. 2018. Vol. 4. No. 11. P. 1851–1866. DOI: 10.1039/c8ew00237a. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2018/ew/c8ew00237a (дата обращения: 01.09.2026).
33. Erdal Z.K., et al. Low temperature and EBPR: A review // Proceedings of the Water Environment Federation. 2006. Vol. 2006. No. 10. P. 1002–1016. DOI: 10.2175/193864706783751843. URL: https://www.accesswater.org/?id=-118339 (дата обращения: 01.09.2026).
34. Brdjanovic D., et al. Temperature effects on physiology of biological phosphorus removal // Journal of Environmental Engineering. 1997. Vol. 123. No. 2. P. 144–153. DOI: 10.1061/(ASCE)0733-9372(1997)123:2(144). URL: https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9372%281997%29123%3A2%28144%29 (дата обращения: 01.09.2026).
35. Tandoi V., et al. Microthrix parvicella: a review // Water Science and Technology. 2011. Vol. 63. No. 10. P. 2187–2196. DOI: 10.2166/wst.2011.331. URL: https://iwaponline.com/wst/article/63/10/2187/18357 (дата обращения: 01.09.2026).
36. Rossetti S., et al. Microthrix parvicella, a filamentous bacterium causing bulking and foaming in activated sludge systems: a review of current knowledge // FEMS Microbiology Reviews. 2005. Vol. 29. No. 1. P. 49–64. DOI: 10.1016/j.femsre.2004.09.005. URL: https://academic.oup.com/femsre/article/29/1/49/2595693 (дата обращения: 01.09.2026).
37. Takahashi M., et al. Performance of a pilot-scale sewage treatment: An up-flow anaerobic sludge blanket (UASB) and a down-flow hanging sponge (DHS) reactors combined system by sulfur-redox reaction process under low-temperature conditions // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. No. 2. P. 753–757. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.08.081. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410014651 (дата обращения: 01.09.2026).

38. Petropoulos E., et al. Sewage treatment at 4 °C in anaerobic upflow reactors with and without a membrane — performance, function and microbial diversity // Environmental Science: Water Research & Technology. 2021. Vol. 7. P. 1566–1582. DOI: 10.1039/d0ew00753f. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2021/ew/d0ew00753f (дата обращения: 01.09.2026).

39. Khanh D., et al. Effect of temperature on low-strength wastewater treatment by UASB reactor using poly(vinyl alcohol)-gel carrier // Bioresource Technology. 2011. Vol. 102. No. 24. P. 11147–11154. DOI: 10.1016/j.biortech.2011.09.108. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S096085241101489X (дата обращения: 01.09.2026).

40. Stazi V., Annesini M.C., Tomei M.C. Anaerobic domestic wastewater treatment in a sequencing granular UASB bioreactor: Feasibility study of the temperature effect on the process performance // Journal of Environmental Chemical Engineering. 2022. Vol. 10. No. 5. Art. 108512. DOI: 10.1016/j.jece.2022.108512. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213343722013578 (дата обращения: 01.09.2026).

41. Guo J., et al. Application of bioaugmentation in the rapid start-up and stable operation of biological processes for municipal wastewater treatment at low temperatures // Bioresource Technology. 2010. Vol. 101. No. 17. P. 6622–6629. DOI: 10.1016/j.biortech.2010.03.093. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852410005624 (дата обращения: 01.09.2026).

42. Kowalski M.S., et al. Controlling cold temperature partial nitritation in moving bed biofilm reactor // Chemosphere. 2019. Vol. 227. P. 216–224. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.04.025. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653519305454 (дата обращения: 01.09.2026).

43. Naz I., et al. Effect of the chemical composition of filter media on the microbial community in wastewater biofilms at different temperatures // RSC Advances. 2016. Vol. 6. No. 106. P. 104345–104353. DOI: 10.1039/c6ra21040f. URL: https://pubs.rsc.org/en/content/articlelanding/2016/ra/c6ra21040f (дата обращения: 01.09.2026).

Gogina Elena Sergeevna
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia
E-mail: Gogina-es@yandex.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0003-4893-8922
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=298730
WoS: https://www.webofscience.com/wos/author/rid/P-7887-2015
SCOPUS: https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=55841908100

Kadyseva Anastasiya Alexandrovna
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Sergo Ordzhonikidze Russian State University for Geological Prospecting, Moscow, Russia
E-mail: kadyseva@mail.ru
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-8703-5684
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=698088

Pukemo Mikhail Mikhailovich
Research Institute of Building Physics of the Russian Academy of Architecture and Building Sciences, Moscow, Russia
Alta Group Company, Moscow, Russia
E-mail: 2336122@alta-group.ru
RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=890851

Limitations of conventional biological wastewater treatment technologies at low temperatures

Abstract. The article presents a systematic literature review for the period 1994–2025, focusing on the limitations of conventional biological wastewater treatment technologies at low temperatures (< 15°C). The authors examine three levels of temperature impact: physiological-biochemical, kinetic, and technological. At the physiological-biochemical level, the molecular mechanisms of microbial community inhibition are analyzed, including changes in membrane lipid composition, reduced enzyme activity, and impaired gene expression. The paper demonstrates that nitrification is the most sensitive process: at 12°C, its rate decreases by 50 %; in suspended systems, it virtually stops at 5°C; and a sharp drop in temperature from 20 to 10°C leads to a 58 % reduction in rate. The authors establish that denitrification at 3°C reaches only 55 % of the rate observed at 15°C. Biological phosphorus removal at 10°C requires an increase in SRT from 2,5 to 4,5 days, while EBPR efficiency drops to 73 %. The article addresses the deterioration of sludge sedimentation properties: a temperature decrease from 10 to 4°C doubles the required settling time; in cold climates, filamentous bulking develops, dominated by norank_f_Saprospiraceae (10,24 %) and Candidatus Microthrix (8,40 %). The authors analyze the limitation of anaerobic processes: at 7°C, methanogenic activity is suppressed, although sulfate reducers remain active. The paper reviews conventional compensation strategies (increasing HRT, SRT, DO) and highlights their energy and economic constraints. The authors conclude that alternative approaches to low-temperature biological treatment need to be explored.

Keywords: low temperatures; activated sludge; nitrification; denitrification; biological phosphorus removal; sludge filamentous bulking; sedimentation properties; anaerobic treatment; conventional technologies