

УДК 504.054

## ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ *CHLORELLA* ДЛЯ СНИЖЕНИЯ АНТРОПОГЕННОЙ НАГРУЗКИ ГОРНОГО ПРОИЗВОДСТВА НА ОЗЕРНО-РЕЧНУЮ СИСТЕМУ КАРЕЛИИ

Г. А. Щеглов

Институт проблем промышленной экологии Севера  
Федерального исследовательского центра Кольский научный центр РАН  
(Академгородок, 14а, Апатиты, Россия, 184209)

Неорганические соединения азота в сточных водах представляют собой серьезную проблему для водных экосистем и различных промышленных предприятий, включая горнодобывающие. Эти соединения могут попадать в сточные воды карьеров при использовании взрывчатых веществ, содержащих нитрат аммония, что приводит к нанесению ущерба окружающей среде, загрязнению водоемов, заболеваниям людей и штрафам для компаний, превышающих установленные законом пределы загрязнения. Биологические методы широко используются для удаления азота из сточных вод, но их эффективность ограничена в северных регионах России из-за неблагоприятных климатических условий, препятствующих росту организмов. Поэтому крайне важно разработать новые технологии удаления соединений азота из сточных вод. В статье представлено исследование способности водоросли рода *Chlorella*, выращенной на безазотной среде, утилизировать при различных температурных условиях соединения азота из сточных вод горнодобывающих производств на примере карьерных вод предприятия АО «Карельский окатыш». Для проведения экспериментов была подготовлена специальная среда культивирования без азота, на которой выращивалась водоросль перед посевом. Концентрация биомассы водоросли оценивалась колориметрическим методом, концентрация аммония и нитритов в воде определялась ионоселективным методом. В условиях эксперимента благодаря подготовке водоросли на новой среде достигнуто успешное культивирование водоросли на сточных водах, 94% удаление аммония и 96% удаление нитратов из сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности разработки технологии очистки сточных вод от неорганического азота с помощью микроводорослей рода *Chlorella*.

Ключевые слова: азотсодержащие соединения; нитраты; аммоний; биологическая очистка; микроводоросли; биотехнологии; водные ресурсы

Для цитирования: Щеглов Г. А. Возможность использования *Chlorella* для снижения антропогенной нагрузки горного производства на озерно-речную систему Карелии // Труды Карельского научного центра РАН. 2023. № 6. С. 107–116. doi: 10.17076/lim1789

Финансирование. Исследование выполнено в рамках темы НИР FMEZ-2022-0010 122022400112-7 «Процессы трансформации природных и техногенных систем в условиях изменения климата в Арктической зоне Российской Федерации (на примере Мурманской области)».

## G. A. Shcheglov. THE POSSIBILITY OF USING *CHLORELLA* ALGAE TO REDUCE THE MINING INDUSTRY LOAD ON A KARELIAN LAKE-RIVER SYSTEM

*Institute of North Industrial Ecology Problems, Kola Science Centre, Russian Academy of Sciences (14a Akademgorodok, 184209 Apatity, Murmansk Region, Russia)*

Inorganic nitrogen compounds in wastewater are a serious problem for aquatic ecosystems and various industries, including mining. These compounds can enter the wastewater of quarries when explosives containing ammonium nitrate are used, resulting in environmental damage, water pollution, human illnesses and fines for companies that exceed binding pollution limits. Biological methods are widely used to remove nitrogen from wastewater, but their efficacy in northern regions of Russia is limited by unfavorable climatic conditions, which inhibit the growth of organisms. Therefore, it is crucial to develop new techniques to remove nitrogen compounds from wastewater. The aim of this study was to investigate the ability of *Chlorella* algae grown on nitrogen-free medium to recycle nitrogen compounds from mining wastewater, using Karelsky Okatysh JSC open pit water as an example. A special nitrogen-free culture medium was prepared for the experiments, on which the algae were grown before inoculation. The concentration of algal biomass was estimated by the colorimetric method, and the concentration of ammonium and nitrite in the water was estimated by the ion-selective method. As a result, a special algae culture medium without nitrogen sources was tested. Due to such conditioning of algae on the new medium the cultivation of algae in wastewater in the experiment was successful, providing 94% removal of ammonium and 96% removal of nitrates from wastewater. These results indicate the development of a technology for wastewater treatment to remove inorganic nitrogen using microalgae of the genus *Chlorella* has good prospects.

**Keywords:** nitrogen compounds; nitrates; ammonium; biological treatment; microalgae; biotechnology; water resources

For citation: Shcheglov G. A. The possibility of using *Chlorella* algae to reduce the mining industry load on a Karelian lake-river system. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2023. No. 6. P. 107–116. doi: 10.17076/lim1789

Funding. The research was carried out within the research theme FMEZ-2022-0010 122022400112-7 "Transformation of natural and anthropogenic systems under climate change in the Arctic zone of the Russian Federation (case study of the Murmansk Region)".

### Введение

Водные ресурсы играют ключевую роль в поддержании жизни человека и экосистем. Они необходимы для питьевого водоснабжения, сельского хозяйства и промышленности. Загрязнение водных ресурсов является глобальной проблемой. Распространенными загрязнителями являются азотсодержащие соединения – аммиак, нитраты и нитриты. Они могут поступать в воду из различных источников, таких как промышленные стоки, сельскохозяйственные удобрения и канализационные системы. Это приводит к ухудшению качества воды и оказывает негативное влияние на водные биоресурсы и здоровье людей [Солнышкова, 2020]. Разработка систем очистки сточных вод от соединений азота имеет потенциал улучшить качество водных ресурсов и сделать их доступнее для использования в различных сферах. Это будет способствовать устойчивому развитию, улучшению экологической

ситуации и созданию более безопасной и здоровой окружающей среды для людей и животных [Иванова и др., 2021].

Одной из проблем является загрязнение сточных вод неорганическими соединениями азота на горнопромышленных предприятиях. Биогенный азот попадает в экосистемы как результат жизнедеятельности организмов и может быть поглощен растениями в процессе их роста и развития. Неорганический азот в отличие от биогенного образуется при неполном разложении взрывчатых веществ при взрывных работах на горных производствах. В соответствии с этим для применения биологических методов очистки необходимо подобрать такие организмы, которые будут справляться не только с биогенным, но и с неорганическим азотом. Еще одной особенностью горнопромышленных предприятий являются объемы водосброса, которые в разы превышают объемы водосброса мелких предприятий и коммунальных хозяйств.

С загрязнением вод азотом можно эффективно бороться биологическими методами. Наиболее распространенными из них являются:

1) «Искусственные болота» с сообществами микроорганизмов, сосудистых растений, поглощающих азот [Савичев, 2008; Солнышкова, Пашкевич, 2018; Иванова и др., 2021]. При этом у метода имеются свои недостатки: низкая эффективность в северном климате, вторичное загрязнение от отмерших частей растений, необходимость индивидуального подбора растений под конкретное производство.

2) «Активный ил» – сообщества микроорганизмов, преобразующие азот в процессе нитрификации и денитрификации [Мешенгиссер и др., 2006; Зубов и др., 2013; Дубовик, Маркевич, 2016]. Недостатками метода являются затраты на строительство биореакторов и эксплуатационные расходы, узкий температурный диапазон рабочих условий, необходимость утилизации избыточного активного ила.

3) Микроводоросли, поглощающие азот в прудах-отстойниках либо биореакторах. Так, в работе [Кирилина, 2013] установлена высокая эффективность удаления азота при совместном использовании микроводорослей и активного ила.

Микроводоросли, такие как водоросли рода *Chlorella*, *Scenedesmus* и другие, могут эффективно удалять азотистые соединения из сточных вод. Рядом исследований установлена принципиальная возможность использования рода *Chlorella* для очистки сточных вод от соединений азота [Bich et al., 1999; Widjaja et al., 2009; Wang et al., 2010, 2013; Chen et al., 2023].

Еще одним преимуществом микроводорослей является возможность их применения в различных целях. Например, микроводоросли как продуцент липидов могут использоваться для получения биотоплива [Widjaja et al., 2009], и это решает вопрос с последующей утилизацией образующейся биомассы водоросли и переходом на безотходное производство.

В ряде исследований установлена способность различных видов рода *Chlorella* поглощать соединения азота из воды [Кирилина, 2013; Солнышкова, 2020]. Согласно результатам исследования [Кирилина, 2013], при совместном применении водоросли рода *Chlorella* и сообществ активного ила эффективность очистки сточных вод от азота может достигать 100 %.

В перечисленных выше исследованиях шла речь об удалении биологического азота. Не менее важной задачей является удаление неорганического азота из сточных вод, в частности при горнодобыче. М. А. Солнышковой [2020] установлена возможность утилизиро-

вать аммонийный азот из стоков предприятий горнодобывающего комплекса даже в условиях низких температур путем подбора холодоустойчивых штаммов и разработки специальных сред культивирования. Однако при наличии результатов по успешному удалению азота из сточных вод на сегодняшний день не существует технологии их биологической очистки от соединений азота при низких температурах воды в условиях северного климата.

Таким образом, исследование потенциала водоросли хлореллы для снижения концентрации азотсодержащих соединений в воде является актуальным и может использоваться при разработке эффективных и устойчивых решений для контроля загрязнения водных ресурсов. В частности, для очистки техногенных вод предприятий горнопромышленного комплекса от азотсодержащих соединений и снижения антропогенной нагрузки предприятий на озерно-речные системы.

Цель исследования заключается в изучении способности водоросли *Chlorella* sp., выращенной на безазотной среде, утилизировать соединения неорганического азота из сточных вод горнодобывающих производств в различных температурных условиях.

## Материалы и методы

**Место отбора проб.** Исследование проводилось на образцах воды, взятых с предприятия АО «Карельский окатыш», расположенного в городе Костомукша, Республика Карелия, на Северо-Западе России. Данное предприятие занимается добычей и переработкой железной руды, и доля его продукции составляет 20 % от всех железорудных окатышей в России. Предприятие оказывает техногенное воздействие на озерно-речные системы Карелии. Так, в качестве хвостохранилища и для оборотного водоснабжения комбината используется оз. Костомукшское, из которого с 1994 г. осуществляется регулируемый сброс воды в систему р. Кенти. Деятельность ГОКа привела к изменению химического состава воды в озерно-речной системе. Произошло увеличение концентрации  $\text{NO}_3^-$ , а также  $\text{K}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , Li, Ni [Лозовик, Галахина, 2017]. Азот в воде не выпадает в осадок, его невозможно удалить химическими и физическими методами. Для очистки азота применяются биологические методы, однако их использование в климатических условиях Карелии затруднено. Кроме того, азот, попадающий в сточные воды ГОКа, – неорганического происхождения, образуется при неполном разложении нитрат-аммония при взрывных работах.

На производстве нет эффективной системы очистки техногенных сточных вод от азотсодержащих соединений, поэтому требуется разработка технологий очистки сточных вод от неорганического азота.

Для исследования были отобраны образцы воды из отстойника карьера. Пробы отбирались после отстаивания взвеси в воде. Исходная концентрация аммония в пробах воды составляла 227 мг/л.

**Подготовка маточной культуры.** Исследование способности микроводорослей к снижению концентрации азота в воде проводилось с использованием одноклеточной зеленой водоросли *Chlorella vulgaris* (Beijer, 1890). Для экспериментов была подготовлена специальная маточная культура микроводорослей, выращенная на 50% среде Тамия без источников азота в течение 7 дней. Из навесок элементов было подготовлено 5 растворов объемом 100 мл (табл. 1), которые смешивались в мерной колбе согласно пропорциям, указанным в таблице 1. Полученный раствор доводился дистиллированной водой до объема 1 дм<sup>3</sup>.

При проведении эксперимента в пробы воды объемом 200 мл добавлялось 10 мл маточной культуры микроводоросли. Внесение суспензии микроводоросли производилось непосредственно перед началом эксперимента после разбавления и подготовки проб воды. Все пробы находились в колбах с узким горлышком, которые закрывались алюминиевой фольгой в ходе эксперимента.

**Методика определения концентрации биомассы.** Концентрация биомассы микроводоросли определялась колориметрическим методом. Измерения оптической плотности проводились на колориметре модели КФК-2 с кюветой шириной 10 мм. Предварительно с использованием спектрофотометрического метода по ГОСТ 17.1.4.02-90 определялась

концентрация биомассы водоросли. На основе значений концентраций и оптических плотностей проб при длине волны 540 нм строился калибровочный график, по которому определялась концентрация биомассы микроводоросли. Уравнение калибровочного графика было следующим:

$$y = 0,4628x + 0,001; R^2 = 0,9999,$$

где  $y$  – оптическая плотность пробы в кювете 10 мм при длине волны 540 нм,  $x$  – концентрация биомассы водоросли в пробе,  $R^2$  – коэффициент детерминации.

#### Метод определения концентрации азота.

Для определения концентрации аммония и нитратов в воде применялись ионселективные методы с использованием иономера Мультитест ИПЛ-112 и электрода сравнения ЭСр-10103/3.0. Концентрация аммония определялась по методике РД 52.24.394-95 с помощью электрода ЭЛИТ-051. Концентрация нитратов определялась по методике РД 52.24.367-95 с использованием электрода ЭЛИТ-021. Перед началом серии экспериментов электрод был откалиброван.

**Ход и условия эксперимента.** Эксперименты проводились с двумя вариантами проб воды:

X – пробы воды, отобранные на отстойнике карьера предприятия;

X/2 – пробы той же воды, разбавленные дистиллированной водой в пропорции 50/50.

Оба варианта концентрации дублировались для четырех вариантов условий культивирования. Таким образом, проведено 8 вариантов эксперимента с различными условиями культивирования и концентрацией загрязняющих веществ, все пробы были пронумерованы от 1 до 8 (табл. 2).

Таблица 1. Состав среды культивирования

Table 1. Composition of the cultivation medium

№ п/п No.	Компонент Component	Навеска, г/100 мл Suspension, g/100 ml	V раствора на 1 дм <sup>3</sup> среды, мл V solution per 1 dm <sup>3</sup> of medium, ml
1	MgSO <sub>4</sub> *7H <sub>2</sub> O	5	25
2	KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	2,5	25
3	FeSO <sub>4</sub> *7H <sub>2</sub> O	0,3	1
4	Раствор А/ Solution A: - H <sub>2</sub> BO <sub>3</sub> - MnCl <sub>2</sub> *4H <sub>2</sub> O - ZnSO <sub>4</sub> *5H <sub>2</sub> O	0,286 0,181 0,0222	1
5	Раствор Б/ Solution Б: - MoO <sub>3</sub>	0,0018	1

Таблица. 2. Нумерация проб воды в соответствии с условиями эксперимента

Table 2. Numbering of the water samples according to the experimental conditions

Т °С	Степень разбавления Dilution level	
	X/2	X
1	1	5
7	2	6
17	3	7
26	4	8

В эксперименте проведено культивирование водорослей *C. vulgaris* при разных температурных условиях. Варианты экспериментов включали следующие условия:

1. Температура 1 °С (пробы 1 и 5) и 7 °С (пробы 2 и 6). В пробах воссоздавались экстремальные для вида условия. Пробы находились в холодильниках с заданной температурой без освещения и подачи воздуха. Цель состояла в выявлении способности водоросли выживать и поглощать азот при неблагоприятных условиях.

2. Комнатная температура (17 °С) с естественным освещением (пробы 3 и 7). В этих пробах водоросли выращивались при естественном освещении без аэрации при комнатной температуре. Такие условия использовались для сравнения результатов с работами других исследователей и для простоты воспроизведения.

3. Температура 26 °С с постоянным освещением и подачей воздуха (пробы 4 и 8). Водоросли культивировались при оптимальных для роста условиях, которые можно поддерживать в промышленных биореакторах. Пробы были освещены и подогревались с помощью светодиодной лампы LED-1088 Aquarium light, контроль температуры осуществлялся с помощью ртутного градусника, погруженного в пробу. Аэрация осуществлялась с помощью компрессора M-102 через пластиковые трубки со скоростью 2,5 л/мин.

Продолжительность экспериментов составила 15 суток. В течение всего периода ежедневно измерялись концентрация аммония, нитратов и биомасса водоросли. Все эксперименты были запущены в одно и то же время и проводились параллельно в одной повторности.

**Статистическая обработка данных** осуществлялась с применением стандартных алгоритмов анализа, включенных в пакет в MS Excel.

## Результаты и обсуждение

Результаты измерения концентрации биомассы водоросли *C. vulgaris* представлены на рис. 1 и 2.

В условиях азотного голодания у водорослей *C. vulgaris* наблюдается низкое содержание хлорофилла, что приводит к отсутствию

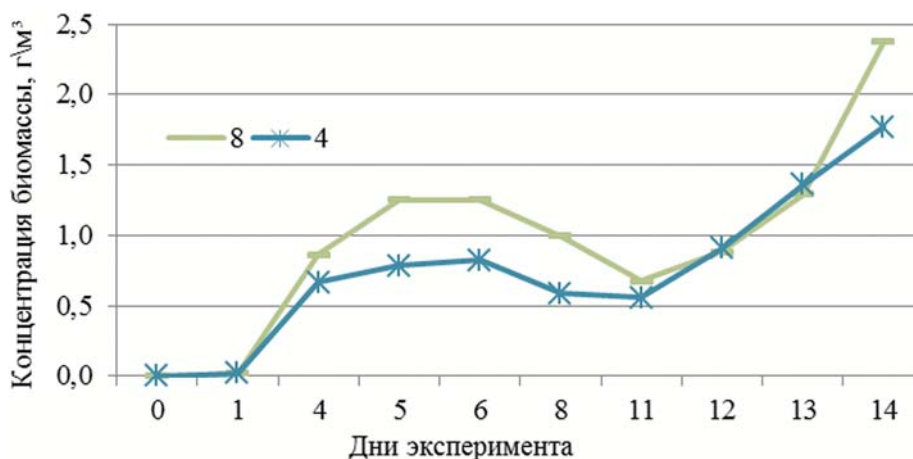


Рис. 1. Концентрация *C. vulgaris*, выращенной при азотном голодании после культивирования на сточных водах в оптимальных условиях.

Здесь и далее описание условий эксперимента для проб 8 и 4 см. в тексте

Fig. 1. Concentration of *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation after culturing on waste water under optimum conditions.

Here and in Fig. 3, 4: Sample 8 – pit latrine water; Sample 4 – pit latrine water diluted 2-fold with distilled water; both samples were cultured at 26 °С with constant light and aeration



зеленой окраски в клетках. Эта особенность повлияла на оценку концентрации биомассы в начальный момент эксперимента (0-й день). В связи с этим для получения точной оценки концентрации биомассы водорослей в пробах воды было принято во внимание, что верная оценка становится возможной после 1-го дня эксперимента, когда водоросль начинает восстанавливать свою зеленую окраску и продолжает наращивать биомассу.

Результаты, представленные на рис. 2, показывают увеличение биомассы во всех пробах. Средняя концентрация биомассы после первого дня культивирования составила  $0,013 \pm 0,004$  г/м<sup>3</sup>, к 14-му дню эксперимента среднее значение увеличилось до  $0,2 \pm 0,01$  г/м<sup>3</sup>, прирост составил 53,8 %, что свидетельствует о жизнеспособности водоросли *C. vulgaris* в диапазоне температур от 1 до 17 °C без интенсивного наращивания биомассы. Кроме того, конечная концентрация биомассы оказалась выше в пробах с более высокой температурой. Таким образом, можно сделать вывод, что повышение температуры способствует увеличению конечной концентрации биомассы водоросли.

Отмечается, что не обнаружена зависимость скорости роста биомассы от концентрации

загрязнения. Например, при температурах 1 и 17 °C конечная концентрация биомассы микроводоросли оказалась выше в неразбавленных образцах воды, в то время как при температурах 7 и 26 °C биомасса оказалась выше в разбавленных пробах воды. Это может указывать на то, что влияние загрязнения на рост биомассы микроводоросли зависит от температуры и проявляется по-разному.

Результаты измерения концентрации аммония и нитратов в сточных водах представлены на рис. 3 и 4.

Из данных на рис. 3 видно, что при всех вариантах эксперимента наблюдается статистически значимое снижение концентрации аммония в пробах воды. Интенсивное снижение концентрации аммония происходит в первые 4 дня эксперимента, после чего концентрация выходит на плато и остается практически неизменной.

При температуре 1, 7 и 17 °C концентрация аммония не зависела от температуры. В пробах 1, 2 и 3 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л она снижается до 6 мг/л после четырех дней эксперимента и остается на этом уровне до конца эксперимента. В пробах 5, 6 и 7 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л также наблюдается значимое снижение концен-

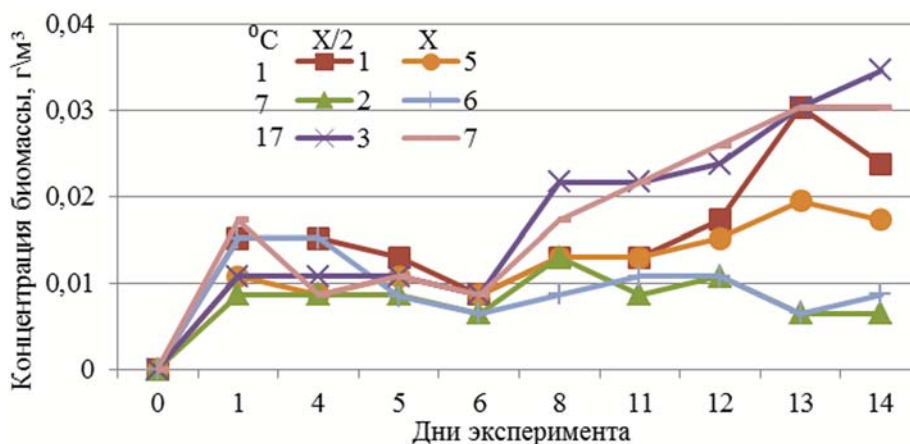


Рис. 2. Концентрация биомассы *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании после культивирования на сточных водах при различных температурных режимах.

Здесь и далее описание условий эксперимента для проб 1–3 и 5–7 см. в тексте

Fig. 2. Concentration of *C. vulgaris* biomass grown under nitrogen starvation after culturing on waste water at different temperature regimes.

Here and in Fig. 3, 4 chlorella culture samples: at a constant temperature of 17 °C, without aeration and variable illumination: 7 – samples of pit latrine water; 3 – samples of pit latrine water diluted 2-fold; chlorella culture samples at a constant temperature of 7 °C, without aeration and illumination: 6 – pit latrine water; 2 – samples of pit latrine water diluted 2-fold; chlorella culture samples at a constant temperature of 1 °C, without aeration and illumination: 5 – pit latrine water; 1 – samples of pit latrine water diluted 2-fold

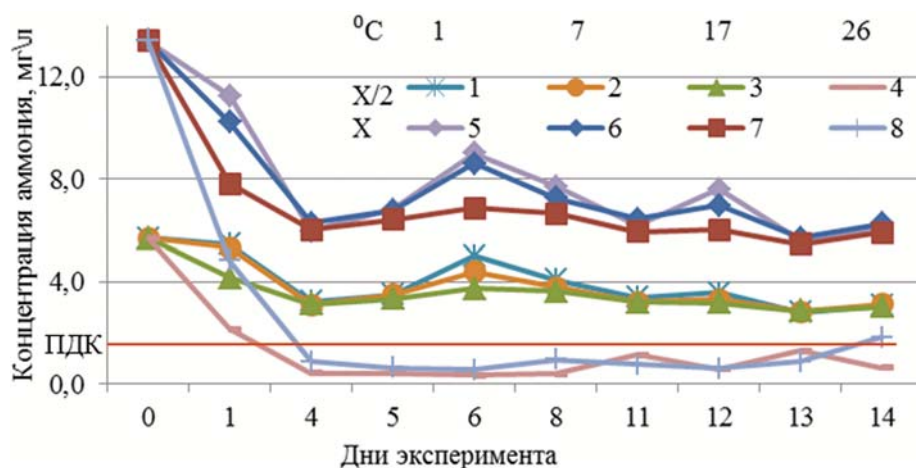


Рис. 3. Концентрация аммония в образцах воды при культивировании *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании

Fig. 3. Ammonium concentration in water samples during culturing *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation

трации в первые четыре дня, после чего концентрация составляет около 3,1 мг/л и остается стабильной с незначительными колебаниями.

Более эффективное удаление аммония в воде наблюдается в пробах 4 и 8, которые культивировались при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. В пробе 4 с исходной концентрацией аммония 5,7 мг/л она снижается до 0,4 мг/л после четырех дней эксперимента. В пробе 8 с исходной концентрацией аммония 13,4 мг/л наблюдается ее уменьшение до 0,9 мг/л. В обоих случаях содержание ионов аммония остается на стабильном уровне

с отклонением, не превышающим  $\pm 0,9$  мг/л. Полученные концентрации аммония были ниже предельно допустимой концентрации (ПДК) по аммонии. Таким образом, в пробах 4 и 8 удалось снизить концентрацию аммония на 93 % за четыре дня эксперимента.

Из данных на рис. 4 следует, что во всех пробах зафиксировано снижение концентрации нитратов. Однако при культивировании при температурах 1, 7 и 17 °С утилизация азота была незначительной и неэффективной для очистки воды, независимо от исходной концентрации нитратов.

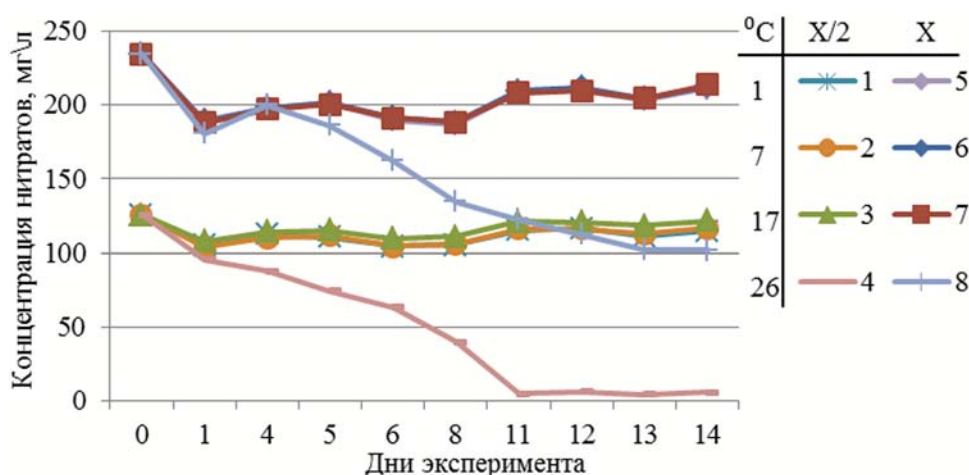


Рис. 4. Концентрация нитратов в образцах воды при культивировании *C. vulgaris*, выращенной на азотном голодании

Fig. 4. Nitrate concentration in water samples during culturing *C. vulgaris* grown under nitrogen starvation

Другая ситуация наблюдалась при культивировании при температуре 26 °С. В пробе 4 с исходным количеством нитратов 125,5 мг/л уровень ПДК был достигнут через 8 дней эксперимента. Затем содержание нитратов продолжало снижаться и к 11-му дню было на уровне  $5 \pm 1,5$  мг/л. В пробе 8 с исходным содержанием нитратов 234,5 мг/л концентрация снизилась до 122,5 мг/л к 11-му дню эксперимента. В 14-й день эксперимента количество нитратов в пробе 8 снижалось до 101,5 мг/л.

В процентном соотношении из пробы 4 с исходной концентрацией 125,5 мг/л удалено 68 % нитратов за 8 дней и 96 % за 11 дней эксперимента. Из пробы 8 с исходным содержанием 234,5 мг/л удалено 48 % нитратов за 8 дней и 57 % за 14 дней эксперимента.

Предполагается, что при исходной концентрации нитратов в 234,5 мг/л достижение уровня ПДК должно наступить на 19-й день. Однако необходимо проверить данное предположение, так как при длительном культивировании может произойти насыщение водорослей азотом или достижение критической отметки биомассы водоросли, которое приведет к остановке снижения концентрации нитратов или даже к ее увеличению за счет вторичного загрязнения.

В предыдущих исследованиях способности водорослей к поглощению соединений азота из сточных вод [Щеглов, 2023] отмечено снижение концентрации аммония на 84–87 % за 3 дня при культивировании в температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Однако существенного снижения при температурах 7 и 17 °С без аэрации и освещения не наблюдалось. Результаты текущего исследования показывают, что утилизация аммония водорослями при азотном голодании оказалась более эффективной и составила 93 % за 4 дня при температуре 26 °С с аэрацией и освещением. Кроме того, удалось достичь утилизации аммония с эффективностью 45–55 % при различных температурных режимах от 1 до 17 °С, что не было достигнуто при культивировании водорослей на среде Тамия.

Для дальнейших исследований следует изучить зависимость эффективности утилизации азотных соединений в сточных водах от объема вносимой культуры водорослей и определить оптимальный объем для различных концентраций загрязнителей. Это позволит повысить эффективность и ускорить процесс поглощения нитратов в воде.

Кроме того, благодаря выращиванию водорослей на безазотной среде удалось добиться степени утилизации нитратов от 48 % за 8 дней

до 96 % на 11-й день. В то время как результаты работы [Щеглов, 2023] показали, что хлорелла, выращенная на среде Тамия, не поглощает нитраты в значительной степени.

На основе проведенного сравнения можно сделать вывод, что выращивание хлореллы на среде без источников азота увеличивает ее эффективность в утилизации азотных соединений и расширяет диапазон температур, при которых наблюдается снижение концентрации не только аммония, но и нитратов. Однако следует проверить, какое влияние на эффективность очистки оказывает наличие азотных соединений, которые попадают в очищаемую воду при внесении суспензии, выращенной на среде Тамия. Существует вероятность, что повышение эффективности очистки суспензией водоросли, выращенной на азотном голодании, связано с тем, что такая суспензия не загрязняет воду азотом, содержащимся в классической среде Тамия. Для проверки этой гипотезы необходимо провести эксперименты по очистке воды не с помощью суспензии, а с использованием отделенной от среды биомассы водоросли. Отделение водоросли от среды можно достичь путем центрифугирования или высушивания.

В работе М. А. Солнышковой [2020] описана возможность использования *Chlorella kislari* (ВКПМ АИ-11 АРВ 2015) для утилизации аммония из сточных вод горнодобывающего предприятия в Мурманской области. Согласно результатам этой работы, при температуре воды 3 °С наблюдалось снижение концентрации нитратов с 200 до 45 мг/л за 8 дней, а при температуре 19 °С – за 7 дней. В наших же результатах статистически значимого снижения концентрации нитратов при температуре 19 °С не отмечалось, в то время как при оптимальной для *C. vulgaris* температуре 26 °С концентрация нитратов снизилась с 125,5 мг/л до значения ПДК 40 мг/л за 8 дней, а за 11 дней – до 5 мг/л. В материалах М. А. Солнышковой [2020] показана более высокая, чем в нашей работе, эффективность очистки воды от нитратов в более широком диапазоне температур. Эти результаты обусловлены выбором холодоустойчивого вида водоросли *C. kislari*. Однако автором не представлены данные по изменению концентрации аммонийной формы азота, которая существенно снижалась при культивировании при 26 °С согласно оригинальным результатам. Поэтому необходимо повторить проведенные эксперименты с культурой, адаптированной к различным температурным условиям.



## Заключение

В условиях 14-суточного эксперимента изучена способность культуры микроводоросли *C. vulgaris*, выращенной в условиях азотного голодания, наращивать биомассу, поглощая азот из карьерных вод предприятий горнопромышленного комплекса в различных температурных условиях. Установлено, что хлорелла, выращенная на среде Тамия без источников азота, успешно наращивает биомассу при постоянной температуре 26 °С, аэрации и освещении, а также снижает концентрацию нитратов в воде с эффективностью до 96 % за 11 дней. Эффективность очистки вод от ионов аммония в аналогичных условиях составила 93 % за 4 дня. При температуре 1, 7 и 17 °С без аэрации и с естественным освещением наблюдался неинтенсивный рост культуры, отсутствие поглощения нитратов, а также менее эффективное снижение концентрации аммония, чем при 26 °С.

Полученные результаты демонстрируют увеличение эффективности удаления азота из сточных вод при подготовке водоросли азотным голоданием и возможность применения подобной культуры для очистки сточных вод в регионах с благоприятным для водоросли климатом. В регионах с суровым климатом хлорелла, выращенная в условиях азотного голодания, способна снижать концентрацию аммония в естественных условиях и может быть использована для разработки систем биологической очистки сточных вод в биореакторах, поддерживающих необходимые для водоросли условия.

В будущих исследованиях необходимо выяснить оптимальный расход культуры для наиболее эффективной утилизации азота при различной степени загрязненности воды. Для этого следует сравнить степень очистки при добавлении различного объема культуры. Также необходимо продолжить изучение роли среды культивирования водоросли в утилизации азота, а именно провести эксперименты, в которых будет исключен вклад среды в изменение концентрации исследуемых соединений. Для этого целесообразно вносить при посеве концентрат суспензии после центрифугирования или после высушивания.

Перспективным является изучение способности микроводоросли *C. vulgaris* не только утилизировать азот, но и поглощать фосфор и тяжелые металлы из сточных вод. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности широкого использования микроводоросли *C. vulgaris* для снижения содержания аммонийного азота в сточных водах предприятий горнопромышленного комплекса.

## Литература

Дубовик О. С., Маркевич Р. М. Совершенствование биотехнологий удаления азота и фосфора из городских сточных вод // Труды БГТУ. Серия 2: Химические технологии, биотехнология, геоэкология. 2016. № 4. 186 с.

Зубов М. Г., Бояренев С. Ф., Зубов Г. М., Куликов Н. И., Шрамов Ю. М., Литти Ю. В., Некрасова В. К., Ножевникова А. Н. Биотехнология очистки сточных вод с иммобилизацией активного ила и удалением азота // Водоснабжение и санитарная техника. 2013. № 8. С. 72–75.

Иванова Л. А., Мязин В. А., Корнейкова М. В., Фокина Н. В., Евдокимова Г. А., Редькина В. В. Пора очищать Арктику. Создание фитоочистной системы для доочистки сточных вод горнорудных предприятий от соединений азота. Апатиты: КНЦ РАН, 2021. 88 с. doi: 10.37614/978.5.91137.449.5

Кирилина Т. В. Оценка эффективности доочистки сточных вод с использованием одноклеточных и многоклеточных гидробионтов // Вестник Казанского технологического университета. 2013. № 8(16). С. 200–203.

Лозовик П. А., Галахина Н. Е. Изменение химического состава воды системы р. Кенти в результате техногенного влияния // Труды Карельского научного центра РАН. 2017. № 3. С. 21–35. doi: 10.17076/lim309

Мешенгиссер Ю. М., Щетинин А. И., Есин М. А. Удаление азота и фосфора активным илом // Коммунальное хозяйство городов. 2006. № 74. С. 36–45.

Савичев О. Г. Биологическая очистка сточных вод с использованием болотных биогеоценозов // Известия Томского политехнического университета. 2008. Т. 312, № 1. С. 69–74.

Солнышкова М. А. Снижение загрязнения поверхностных вод неорганическими соединениями азота в зоне воздействия горнодобывающих предприятий Мурманской области: Автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб., 2020. 133 с.

Солнышкова М. А., Пашкевич М. А. Исследование эффективности биологической очистки воды от нитратов с помощью биоплато // Естественные и технические науки. 2018. № 5(119). С. 169–173.

Щеглов Г. А. Изменение концентраций неорганических соединений азота в сточных водах горнодобывающего предприятия микроводорослью *Chlorella vulgaris*. Вестник МГТУ. 2023. Т. 26, № 2. С. 191–199. doi: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199

Bich N. N., Yaziz M. I., Bakti N. A. K. Combination of *Chlorella vulgaris* and *Eichhornia crassipes* for wastewater nitrogen removal // Water Res. 1999. Vol. 33(10). P. 2357–2362. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00439-4

Chen W., Liu J., Chu G., Wang Q., Zhang Yu., Gao Ch., Gao M. Comparative evaluation of four *Chlorella* species treating mariculture wastewater under different photoperiods: Nitrogen removal performance, enzyme activity, and antioxidant response // Bioresour. Technol. 2023. Vol. 386. Art. 129511. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129511

Wang C., Yu X., Lv H., Yang J. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater by the green

alga *Chlorella* sp. // J. Environ. Biol. 2013. Vol. 34(2). P. 421–425.

Wang L., Min M., Li Y., Chen P., Chen Y., Liu Yu., Wang Y., Ruan R. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant // Appl. Biochem. Biotechnol. 2010. Vol. 162. P. 1174–1186. doi: 10.1007/s12010-009-8866-7

Widjaja A., Chien C. C., Ju Y. H. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris* // J. Taiwan Inst. Chem. Eng. 2009. Vol. 40(1). P. 13–20. doi: 10.1016/j.jtice.2008.07.007

## References

Bich N. N., Yaziz M. I., Bakti N. A. K. Combination of *Chlorella vulgaris* and *Eichhornia crassipes* for wastewater nitrogen removal. *Water Res.* 1999;33(10):2357–2362. doi: 10.1016/S0043-1354(98)00439-4

Chen W., Liu J., Chu G., Wang Q., Zhang Yu., Gao Ch., Gao M. Comparative evaluation of four *Chlorella* species treating mariculture wastewater under different photoperiods: Nitrogen removal performance, enzyme activity, and antioxidant response. *Bioresour. Technol.* 2023;386:129511. doi: 10.1016/j.biortech.2023.129511

Dubovik O. S., Markevich R. M. Improvement of biotechnology of nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater. *Proceedings of BSTU. Series 2: Chemical Technology, Biotechnology, Geoecology.* 2016;4:186. (In Russ.)

Ivanova L. A., Myazin V. A., Korneikova M. V., Fokina N. V., Evdokimova G. A., Redkina V. V. It's time to clean up the Arctic. Creation of phyto-treatment system for post-treatment of mining wastewater from nitrogen compounds. Apatity: KSC RAS; 2021. 88 p. doi: 10.37614/978.5.91137.449.5 (In Russ.)

Kirilina T. V. Efficiency assessment of wastewater pretreatment using unicellular and multicellular hydrobionts. *Bulletin of Kazan Technological University.* 2013;8(16);200–203. (In Russ.)

Lozovik P. A., Galashina N. E. Change in the chemical composition of the water of the Kenti river system as a result of technogenic influence. *Trudy Karel'skogo*

*nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2017;3:21–35. doi: 10.17076/lim309 (In Russ.)

Meshengisser Y. M., Shchetinin A. I., Esin M. A. Removal of nitrogen and phosphorus by an active sludge. *Municipal Urban Utilities.* 2006;74:36–45. (In Russ.)

Savichev O. G. Biological wastewater treatment using bog biogeocenoses. *Izvestia of Tomsk Polytechnic University.* 2008;312(1):69–74. (In Russ.)

Shcheglov G. A. Changes of inorganic nitrogen compounds concentration in a mining enterprise wastewater by the microalgae *Chlorella vulgaris*. *Vestnik of MSTU.* 2023;26(2):191–199. doi: 10.21443/1560-9278-2023-26-2-191-199. (In Russ.)

Solnyshkova M. A., Pashkevich M. A. Study of biological water purification efficiency from nitrates with bioplato. *Natural and Technical Sciences.* 2018;5(119):169–173. (In Russ.)

Solnyshkova M. A. Reduction of surface water pollution by inorganic nitrogen compounds in the impact zone of mining enterprises in Murmansk region: Summary of PhD (Cand. of Tech.) thesis. St. Petersburg; 2020. 133 p. (In Russ.)

Wang C., Yu X., Lv H., Yang J. Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater by the green alga *Chlorella* sp. *J. Environ. Biol.* 2013;34(2):421–425.

Wang L., Min M., Li Y., Chen P., Chen Y., Liu Yu., Wang Y., Ruan R. Cultivation of green algae *Chlorella* sp. in different wastewaters from municipal wastewater treatment plant. *Appl. Biochem. Biotechnol.* 2010;162:1174–1186. doi: 10.1007/s12010-009-8866-7

Widjaja A., Chien C. C., Ju Y. H. Study of increasing lipid production from fresh water microalgae *Chlorella vulgaris*. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* 2009;40(1):13–20. doi: 10.1016/j.jtice.2008.07.007

Zubov M. G., Boyarshinov S. F., Zubov G. M., Kulikov N. I., Shramov Yu. M., Litt Yu. V., Nekrasova V. K., Nozhevnikova A. N. Biotechnology of wastewater treatment with immobilization of activated sludge and nitrogen removal. *Water Supply and Sanitary Engineering.* 2013;8:72–75. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 30.05.2023; принята к публикации / accepted: 13.09.2023.  
Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов / The author declares no conflict of interest.

## СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ:

Щеглов Глеб Андреевич

аспирант, инженер лаборатории междисциплинарных эколого-экономических исследований

e-mail: Gleb\_ap@mail.ru

## CONTRIBUTOR:

Shcheglov, Gleb

Doctoral Student, Engineer at the Laboratory for Interdisciplinary Ecological-Economic Studies