



## ЭКОЛОГИЯ/ECOLOGY

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14> EDN: JMEGPV**АЭРОБНОЕ ОКИСЛЕНИЕ ТРИХЛОРЭТИЛЕНА МЕТАНОТРОФНЫМИ КОНСОРЦИУМАМИ, ВЫДЕЛЕННЫМИ ИЗ ПОЧВ ЧЕРНЕВОЙ ТАЙГИ**

Научная статья

**Гогмачадзе Л.Г.<sup>1,\*</sup>, Хуснетдинова К.А.<sup>2</sup>, Кравченко И.К.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-2390-139X;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-9563-7025;<sup>1</sup> Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Российская Федерация<sup>1, 2, 3</sup> Институт микробиологии им. С.Н. Виноградского, Москва, Российская Федерация<sup>2, 3</sup> Федеральный исследовательский центр «Фундаментальные основы биотехнологии» Российской академии наук, Москва, Российская Федерация

\* Корреспондирующий автор (lya.gogmachadze[at]yandex.ru)

Предложена: 14.07.2026; Принята: 05.08.2026; Опубликовано: 19.08.2026

**Аннотация**

Одной из наиболее актуальных тем в экологических дискуссиях является судьба антропогенных загрязнителей, в частности, галогенированных соединений. Трихлорэтилен (ТХЭ) это широко используемый в современной промышленности летучий хлорированный углеводород с высокой степенью токсичности. Метанотрофы одни из немногих микроорганизмов, которые способны окислять ТХЭ в аэробных условиях, однако их потенциал деградации поллютанта в почве и других природных объектах остаются практически неизученными. В качестве объекта исследования нами были выбраны два устойчивых метанотрофных консорциума, выделенных из почв уникальной экосистемы — Черневой тайги Западной Сибири. Консорциум Т1 был выделен из почвы Томской области, а H2-2 — Новосибирской области. Установлено, что оба консорциума окисляли ТХЭ в концентрациях от 0.2 до 0.5 ppm, что значительно превышает допустимое пороговое содержание поллютанта в природных водах. Т1 проявил более высокую устойчивость к ТХЭ, что, возможно, указывает на потенциально разные механизмы детоксикации или резистентности у исследуемых консорциумов. Установлено, что внесение ТХЭ изменяет морфологию клеток и приводит к изменениям в структуре микробных консорциумов, возможно, связанным с активной адаптацией и ростом устойчивых к поллютанту компонентов. Внесение ТХЭ в образцы черневой почвы приводило к значительным перестройкам структуры аборигенных микробных сообществ, что отражает резистентность и адаптационные механизмы почвенной микробиоты. Таким образом, выделенные метанотрофные консорциумы обладают потенциалом к деградации ТХЭ, что открывает перспективы для их использования в биоремедиационных технологиях.

**Ключевые слова:** черневая тайга, метанотрофы, стрессовое воздействие, ТХЭ.**AEROBIC OXIDATION OF TRICHLOROETHYLENE BY METHANOTROPHIC CONSORTIUMS ISOLATED FROM THE SOILS OF THE DARK CONIFEROUS TAIGA**

Research article

**Gogmachadze L.G.<sup>1,\*</sup>, Khushnetdinova K.A.<sup>2</sup>, Kravchenko I.K.<sup>3</sup>**<sup>1</sup> ORCID : 0000-0003-2390-139X;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-9563-7025;<sup>1</sup> Moscow State University, Moscow, Russian Federation<sup>1, 2, 3</sup> Winogradsky Institute of Microbiology, Moscow, Russian Federation<sup>2, 3</sup> Research Center of Biotechnology of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

\* Corresponding author (lya.gogmachadze[at]yandex.ru)

Suggested: 14.07.2026; Accepted: 05.08.2026; Published: 19.08.2026

**Abstract**

One of the most topical issues in environmental debates is the fate of anthropogenic pollutants, in particular halogenated compounds. Trichloroethylene (TCE) is a volatile chlorinated hydrocarbon widely used in modern industry, which is highly toxic. Methanotrophs are among the few microorganisms capable of oxidising TCE under aerobic conditions; however, their potential for degrading this pollutant in soil and other natural environments remains virtually understudied. Two stable methanotrophic consortia, isolated from the soils of a unique ecosystem — dark coniferous taiga of Western Siberia—were selected as the subject of our study. Consortium T1 was isolated from soil in Tomsk Oblast, and H2-2 from soil in Novosibirsk Oblast. It was found that both consortia oxidised TCE at concentrations ranging from 0.2 to 0.5 ppm, which significantly exceeds the permissible threshold concentration of the pollutant in natural waters. T1 exhibited greater resistance to TCE, which may indicate potentially different mechanisms of detoxification or resistance in the consortia under study. It was found that the addition of TCE alters cell morphology and leads to changes in the structure of microbial consortia, possibly associated with active adaptation and the growth of pollutant-resistant components. The addition of TCE to samples of raw taiga soil led to significant changes in the structure of the indigenous microbial communities, reflecting the resistance and adaptive

mechanisms of the soil microbiota. Thus, the isolated methanotrophic consortia have the potential to degrade TCE, which opens up prospects for their use in bioremediation technologies.

**Keywords:** dark taiga, methanotrophs, stress exposure, TCE.

## Введение

Современное антропогенное воздействие на лесные и сельскохозяйственные угодья сопровождается масштабным загрязнением окружающей среды токсичными веществами, среди которых особую опасность представляют галогенированные соединения. В частности, широкое промышленное использование трихлорэтилена (ТХЭ) привело к его повсеместному обнаружению в почвах и грунтовых водах. Согласно монографии IARC (2014) [1] это вещество относится к группе 1 по канцерогенности для человека. В научной литературе сообщается о способности ТХЭ вызывать эндокринные нарушения [2]. Данное вещество включено в перечни приоритетных загрязнителей Министерства экологии и окружающей среды Китая, Агентства по охране окружающей среды США (USEPA) и Европейской комиссии [3]. USEPA в 2009 году установило предельно допустимую концентрацию ТХЭ в питьевой воде на уровне 5 мкг/л.

Являясь стойким загрязнителем, ТХЭ представляет прямую угрозу биоразнообразию, поэтому активно разрабатываются методы очистки (ремедиации) загрязнения ТХЭ. В отличие от физических методов утилизации, биологическая рекультивация с помощью увеличения количества микроорганизмов-деструкторов [4], [5], [6] имеет ряд преимуществ: стабильный эффект после обработки, низкая энергоёмкость и защита окружающей среды.

Метанокисляющие микроорганизмы открывают новую перспективу решения этой проблемы. Метанокисляющие бактерии (метанотрофы), использующие  $\text{CH}_4$  как единственный источник углерода и энергии, кометаболизируют ТХЭ посредством ферментов метанмонооксигеназы (ММО). ММО катализирует трансформации метана в метанол, одновременно обеспечивая ко-метаболическое превращение ТХЭ [4]. Этот процесс кометаболизма рассматривается сегодня как один из наиболее перспективных путей биологической утилизации данного поллютанта из окружающей среды, что делает изучение устойчивости метанотрофных сообществ к ТХЭ критически важным. Всё это определяет актуальность проводимых исследований.

Целью настоящего исследования стало изучение метанотрофных консорциумов, выделенных из почв Черневой тайги, и оценка перспективности их применения в биотехнологиях очистки природных объектов от ТХЭ. Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- 1) оценить способность метанотрофных консорциумов окислять ТХЭ;
- 2) определить изменения в структуре микробных сообществ почв Черневой тайги при внесении ТХЭ.

## Методы и принципы исследования

Метанокисляющие консорциумы были выделены из образцов почв на минеральной питательной среде «П» [7], разбавленной в пять раз. Содержание метана в газовой фазе составляло 10% по объему, культивирование вели при постоянном перемешивании и 25°C в течение 15–20 сут. Стабильные культуры (динамика роста, микроскопическая картина) были получены после 5–8 последовательных пересевов (5% инокулята). Состав консорциумов был определен методом 16S рРНК профилирования (Illumina) [8].

Для оценки способности консорциумов окислять ТХЭ его вводили в жидкую фазу флаконов со средой П/5 в количестве 20 и 50 ppm и метан в газовую фазу (10%). В ходе инкубации в течение 10 сут оценивали в динамике микробную биомассу ( $\text{ОП}_{600}$ ), содержание  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в газовой фазе и содержание ТХЭ методом жидкостной хроматографии («Кристалл 5000.2» (Хроматэк, Россия) на колонке ZB-WAXplusTM). Для оценки влияния на активность микробных сообществ почв, ТХЭ вводили в почву в виде водных растворов для достижения концентраций 0, 0,5, 5, 20 и 50 ppm. Содержание метана в газовой фазе составляло 10% по объему. Пробы газа отбирали один раз в неделю из газовой фазы флаконов для измерения концентраций  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$  [9]. Эксперимент продолжался 54 дня.

Все измерения выполняли не менее чем в трех повторностях. Для каждой выборки считали среднее и стандартное отклонение в программном продукте Excel 2013 (Microsoft Corp.).

## Результаты и обсуждение

В результате 8–10 последовательных пересевов из почв Черневой тайги были получены устойчивые метанотрофные консорциумы, удельная скорость роста которых составляла 0,20–0,23 ч<sup>-1</sup>. Для дальнейшей работы были выбраны два метанотрофных консорциума: Т1 из Томской области и Н2-2 из Новосибирской области. Геномный анализ показал, что метанотрофный компонент обеих консорциумов представлен бактериями р. *Methylocystis*. Сопутствующая микрофлора была представлена в случае консорциума Т1 *Hyphomicrobium*, *Caenimonas*, *Variovorax*, *Lysobacter*, а консорциума Н2-2 *Pseudomonas*, *Pseudoxanthomonas*, *Rhodanobacter*.

В процессе исследования динамики роста двух консорциумов (рис. 1) было установлено, что наблюдается существенное влияние трихлорэтилена на ростовые характеристики метанокисляющих консорциумов. В контрольных вариантах (без внесения ТХЭ) интенсивность и динамика роста различались. Консорциум Н2-2 в варианте с контролем увеличил  $\text{ОП}_{600}$  с начальных 0,32 до 0,48 к 7 суткам, с последующей стабилизацией. Консорциум Т1 в контроле рос менее интенсивно, достигнув максимальной  $\text{ОП}_{600}$  около 0,43 к 7 суткам.

Внесение ТХЭ оказывало ингибирующее действие на рост метанотрофных консорциумов, но степень влияния была различной. Консорциум Т1 с внесенным ТХЭ, показал снижение оптической плотности в сравнении с контролем, с минимальным значением около 0,30 к 14 суткам. В то же время консорциум Н2-2 продемонстрировала высокую чувствительность к ТХЭ: оптическая плотность снижалась на протяжении всего эксперимента, опускаясь до 0,13 к 21 суткам.

Таким образом, консорциум Т1 проявляет более высокую устойчивость к ТХЭ, в то время как консорциум Н2-2 оказалась значительно более чувствительным к данному поллютанту. Это различие в реакциях указывает на потенциально разные механизмы детоксикации или резистентности у исследуемых консорциумов.

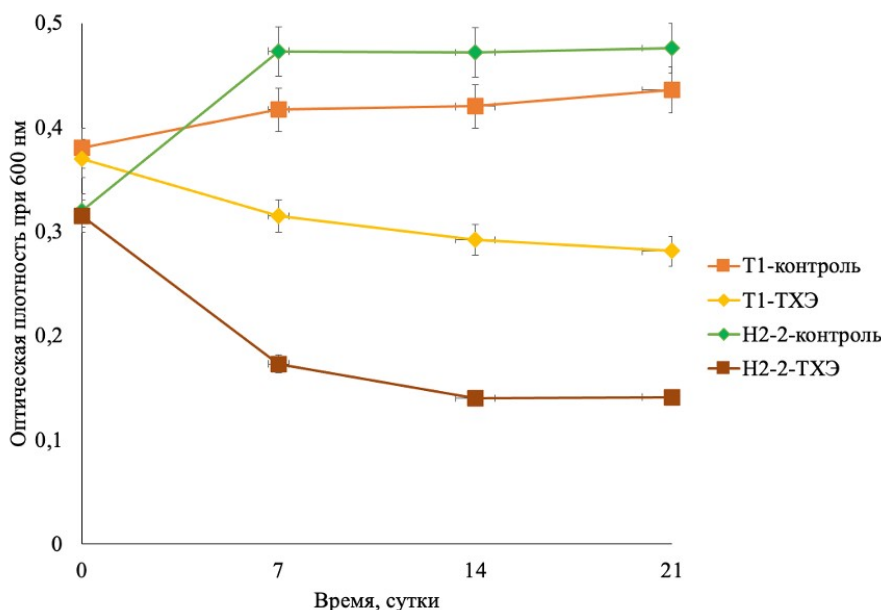


Рисунок 1 - Влияние ТХЭ на рост метанотрофных консорциумов Т1 и Н2-2  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.1>

Для более детального изучения морфологических особенностей и, возможно, механизмов, лежащих в основе устойчивости консорциума Т1, нами был применен метод электронной микроскопии, который демонстрирует особенности морфологии клеток метанотрофных бактерий и бактерий-спутников консорциума Т1 в условиях контроля (рис. 2 а, б) и после воздействия трихлорэтилена (ТХЭ) (рис. 2 в-е). Анализ этих изображений позволяет выявить морфологические изменения, связанные с условиями культивирования.

В контрольных образцах (рис. 2 а, б) клетки метанотрофных бактерий, представители рода *Methylocystis*, выглядят хорошо сформированными. Клетки имеют овальную или палочковидную форму. Клеточная стенка выглядит целостной, без видимых повреждений. Отсутствуют явные признаки стресса или деградации. Размеры клеток соответствуют типичным для метанотрофных бактерий, и наблюдается некоторая варибельность формы, что характерно для бактериальных культур. На изображении (рис. 2 б) наблюдаются клетки, образующие скопления, что может свидетельствовать об их агрегации или склонности к образованию биопленок.

В вариантах с внесением ТХЭ (рис. 2 в-е) наблюдаются заметные изменения в морфологии клеток. Клетки выглядят менее упорядоченными, их форма часто становится более неправильной, вытянутой или деформированной. Клеточная стенка может выглядеть истонченной или неровной. Клетки демонстрируют большую варибельность формы и размеров, некоторые выглядят «сплюснутыми» или уплотненными. Наблюдается меньшая тенденция к образованию плотных скоплений по сравнению с контролем.

Несмотря на присутствие ТХЭ, клетки метанотрофов не проявляют явных признаков деградации. Этот факт может быть обусловлен наличием в консорциуме Т1 бактерий, способных к эффективной деградации трихлорэтилена. Предполагается, что первичную деградацию трихлорэтилена осуществляют представители филумов *Bacteroidota* и *Actinomycetota*, далее остаточные количества хлорированных углеводов могут соокисляться метанотрофными бактериями.

Такие наблюдения позволяют предположить, что метанотрофные бактерии в консорциуме Т1 при воздействии ТХЭ не столько подвергаются прямой деградации, сколько активно адаптируются к стрессовым условиям. Отсутствие явных признаков деградации подтверждает предположение о наличии механизмов резистентности и, возможно, способности к трансформации ТХЭ, которые не приводят к быстрому разрушению клетки.

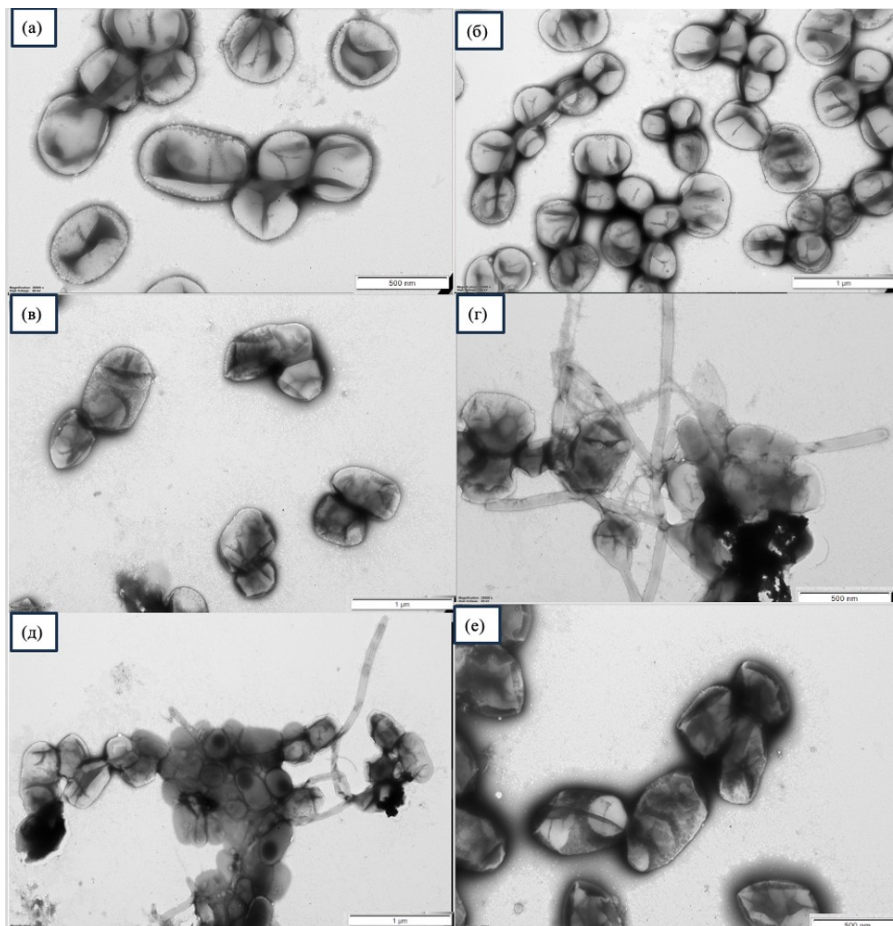


Рисунок 2 - Микрофотография клеток метанотрофных бактерий совместно с бактериями-спутниками в вариантах с контролем (а, б) и внесением ТХЭ (в, г, д, е)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.2>

Геномный анализ показал (рис. 3) существенные различия в реакции микробных сообществ на внесение ТХЭ. Консорциум Т1 продемонстрировал значительное снижение обилия доминирующей группы *Pseudomonadota* и одновременное существенное увеличение относительного количества *Actinomycetota* и *Bacteroidota*. Это свидетельствует о перестройке сообщества под воздействием ТХЭ, возможно, связанной с активной адаптацией или ростом устойчивых к поллютанту компонентов. В отличие от него, консорциум Н2-2 показал менее выраженное снижение обилия *Pseudomonadota* и незначительное увеличение *Actinomycetota* и *Bacteroidota*. Таким образом, консорциум Т1 проявляет более высокую устойчивость к ТХЭ, в то время как консорциум Н2-2 оказался значительно более чувствительным к данному поллютанту. Это различие в реакциях указывает на потенциально разные механизмы детоксикации или резистентности у исследуемых консорциумов.

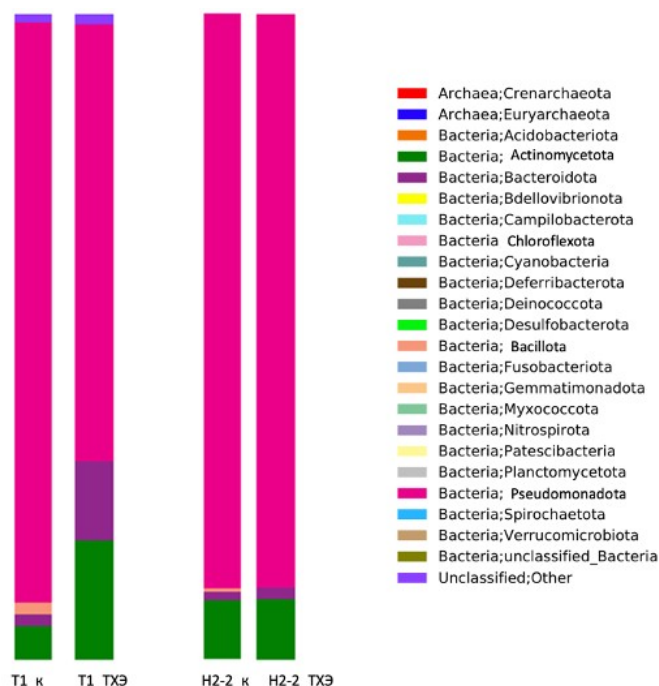


Рисунок 3 - Таксономический состав микробных сообществ метанотрофных консорциумов Т1 и Н2-2 без внесения ТХЭ и с внесением 0,1 мг/л ТХЭ на уровне филума  
DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.3>

Методом высокопроизводительного секвенирования установлено, что внесение ТХЭ в черневую почву Новосибирской области приводило к коренной перестройке таксономической структуры прокариотного сообщества (рис. 4). Наблюдалось резкое увеличение представленности филума *Bacillota* до 43,2 и 50,7% при внесении 20 и 50 мкг/г ТХЭ, тогда как в исходной почве она составляла 1%. Столь значительное увеличение доли *Bacillota* может быть связано с несколькими факторами. Во-первых, согласно литературным данным, представители этого филума обладают механизмами детоксикации и устойчивости к ТХЭ, что позволяет им не только выживать, но и активно размножаться в присутствии данного поллютанта, получая конкурентное преимущество перед другими группами микроорганизмов [10]. Во-вторых, возможно, что ТХЭ, или продукты его трансформации, служат для них своего рода питательным субстратом, либо стимулируют их рост другими способами. Такая перестройка сообщества, с доминированием одной или нескольких групп, часто наблюдается в ответ на стрессовые воздействия и свидетельствует о снижении общего микробного биоразнообразия и упрощении структуры экосистемы.

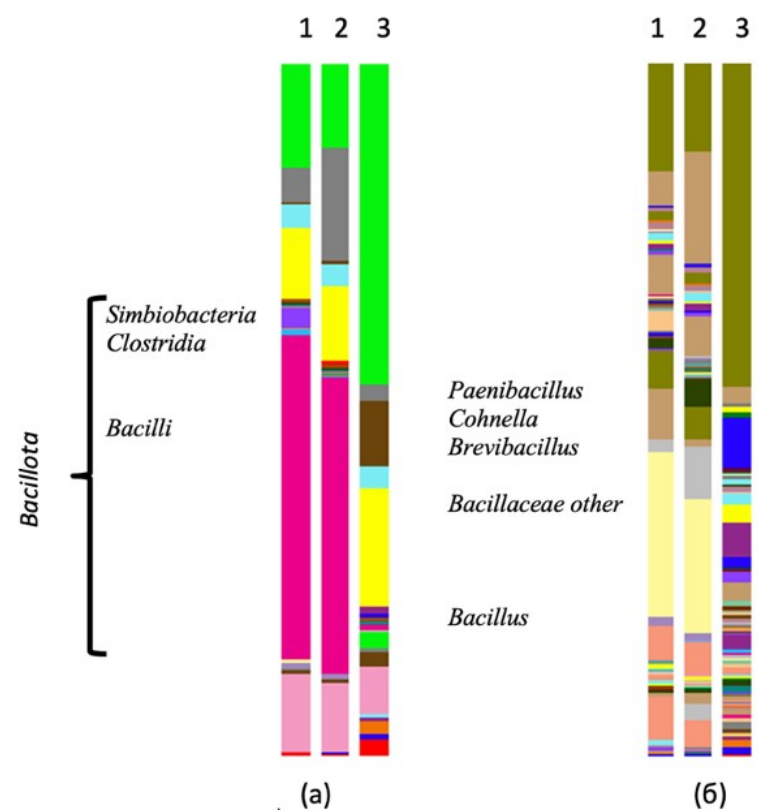


Рисунок 4 - Таксономический состав микробных сообществ черновой почвы Н2 с внесением 50 ppm ТХЭ (1), 20 ppm (2) и без внесения загрязнителя (3) на уровне семейств (а) и родов (б)

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.4>

### Заключение

В настоящей работе впервые проведена комплексная оценка метаболического потенциала метанотрофных консорциумов, выделенных из почв Черновой тайги, в отношении деградации стойкого хлорорганического загрязнителя — трихлорэтилена. Полученные результаты свидетельствуют о наличии у исследованных метанотрофных ассоциаций эффективного ферментативного аппарата для аэробного соокисления ТХЭ. Для установления механизмов этого процесса планируется полногеномный анализ метанотрофных консорциумов с последующими функциональной аннотацией и анализом метаболических путей. Согласно нашей гипотезе, деградационная активность обеспечивается не только за счет широкого субстратного спектра растворимой метанмонооксигеназы, но и вовлечением альтернативных путей окисления через диоксигеназные и алкен-оксигеназные системы (например, генов *todC*, *etnC*).

Важным практическим аспектом работы является доказательство способности выделенных консорциумов Т1 и Н2-2 расти и утилизировать ТХЭ в диапазоне концентраций 0,1–0,5 ppm, который существенно превышает предельно допустимые уровни для природных объектов. Это указывает на высокую устойчивость микробного сообщества к токсическому воздействию загрязнителя и открывает перспективы его применения для биоремедиации загрязнённых территорий в условиях умеренного климата.

Таксономический анализ показал, что метанотрофным компонентом обоих консорциумов являются бактерии рода *Methylocystis*, что согласуется с их известной ролью в окислении труднодоступных субстратов и подтверждает эколого-физиологическую значимость этой группы в почвах Сибирского региона. При этом межштаммовые различия между изолятами из Томской и Новосибирской областей, вероятно, обусловлены локальными особенностями почвенных условий и требуют дальнейшего изучения на уровне геномных сравнений.

Таким образом, совокупность молекулярно-биологических и физиолого-биохимических данных позволяет заключить, что метанотрофные ассоциации черновых почв обладают выраженным деструктивным потенциалом в отношении трихлорэтилена, и представляют собой ценный ресурс для разработки эффективных стратегий очистки окружающей среды. Дальнейшие исследования должны быть направлены на оптимизацию условий культивирования и оценку интенсивности деградации в натурных моделях, что приблизит внедрение данных консорциумов в реальные технологии биоремедиации.

**Финансирование**

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 25-24-20102, (<https://rscf.ru/project/25-24-20102>).

**Конфликт интересов**

Не указан.

**Рецензия**

Сообщество рецензентов Journal of Agriculture and Environment.

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.5>

**Funding**

This study was supported by the Russian Science Foundation, project no. 25-24-20102, (<https://rscf.ru/project/25-24-20102>).

**Conflict of Interest**

None declared.

**Review**

Community of Reviewers of the Journal of Agriculture and Environment.

DOI: <https://doi.org/10.60797/JAE.2026.72.14.5>

**Список литературы / References**

1. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents / (IARC) International Agency for Research on Cancer. — Lyon: IARC, 2014. — 514 p.
2. Tachachartvanich P. Assessment of the endocrine-disrupting effects of trichloroethylene and its metabolites using in vitro and in silico approaches / P. Tachachartvanich, R. Sangsuwan, H.S. Ruiz et al. // *Environmental Science & Technology*. — 2018. — Vol. 52. — P. 1542–1550.
3. Liu M.H. Application of combined in situ chemical reduction and enhanced bioremediation to accelerate TCE treatment in groundwater / M.H. Liu, C.M. Hsiao, C.E. Lin et al. // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 11(18). — P. 8374.
4. Shukla A.K. Biodegradation of trichloroethylene (TCE) by methanotrophic community / A.K. Shukla, P. Vishwakarma, S.N. Upadhyay et al. // *Bioresource Technology*. — 2009. — Vol.100(9). — P. 2469–74.
5. Wendlandt K.D. The potential of methane oxidising bacteria for application in environmental biotechnology / K.D. Wendlandt, U. Stottmeister, J. Helm et al. // *Engineering in Life Sciences*. — 2010. — Vol.10. — P. 87–102.
6. Wang C.-C. Enrichment of methanotrophic consortium and its aerobic cometabolism of mixed vinyl chloride pollutants using methane gas and micro- and nano-bubbles / C.-C. Wang, C.-M. Liang, Ting-I Lin et al. // *International Biodeterioration & Biodegradation*. — 2025. — Vol.198. — P. 106011.
7. Гальченко В.Ф. Метанотрофные бактерии / В.Ф. Гальченко. — Москва: ГЕОС, 2001. — 500 с.
8. Caporaso J.G. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data / J.G. Caporaso, J. Kuczynski, J. Stombaugh et al. // *Nature Methods*. — 2010. — Vol. 7. — P. 335–336.
9. Kravchenko I.K. Isolation of Methanotrophic Consortium from Chernevaya Taiga Soil and Laboratory Research on Its Introduction into Agro-Soil / I.K. Kravchenko, L.G. Gogmachadze, A.O. Zverev et al. // *Microorganisms*. — 2025. — Vol. 13. — P. 2052.
10. Wu Z. Recent advances and trends of trichloroethylene biodegradation: A critical review / Z. Wu, Q. Man, H. Niu et al. // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — Vol.13. — P. 1053169.

**Список литературы на английском языке / References in English**

1. Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risks to Humans. Trichloroethylene, Tetrachloroethylene, and Some Other Chlorinated Agents / (IARC) International Agency for Research on Cancer. — Lyon: IARC, 2014. — 514 p.
2. Tachachartvanich P. Assessment of the endocrine-disrupting effects of trichloroethylene and its metabolites using in vitro and in silico approaches / P. Tachachartvanich, R. Sangsuwan, H.S. Ruiz et al. // *Environmental Science & Technology*. — 2018. — Vol. 52. — P. 1542–1550.
3. Liu M.H. Application of combined in situ chemical reduction and enhanced bioremediation to accelerate TCE treatment in groundwater / M.H. Liu, C.M. Hsiao, C.E. Lin et al. // *Applied Sciences*. — 2021. — Vol. 11(18). — P. 8374.
4. Shukla A.K. Biodegradation of trichloroethylene (TCE) by methanotrophic community / A.K. Shukla, P. Vishwakarma, S.N. Upadhyay et al. // *Bioresource Technology*. — 2009. — Vol.100(9). — P. 2469–74.
5. Wendlandt K.D. The potential of methane oxidising bacteria for application in environmental biotechnology / K.D. Wendlandt, U. Stottmeister, J. Helm et al. // *Engineering in Life Sciences*. — 2010. — Vol.10. — P. 87–102.
6. Wang C.-C. Enrichment of methanotrophic consortium and its aerobic cometabolism of mixed vinyl chloride pollutants using methane gas and micro- and nano-bubbles / C.-C. Wang, C.-M. Liang, Ting-I Lin et al. // *International Biodeterioration & Biodegradation*. — 2025. — Vol.198. — P. 106011.
7. Gal'chenko V.F. Metanotrofny'e bakterii [Methanotrophic Bacteria] / V.F. Gal'chenko. — Moscow: GEOS, 2001. — 500 p. [in Russian]
8. Caporaso J.G. QIIME allows analysis of high-throughput community sequencing data / J.G. Caporaso, J. Kuczynski, J. Stombaugh et al. // *Nature Methods*. — 2010. — Vol. 7. — P. 335–336.
9. Kravchenko I.K. Isolation of Methanotrophic Consortium from Chernevaya Taiga Soil and Laboratory Research on Its Introduction into Agro-Soil / I.K. Kravchenko, L.G. Gogmachadze, A.O. Zverev et al. // *Microorganisms*. — 2025. — Vol. 13. — P. 2052.
10. Wu Z. Recent advances and trends of trichloroethylene biodegradation: A critical review / Z. Wu, Q. Man, H. Niu et al. // *Frontiers in Microbiology*. — 2022. — Vol.13. — P. 1053169.