

Интернет-журнал «Отходы и ресурсы» <https://resources.today>
Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling

2023, Том 10, № 3 / 2023, Vol. 10, Iss. 3 <https://resources.today/issue-3-2023.html>

URL статьи: <https://resources.today/PDF/02NZOR323.pdf>

DOI: 10.15862/02NZOR323 (<https://doi.org/10.15862/02NZOR323>)

1.6.21. Геоэкология (географические науки)

Ссылка для цитирования этой статьи:

Гладун, И. В. Оценка углеродного следа предприятия аквакультуры / И. В. Гладун, Л. П. Майорова // Отходы и ресурсы. — 2023. — Т. 10. — № 3. — URL: <https://resources.today/PDF/02NZOR323.pdf> DOI: 10.15862/02NZOR323

For citation:

Gladun I.V., Mayorova L.P. Assessment of the carbon footprint of an aquaculture enterprise. *Russian Journal of Resources, Conservation and Recycling*. 2023; 10(3): 02NZOR323. Available at: <https://resources.today/PDF/02NZOR323.pdf>. (In Russ., abstract in Eng.) DOI: 10.15862/02NZOR323

Авторы благодарят магистра Мудрак К.В. за сбор исходных данных для настоящего исследования, выполненный при написании магистерской диссертации «Оценка значимости экологических аспектов на предприятиях аквакультуры»

УДК 551.583; 504.05

Гладун Игорь Владимирович

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Доцент кафедры «Экология, ресурсопользование и безопасность жизнедеятельности»
Кандидат биологических наук
E-mail: 006209@pnu.edu.ru

Майорова Людмила Петровна

ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», Хабаровск, Россия
Профессор кафедры «Экология, ресурсопользование и безопасность жизнедеятельности»
Доктор химических наук, доцент
E-mail: 000318@pnu.edu.ru
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-982X>
РИНЦ: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496438
SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56267059300>

Оценка углеродного следа предприятия аквакультуры

Аннотация. Для обеспечения перехода России на траекторию экологически сбалансированного развития необходимо снизить антропогенное давление на окружающую среду — разорвать экономический рост и выброс парниковых газов. К наиболее значимым источникам выбросов парниковых газов, кроме отраслей промышленного производства, относят захоронение и термическое обезвреживание отходов, образующихся в рыбной и рыбоперерабатывающей промышленности. По оценкам объем образования рыбных отходов может достигать 50 % от улова или 50–75 % от переработанной рыбы. В настоящее время проводятся многочисленные исследования по биоконверсии рыбных отходов личинками мух чёрная львинка (*Hermetia illucens*), как для снижения выбросов в атмосферу парниковых газов, так и для производства рыбного комбикорма для предприятий аквакультуры. В статье представлены результаты исследования сравнительного анализа четырех различных сценариев (утилизация, компостирование, сжигание и захоронение) по выбросам парниковых и кислых газов при обращении с рыбными отходами, образующимися в результате деятельности Анюйского рыбноводного завода. Показано, что потенциал глобального потепления был максимален при компостировании отходов (0,189 т CO₂-экв. на 1 т отходов) и минимален при

их термическом обезвреживании в крематоре (0,015 т CO₂-экв.). При утилизации рыбных отходов личинками *H. illucens* вклад CO₂ в потенциал глобального потепления составлял 99,57 %, выбросы метана (0,005 т CO₂-экв.) и закиси азота (0,024 т CO₂-экв.) были незначительны и существенно ниже по сравнению с другими сценариями обработки. Выбросы оксидов азота, диоксида серы и оксида углерода при утилизации личинками *H. illucens* отсутствовали. При термическом обезвреживании рыбных отходов наблюдался максимальный подкисляющий эффект — 3,712 кг SO₂-экв./кг вещества, при захоронении отходов на свалке ТКО выброс SO₂ и NO_x составил 0,4 кг SO₂-экв./кг.

Ключевые слова: аквакультура; углеродный след; парниковые газы; рыбные отходы; утилизация; промышленность; выбросы

Введение

В Российской Федерации Указом Президента РФ «О Стратегии экологической безопасности Российской Федерации на период до 2025 года» определен набор показателей для оценки состояния экологической безопасности, который частично включает индикаторы, рекомендованные Экономическим и Социальным Советом ООН.¹ Для обеспечения перехода России на траекторию экологически сбалансированного развития необходимо к 2050 г. снизить антропогенное давление на окружающую среду — разорвать экономический рост и выброс парниковых газов. Россия в рамках Парижского климатического договора взяла на себя обязательства по сокращению выбросов парниковых газов (ПГ) на 25–30 % к 2030-му году, по сравнению с 1990-м. К наиболее значимым источникам выбросов парниковых газов (ПГ), кроме различных отраслей промышленного производства, относят захоронение твердых отходов на свалках и полигонах (выбросы CH₄) и биологическую обработку твердых отходов с высоким содержанием органической фракции (выбросы CH₄ и N₂O) [1; 2].

Существует множество способов обработки, утилизации и обезвреживания твердых отходов, содержащих органическую фракцию: анаэробное сбраживание для производства биогаза, компостирование, вермикомпостирование, сжигание, извлечение биологически активных соединений, получение биодизельного топлива, карбонизация и получение активированных углей и др. [3]. Но не все эти способы равнозначны исходя из концепции устойчивого развития. Генеральный секретарь ООН в докладе «Альтернативные стратегии и меры для ускорения хода выполнения решений: утилизация отходов» подчеркивал, что отходы следует рассматривать как полезный источник ресурсов, а их утилизация должна осуществляться с учетом всего технологического цикла и способствовать устойчивому развитию, в том числе — снижению уровня выбросов парниковых газов и других загрязняющих веществ.² В мире проводится поиск биотехнологий, позволяющих использовать органические отходы в качестве источника ценных вторичных ресурсов, что создает возможности для реализации экономики замкнутого цикла. Одним из направлений научного поиска является использование органических отходов производства и потребления в качестве субстрата для выращивания насекомых [4–6].

¹ Цели в области устойчивого развития. [Электронный ресурс] URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/sustainable-development-goals/> (дата обращения: 29.06.2023).

² Альтернативные стратегии и меры для ускорения хода выполнения решений: утилизация отходов. [Электронный ресурс] URL: https://sustainabledevelopment.un.org/content/dsd/csd/csd_pdfs/csd-19/sg-reports/ecn6_russian.pdf (дата обращения: 29.06.2023).

В последние годы в РФ реализуется государственная программа роста потребления населением рыбных продуктов без истощения и подрыва популяционных запасов, в том числе, благодаря развитию аквакультуры. Но развитие рыбной и рыбоперерабатывающей промышленности связано с поиском экономически эффективного и экологически безопасного способа обращения с рыбными отходами, объем образования которых, по разным оценкам, может достигать 50 % от улова или 50–75 % от переработанной рыбы [7; 8]. По оценкам специалистов Европейского Союза, рыбные отходы, производимые рыболовным сектором, составляют в общей сложности 5,2 млн т/год [9].

Рост цен в мире на рыбные корма, производимые из низкосортной морской рыбы или соевого шрота, и необходимые для развития аквакультуры, обуславливает поиск альтернативных источников пищевого белка и липидов в аквакормах, не конкурирующих с производством продуктов питания для человека [10]. Согласно оценкам, в глобальном масштабе одна шестая часть вылова в результате морского промысла используется для производства рыбного корма для целей аквакультуры [11]. Отсутствие в РФ сектора промышленности по переработке рыбных отходов или применение устаревших технологий их утилизации приводит к серьезным финансовым потерям в рыбной отрасли: значительную часть рыбных отходов обезвреживают сжиганием, либо направляют на захоронение на полигоны — оба способа приводят к эмиссии ПГ и других загрязняющих веществ в атмосферный воздух [12; 13]. Другой проблемой является производство качественных кормов для искусственного кормления и замены импортных комбикормов на рыбоводных заводах в рамках реализации госпрограммы увеличения воспроизводства рыбной базы [14].

В настоящее время в мире проводятся многочисленные исследования по применению в качестве рыбного комбикорма личинок и продуктов их переработки мух чёрная львинка (*Hermetia illucens*), что обусловлено высокой питательностью личинок и возможностью использования в качестве субстрата для их выращивания различных органических (в том числе рыбных) отходов. *H. illucens* включена в разработанный Европейским агентством по безопасности пищевых продуктов список насекомых, пригодных для кормления животных.³ Рыбный корм с добавками продуктов переработки личинок *H. illucens* может быть хорошим источником белков (в том числе незаменимых аминокислот) и липидов для роста лососевых рыб в аквакультуре [15; 16].

Исследования по оценке выбросов ПГ при биоконверсии органических (рыбных) отходов личинками *H. illucens* показывают, что биотехнология позволяет снизить потенциал глобального потепления в сравнении с традиционными методами обращения с отходами (сжиганием, компостированием, захоронением) [17–20]. Воздействие, связанное с производством продуктов с высокой добавленной стоимостью из рыбных отходов, можно оценить с помощью различных методологий, наиболее применяемыми из которых являются оценка углеродного следа и оценка жизненного цикла [9; 20]. В связи с этим целью данной работы является сравнительный анализ четырех различных сценариев (утилизация, компостирование, сжигание и захоронение) при обращении с рыбными отходами по выбросам в атмосферный воздух парниковых и кислых газов, образующимися в результате деятельности предприятия аквакультуры — Анюйского рыбоводного завода.

³ Risk profile related to production and consumption of insects as food and feed. [Электронный ресурс] URL: <https://doi.org/10.2903/j.efsa.2015.4257> (дата обращения: 29.06.2023).

Методика исследования

Ануйский рыболовный завод, являющийся структурным подразделением Амурского филиала ФГБУ «Главрыбвод», — самый молодой и мощный по количеству выпускаемой молодежи завод Хабаровского края. За 19 лет работы суммарно им было выпущено 0,473 млрд экз. молодежи кеты [21]. Завод предназначен для искусственного воспроизводства водных биологических ресурсов, в том числе особо ценных, ценных и находящихся под угрозой исчезновения видов: кеты (*Oncorhynchus keta*), осетра амурского (*Acipenser schrenckii*), калуги (*Huso dauricus*).

В соответствии с технологическим регламентом искусственного воспроизводства после взятия икры и молок (спермы) производители направляются в цех обработки рыбы, в котором разделанная и вымытая рыба подвергается заморозке. В среднем за год завод выпускает до 150 т мороженой рыбы из производителей (лосось). Основными ресурсами для обеспечения технологического процесса на заводе являются своевременный вылов производителей, природная вода, электроэнергия, топливо, трудовые ресурсы и рыбные корма. Потребность в производителях составляет: кеты — 196 шт. (общий вес — 0,9 т), калуги — 72 шт. (28,8 т), амурского осетра — 154 шт. (9,2 т). Потребность в рыбных кормах: стартовый гранулированный корм СТ-07 — 21,5 т, а также живой корм артемия (*Artemia salina*) — 0,8 т; дафнии (*Daphnia magna*) — 0,124 т; олигохеты (*Enchytraeus albidus*) — 0,32 т.

Согласно оценке нормативного образования отходов производства и потребления, за год производственной деятельности на заводе образуется 22,554 т рыбных отходов. В их состав входят внутренности рыбы и жабры, отходы икры и малька, а также некондиционная рыба (непригодная для пищевого использования). По данным биологических анализов кеты доля массы внутренностей (без учета икры и молок) составляет 5,3 % к массе рыбы (информация предоставлена Хабаровским отделением ТИПРО-центра). В настоящем исследовании для оценки биохимического состава рыбных отходов кеты использовали оценку по печени: влага — 73,73–79,12 %, белок — 60,60–87,9 %, липиды — 10,00–29,79 %, углеводы — 0,29–0,63 % [22].

В настоящее время рыбные отходы на заводе сжигаются в крематоре (марка КРД-50). Поскольку в крематоре также сжигаются рыбные отходы, поступающие с Гурского рыболовного завода в количестве 31,111 т/год, общее количество обезвреживаемых термическим методом отходов составляет 53,665 т/год. Кроме рыбных отходов от жизнедеятельности работников предприятия образуется 4,499 т/год твердых коммунальных отходов («Мусор от офисных и бытовых помещений организаций практически неопасный», V класс опасности), в состав которых входит органическая фракция — пищевые отходы. Согласно информационно-техническому справочнику «Утилизация и обезвреживание отходов» содержание пищевых отходов в ТКО достигает 61,22 %⁴: при организации селективного сбора образование на Ануйском рыболовном заводе пищевых отходов нормативно составит 2,75 т/год. В настоящее время этот вид отходов вывозится на захоронение на несанкционированную свалку, но поскольку по биохимическому составу пищевые отходы близки к рыбным, то при выполнении сравнительного анализа они были суммированы к рыбным отходам. Итоговое образование рыбных отходов на заводе составило 56,42 т/год.

В исследовании был проанализирован выброс в атмосферный воздух загрязняющих веществ, ответственных за парниковый эффект («углеродный след») и кислотные осадки, при четырех сценариях обращения с рыбными отходами: термическое обезвреживание в крематоре (сценарий 1), захоронение на полигоне ТКО (сценарий 2), компостирование (сценарий 3),

⁴ Утилизация и обезвреживание отходов (кроме обезвреживания термическим способом) (ИТС 15-2021). [Электронный ресурс] URL: <https://burondt.ru> (дата обращения: 29.06.2023).

утилизация при помощи *H. illucens* в ресурсы для производства рыбных кормов (сценарий 4). Потенциалы глобального потепления парниковых газов (ППГ) оценивали по фактору эквивалентности (т CO₂/т эмиссии парникового газа): CH₄ = 25; CO₂ = 1; N₂O = 298.⁵ Коэффициенты подкисления (в кг SO₂-экв./кг вещества) были приняты согласно [23]: NO₂ = 0,7; SO₂ = 1; N₂O = 0,7.

Информация о входных материальных потоках была описана для каждого сценария, тогда как оценка других технологических процессов (отопление, потребление электроэнергии, природной воды, рыбного корма, расход топлива, в том числе при транспортировке рыбных отходов с Удинского на Анюйский рыбноводный завод) являлась общей для всех сценариев (табл. 1). Среднегодовое потребление электроэнергии заводом варьирует от 1 100 до 1 500 кВт/час, поэтому энергозатраты, обусловленные функционированием дополнительного технологического оборудования, необходимого для выращивания и обработки личинок *H. illucens* не учитывали.

Таблица 1

Данные инвентаризации, использованные в различных изученных сценариях

	Ед. измерения	Сценарий 1 (термическое обезвреживание)	Сценарий 2 (захоронение)	Сценарий 3 (компостирование)	Сценарий 4 (утилизация)
<i>Ввод в систему</i>					
Рыбные отходы + органическая фракция ТКО	т	56,42	56,42	56,42	56,42
<i>Потребляемые ресурсы</i>					
Топливо для крематора	т	0,5	—	—	—
<i>Вывод из системы</i>					
Выбросы в атмосферный воздух					
CO	кг	2,768	0,68	51,286	—
NO ₂ /NO	кг	2,153/0,35	0,3/—	—	—
SO ₂	кг	1,96	0,19	—	—
NH ₃	кг	—	1,44	0,12	—
Летучие органические соединения (кроме метана)	кг	—	—	0,152	—
Вторичные ресурсы	т	Зола от сжигания рыбных отходов* 6,398	Биогаз 0,27	Компост* 25,4	Личинки <i>H. Illucens</i> 11,17 Биогумус 14,67

Примечание: выход отхода «Зола от сжигания отходов потребления на производстве, подобных коммунальным» составляет 11,34 %; выход компоста — 45 %. Составлено/разработано авторами

Технологический процесс сценария 1 (термическое обезвреживание в крематоре): производительность термического обезвреживания — 15–20 кг/час, объем камеры — до 50 кг. Расчетное время работы крематора для сжигания 56,42 т рыбных отходов составляет 2 683 часа, расход дизтоплива — 0,5 т/год. В результате сжигания образуется производственный отход («Зола от сжигания отходов потребления на производстве, подобных коммунальным», IV класс опасности) и осуществляются выбросы загрязняющих веществ в атмосферный воздух.

⁵ Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощений парниковых газов. [Электронный ресурс] URL: <http://publication.pravo.gov.ru/Document/View/0001202207290034> (дата обращения: 29.06.2023).

Орехов Д.И. Методики расчета выбросов и поглощения парниковых газов // Справочник эколога. — 2023. — № 2. — С. 79–85.

Согласно⁶ в атмосферный воздух поступают CO₂, CO, летучие органические соединения (ЛОС), оксиды азота NO_x, SO₂, твердые частицы (летучая зола и продукты неполного сгорания топлива). Однако в данное исследование были включены только CO, CO₂, NO_x и SO₂, поскольку эти вещества считаются основными в выбрасываемой газовой смеси.

Технологический процесс сценария 2 (захоронение на полигоне): захоронение заключается в частичном разложении отходов с образованием стабилизированных твердых отходов, фильтрата и свалочного газа. В атмосферный воздух поступают CH₄, CO₂, толуол, NH₃, ксилол, CO, NO₂, формальдегид, SO₂, этилбензол, бензол, H₂S, фенол, смесь природных меркаптанов. В данном исследовании учитываемыми выходами были выбросы в атмосферу CO₂, CO, CH₄, NO_x, SO₂. Для оценки величины разлагаемого органического углерода (т С/т пищевых отходов) использовали коэффициент 0,15 согласно [9]. Биохимический состав рыбных отходов принимали: влажность — 76,42 %; белок — 74,25 %; липиды — 19,9 %; углеводы — 0,46 %. Расчеты выбросов загрязняющих веществ в составе биогаза (кроме парниковых газов) были выполнены по методике.⁶

Технологический процесс сценария 3 (компостирование): компостирование — контролируемый аэробный процесс переработки органических веществ, при котором образуются водяной пар, газы (меркаптаны, диметиламин, NH₃, H₂S, диметилсульфид, CH₄, фенол, CO₂), фильтрат и гумифицированный компост. Выбросы парниковых газов от процессов компостирования зависят от состава отходов и технологии компостирования. Отходы с низким отношением C/N и высоким содержанием воды имеют большой потенциал для образования выбросов парниковых газов в процессе компостирования [24]. В сценарии 3 рассматривали «холодное» компостирование в теплое время года в специальном огороженном месте (в аэрируемых буртах) на территории завода.⁴ Для ускорения процесса и обогащения кислородом компост переворачивают вручную. В процессе компостирования часть разлагаемого органического углерода в отходах превращается в CO₂ и поступает в атмосферный воздух. Полив компоста не рассматривали из-за значительного количества осадков в теплый период года (588 мм)⁷. Для расчета выбросов ПГ при компостировании были использованы значения удельных коэффициентов выбросов: CO — 0,000909 г/г, летучие органические соединения (кроме метана) — 0,000002703 г/г; NH₃ — 0,000002128 г/г.⁸

Технологический процесс сценария 4 (утилизация при помощи *H. illucens*): в качестве оборудования для выращивания личинок потребуется помещение с температурой 20–25°C, нормальной влажностью и естественной вентиляцией; инкубатор (маточник) для яиц мухи и подращивания личинок на питательной среде; стеллажи для пластиковых лотков с кормовым субстратом; вибросито для отделения личинок от биогумуса; сушильный шкаф для сушки личинок; миксер для размолва рыбных отходов; мельница для размолва сухих личинок; упаковочный аппарат для биогумуса. Технологический цикл выращивания личинок на субстрате — до 14 суток. В процессе утилизации образуется конечный продукт (личинки) и биогумус [5]. Средняя масса одной личинки *H. illucens* составляет до 200 мг, количество субстрата (органических отходов) сокращается на 50–80 % (по сырому весу). Согласно

⁶ Методические указания по расчету выбросов загрязняющих веществ в атмосферу от установок малой производительности по термической переработке твердых бытовых отходов и промотходов. [Электронный ресурс] URL: https://www.mnr.gov.ru/docs/metodicheskie_dokumenty/metodiki_rascheta_vybrossov_vrednykh_zagryaznyayushchikh_veshchestv_v_atmosfernyy_vozdukh_statsionarn (дата обращения: 29.06.2023).

⁷ Строительная климатология (СП 131.13330.2020). [Электронный ресурс] URL: <https://minstroyrf.gov.ru/docs/118243/> (дата обращения: 29.06.2023).

⁸ Praxis großer kompostierungsanlagen und wesentliche anforderungen an einen emissionsarmen betrieb. [Электронный ресурс] URL: <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/ced21e37-46a2-40c7-add2-7ca67480cf0b> (дата обращения: 29.06.2023).

информации, представленной в патенте⁹, при выращивании личинок *H. illucens* на пищевых отходах от объектов общественного питания (столовых) выход биомассы личинок составляет 198 кг с 1 т кормового субстрата. Побочным продуктом является биогурус: выход — до 230 кг биогуруса с 1 т кормового субстрата.

Выбросы парниковых газов при утилизации пищевых отходов личинками *H. illucens* зависят от качественного состава субстрата и технологии выращивания. В таблице 2 представлены результаты литературного анализа Воакье-Уидам К.А. с соавт. выбросов парниковых газов при утилизации 1 т органических отходов [20]. CO₂ является основным газообразным продуктом обработки органических отходов *H. illucens* и количество выделяющегося газа определяется величиной дыхания личинок (а также ассоциированных микроорганизмов), что косвенно указывает на скорость биodeградации субстрата.

Таблица 2

**Обзор количественной оценки выбросов парниковых газов
при переработке органических (пищевых) отходов личинками *H. Illucens*
(на 1 кг сухого вещества биомассы личинок)**

№, п/п	Субстрат	Возраст личинки, дней	Плотность заселения субстрата, экз./см ²	Скорость кормления личинок, мг сух. массы / личинка в день	CO ₂ , кг	CH ₄ , мг	N ₂ O, мг	NH ₃ , г
1	Пищевые отходы	5	2	30,00	1,75 ±0,17	49 ±29	21 ±13	—
2	Пищевые отходы	4	17,95	67,85	1,17	64,31	0,33	2,90
3	Пищевые отходы	—	6,25	15,00	1,36–2,70	8,27–12,77	8,27–56,56	—
4	Кухонные отходы	5	4	26,00	—	5,5	118	—
5	Пищевые отходы + рисовая солома	3	0,64	23,3	1,39 ±0,34	14,0 ±6,0	7,0 ±1,0	—
6	Мясокопная мука + рисовые отруби	3	1,13	26,67	3,33 ±0,37	348,35 ±390,08	6,52 ±3,85	0,11 ±0,02

Источник [20]

В настоящем исследовании удельные показатели выбросов парниковых газов по сценарию 4 были приняты по позиции 1 (табл. 2). Результаты были получены в исследовании Ермолаев Е. с соавт. при помощи прямого измерения ПГ методом газовой хроматографии [24]. Содержание сухого вещества личинок *H. illucens* было принято 35 % [20].

Оценку жизненного цикла (ОЖЦ) проводили в соответствии со стандартом ГОСТ Р 14040-2010.¹⁰ Цель ОЖЦ состояла в том, чтобы проанализировать потенциал изменения климата (при выбросах в атмосферный воздух парниковых и кислых газов) обсуждаемых сценариев обращения с рыбными отходами. В качестве функциональной

⁹ Способ переработки органических отходов личинками мух *Hermetia illucens* с получением белка животного происхождения и биогуруса. [Электронный ресурс] URL: <https://elibrary.ru/item.asp?id=37369850> (дата обращения: 29.06.2023).

¹⁰ Оценка жизненного цикла (ГОСТ Р 14040-2010). [Электронный ресурс] URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200077762> (дата обращения: 29.06.2023).

единицы была выбрана 1 т рыбных отходов (сырой вес). Граница системы ОЖЦ для этого анализа представлены в таблице 1. Процессами обработки (пробоподготовки) рыбных отходов пренебрегали, поскольку они были практически одинаковыми для исследуемых сценариев.

Результаты и обсуждение

В табл. 3 представлены результаты расчета выбросов парниковых газов в атмосферный воздух при изученных сценариях обработки рыбных отходов в количестве 56,42 т, определяющие потенциал глобального потепления («углеродный след»).

Таблица 3

Потенциал глобального потепления при изученных сценариях обработки рыбных отходов

Сценарий	Эмиссия, т CO ₂ -экв.			Потенциал глобального потепления, т CO ₂ -экв. (на 56,42 т отходов в числителе / на 1 т отходов — в знаменателе)
	CO ₂ (код 380)	CH ₄ (код 410)	N ₂ O (код 381)	
Сценарий 1 (термическое обезвреживание)	0,000	—	0,841	0,841 — 0,015
Сценарий 2 (захоронение)	—	1,264	—	1,264 — 0,022
Сценарий 3 (компостирование)	—	5,642	5,044	10,686 — 0,189
Сценарий 4 (утилизация)	6,842	0,005	0,024	6,872 — 0,122

Составлено/разработано авторами

Эмиссия CO₂. Углекислый газ (CO₂) является наиболее важным парниковым газом, но согласно методике количественного определения объемов выбросов ПГ, он не включается в оценку ПГП, поскольку рассматривается как нейтральный углерод (фактор эквивалентности CO₂ = 1 т CO₂/т эмиссии ПГ). При утилизации рыбных отходов личинками *H. illucens* CO₂ являлся основным парниковым газом, выделяющимся в атмосферный воздух при дыхании и биodeградации субстрата (табл. 3). Количество газа определяется условиями выращивания личинок *H. illucens* — видом субстрата и его качественным составом, кислотностью [25–27], влажностью [28; 29], температурой [24]. В изученных сценариях обработки рыбных отходов эмиссия CO₂ (в т CO₂-экв.) была максимальной в варианте с утилизацией — 6,842 т CO₂-экв. (табл. 3).

Эмиссия CH₄. При утилизации рыбных отходов личинками *H. illucens* метан образовывался в небольшом количестве — 0,005 т CO₂-экв. Переработка рыбных отходов личинками *H. illucens* значительно снижала эмиссию метана (фактор эквивалентности CH₄ = 25 т CO₂/т) в сравнении с процессами захоронения или компостирования (табл. 3). Низкие выбросы метана в варианте с утилизацией были обусловлены аэробными условиями, благодаря движению личинок *H. illucens* в субстрате, что улучшало циркуляцию воздуха и снижало образование CH₄ [28–30].

Эмиссия N₂O. Закись азота — парниковый газ с самым значительным фактором эквивалентности, равным 298 т CO₂/т эмиссии ПГ. Образуется газ как промежуточный продукт в процессах нитрификации и денитрификации [9]. Биоконверсия сухого вещества рыбных отходов личинками *H. illucens* снижала выбросы в атмосферный воздух N₂O в сравнении с

другими исследованными сценариями (табл. 3), благодаря аэробным условиям, препятствующим процессу денитрификации [28–30].

Минимальный потенциал глобального потепления изученных сценариев обработки рыбных отходов был при термическом обезвреживании (табл. 3). При утилизации рыбных отходов личинками *H. Illucens* ПГП был значительно ниже, чем при их компостировании (табл. 3).

При термическом обезвреживании рыбных отходов наблюдался максимальный подкисляющий эффект на атмосферный воздух — 3,712 кг SO₂-экв./кг вещества, при захоронении отходов на свалке ТКО выброс SO₂ и NO_x составил 0,4 кг SO₂-экв./кг.

Оценка воздействия на атмосферный воздух разных сценариев обращения с рыбными отходами согласно стандарту ГОСТ Р 14040-20106 сильно зависит от технологических процессов, включенных в границы функциональной системы: выбросы парниковых и кислых газов получаются больше, если в анализе учитываются дополнительные процессы — транспортирование, пробоподготовка (обработка) отходов, сушка личинок и т. п. Но тем не менее, большинство исследователей показали, что утилизация органических отходов личинками *H. illucens* является более экологичной технологией, чем сценарии термического обезвреживания, захоронения на полигонах ТКО или компостирования [9; 20].

Таким образом, в настоящем исследовании было показано, что потенциал глобального потепления («углеродный след») был максимален при компостировании рыбных отходов (0,189 т CO₂-экв. на 1 т отходов) и минимален при их термическом обезвреживании в крематоре (0,015 т CO₂-экв.). При утилизации рыбных отходов личинками *H. illucens* вклад CO₂ в потенциал глобального потепления составлял 99,57 % (дыхание личинок и разложение субстрата). По сравнению с традиционными способами обращением с рыбными отходами, такими как компостирование или захоронение, их утилизация личинками *H. illucens* приводила к незначительным выбросам метана (0,005 т CO₂-экв.) и закиси азота (0,024 т CO₂-экв.), а выбросы оксидов азота, диоксида серы и оксида углерода отсутствовали. При термическом обезвреживании рыбных отходов наблюдался максимальный подкисляющий эффект — 3,712 кг SO₂-экв./кг вещества, при захоронении отходов на свалке ТКО выброс SO₂ и NO_x в атмосферный воздух составил 0,4 кг SO₂-экв./кг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Говор И.Л. Мониторинг выбросов парниковых газов в результате обращения с отходами и стоками на территории Российской Федерации / И.Л. Говор. — DOI: 10.21513/0207-2564-2017-1-18-40 // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. — 2017. — Т. 28. — № 1. — С. 18–40.
2. Харитонов Н.А. Углеродный след России: реалии и перспективы экономического развития / Н.А. Харитонов, Е.Н. Харитонов, В.Н. Пуляева. — DOI: 0.17073/2072-1633-2021-1-50-62 // Russian Journal of Industrial Economics. — 2021. — Т. 14. — № 1. — С. 50–62.
3. Никуличев Ю.В. Управление отходами. Опыт европейского союза / Ю.В. Никуличев // Аналитический обзор. — Сер. Социальные и экономические проблемы глобализации — 2017. — С. 1–55. — <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=45421433> (дата обращения: 29.06.2023).

4. Liu C. Comprehensive resource utilization of waste using the black soldier fly (*Hermetia illucens* (L.) (Diptera: Stratiomyidae) / C. Liu, C. Wang, H. Yao. — DOI: 10.3390/ani9060349 // *Animals*. — 2019. — V. 9. — № 6. — P. 349–367.
5. Da Silva G.D.P. A review of the use of black soldier fly larvae, *Hermetia illucens* (Diptera: Stratiomyidae), to compost organic waste in tropical regions / G.D.P. Da Silva, T. Hesselberg. — DOI: 10.1007/s13744-019-00719-z // *Neotropical entomology*. — 2020. — V. 49. — № 2. — P. 151–162.
6. Шайхиев И.Г. Использование пищевых отходов для выращивания личинок мухи *Hermetia Illucens* (краткий обзор зарубежной литературы) / И.Г. Шайхиев, С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, Е.С. Антюфеева. — DOI 10.37279/2519-4453-2020-4-17-30 // *Экономика строительства и природопользования*. — 2020. — Т. 4. — № 77. — С. 17–30.
7. Ярочкин А.П. Исследование основных процессов производства ферментированных кормовых продуктов из отходов рыбопереработки / А.П. Ярочкин, А.С. Помоз // *Изв. ТИНРО*. — 2012. — Т. 168. — С. 288–300.
8. Caruso G. Fishery wastes and by-products: a resource to be valorised // *J. Fisheries Sciences.com*. — 2015. — V. 9. — № 4. — P. 80–83.
9. Lopes C. Valorisation of fish by-products against waste management treatments — comparison of environmental impacts / C. Lopes, L.T. Antelo, A. Franco-Uría, A.A. Alonso, R. Pérez-Martín. — DOI. 10.1016/j.wasman.2015.08.017 // *Waste Management*. — 2015. — V. 46. — P. 103–112.
10. Cashion T. Global reduction fisheries and their products in the context of sustainable limits / T. Cashion, P. Tyedmers, R.W.R. Parker. — DOI: 10.1111/faf.12222 // *Fish and Fisheries*. — 2017. — V. 18. — № 6. — P. 1026–1037.
11. Hu Y. Effect of partial black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) larvae meal replacement of fish meal in practical diets on the growth, digestive enzyme and related gene expression for rice field eel (*Monopterus albus*) / Y. Hu, Y. Huang, T. Tang, L. Zhong, W. Chu, Z. Dai, K. Chen, Y. Hu. — DOI: 10.1016/j.aqrep.2020.100345 // *Aquaculture Reports*. — 2020. — V. 17. — P. 100345.
12. Sharma R. The impact of incinerators on human health and environment / R. Sharma, M. Sharma, R. Sharma, V. Sharma. — DOI: 10.1515/reveh-2012-0035 // *Rev. Environ. Health*. — 2013. — V. 28. — № 1. — P. 67–72.
13. Ермакова Н.А. Региональные проблемы утилизации отходов предприятий аквакультуры / Н.А. Ермакова, А.М. Малинин // *Наука и бизнес: пути развития*. — 2016. — № 6. — № 60. — С. 39–43.
14. Курганский Г.Н. Биологические и технические основы разведения лососей в Приморском крае / Г.Н. Курганский, В.Г. Марковцев // *Известия ТИНРО*. — 2005. — Т. 141. — С. 325–334.
15. English G. A review of advancements in black soldier fly (*Hermetia illucens*) production for dietary inclusion in salmonid feeds / G. English, G. Wanger, S.M. Colombo. — DOI: 10.1016/j.jafr.2021.100164 // *Journal of Agriculture and Food Research*. — 2021. — V. 5. — P. 100164.

16. Шайхиев И.Г. Использование биомассы личинок *Hermetia illucens* для выращивания рыб в аквакультуре (обзор зарубежной литературы) / И.Г. Шайхиев, С.В. Свергузова, Ж.А. Сапронова, Е.П. Даньшина. — DOI: 10.37663/0131-6184-2020-5-86-92 / Рыбное хозяйство. — 2020. — Т. 5. — С. 86–92.
17. Smetana S. Sustainable use of *Hermetia illucens* insect biomass for feed and food: attributional and consequential life cycle assessment / S. Smetana, E. Schmitt, A. Mathys. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2019.01.042 // Resources, Conservation and Recycling. — 2019. — V. 144. — P. 285–296.
18. Smáráson B.Ö. Life cycle assessment of icelandic arctic char fed three different feed types / B.Ö. Smáráson, Ó. Ögmundarson, J. Árnason, R. Björnsdóttir, B. Davíðsdóttir. — DOI: 10.4194/1303-2712-v17_1_10 // Turk. J. Fish. Aquat. Sci. — 2017. — V. 17. — № 1. — P. 79–90.
19. Le Feon S. Life cycle assessment of fish fed with insect meal: case study of mealworm inclusion in trout feed, in France / S. Le Feon, A. Thévenot, F. Maillard, C. Macombe, L. Forteau, J. Aubin. — DOI: 10.1016/j.aquaculture.2018.06.051 // Aquaculture. — 2019. — V. 500. — № 1. — P. 82–91.
20. Boakye-Yiadom K.A. Greenhouse gas emissions and life cycle assessment on the black soldier fly (*Hermetia illucens* L.) / K.A. Boakye-Yiadom, A. Ilari, D. Duca. — DOI: 10.3390/su141610456 // Sustainability. — 2022. — V. 14. — № 16. — P. 10456.
21. Коцюк Д.В. Искусственное воспроизводство тихоокеанских лососей в бассейне р. Амур: история, современное состояние, перспективы // Известия ТИНРО. — 2020. — Т. 200. — № 3. — С. 530–550.
22. Позднякова Ю.М. Некоторые биохимические показатели лососевых рыб бассейна озера Азабачье (Камчатка) / Ю.М. Позднякова, Н.Н. Ковалев, О.Ю. Бусарова, Е.В. Михеев // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2018. — № 46. — С. 95–100.
23. Bare J. TRACI 2.0: the tool for the reduction and assessment of chemical and other environmental impacts 2.0. — DOI: 10.1007/s10098-010-0338-9 // Clean Technologies and Environmental Policy. — 2011. — V. 13. — P. 687–696.
24. Ermolaev E. Greenhouse gas emissions from small-scale fly larvae composting with *Hermetia illucens* / E. Ermolaev, C. Lalander, B. Vinnerås. — DOI: 10.1016/j.wasman.2019.07.011 // Waste Management. — 2019. — V. 96. — P. 65–74.
25. Mertenat A. Black Soldier Fly biowaste treatment — assessment of global warming potential / A. Mertenat, S. Diener, C. Zurbrugg. — DOI: 10.1016/j.wasman.2018.11.040 // Waste Management. — 2019. — V. 84. P. 173–181.
26. Lindberg L. Process efficiency and greenhouse gas emissions in black soldier fly larvae composting of fruit and vegetable waste with and without pre-treatment / L. Lindberg, E. Ermolaev, B. Vinnerås, C. Lalander. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.130552 // Journal of Cleaner Production. — 2022. — V. 338. — P. 130552.
27. Pang W. Reducing greenhouse gas emissions and enhancing carbon and nitrogen conversion in food wastes by the black soldier fly / W. Pang, D. Hou, J. Chen, E.E. Nowar, Z. Li, R. Hu, S. Wang. — DOI: 10.1016/j.jenvman.2020.110066 // Journal of Environmental Management. — 2020. — V. 260. — P. 110066.

28. Van Huis A. The environmental sustainability of insects as food and feed. A review // A. Van Huis, D.G.A.B. Oonincx. — DOI: 10.1007/s13593-017-0452-8 // Agron. Sustain. Dev. — 2017. — V. 37. — P. 43.
29. Chen J. Effect of moisture content on greenhouse gas and NH₃ emissions from pig manure converted by black soldier fly / J. Chen, D. Hou, W. Pang, E.E. Nowar, J.K. Tomberlin, R. Hu, Q. Li. — DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.133840 // Science of the Total Environment. — 2019. — V. 697. — P. 133840.
30. Bosch G. Conversion of organic resources by black soldier fly larvae: legislation, efficiency and environmental impact / G. Bosch, H.H.E. Van Zanten, A. Zamproga, M. Veenenbos, N.P. Meijer, H.J. Van der Fels-Klerx, J.J.A. Van Loon. — DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.270 // Journal of Cleaner Production. — 2019. — V. 222. P. 355–363.

Gladun Igor Vladimirovich

Pacific National University, Khabarovsk, Russia
E-mail: 006209@pnu.edu.ru

Mayorova Ludmila Petrovna

Pacific National University, Khabarovsk, Russia
E-mail: 000318@pnu.edu.ru

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6326-982X>

RSCI: https://elibrary.ru/author_profile.asp?id=496438

SCOPUS: <https://www.scopus.com/authid/detail.url?authorId=56267059300>

Assessment of the carbon footprint of an aquaculture enterprise

Abstract. To ensure Russia's transition to an environmentally balanced development path, it is necessary to reduce anthropogenic pressure on the environment — to break economic growth and greenhouse gas emissions. The most significant sources of greenhouse gas emissions, in addition to industrial production, include the disposal and thermal treatment of waste generated in the fishing and fish processing industries. It is estimated that the amount of fish waste generated can be as high as 50 % of the catch or 50–75 % of the processed fish. Numerous studies are currently underway on the bioconversion of fish waste by black soldier fly larvae (*Hermetia illucens*), both to reduce greenhouse gas emissions and to produce fish feed for aquaculture enterprises. The article presents the results of a study of a comparative analysis of four different scenarios (utilization, composting, incineration and disposal) for greenhouse and acid gas emissions from the management of fish waste generated as a result of the operation of the Anyui fish hatchery. It is shown that the global warming potential was maximum when waste was composted (0.189 t CO₂-eq. per 1 t of waste) and minimal when it was thermally decontaminated in a cremator (0.015 t CO₂-eq.). During the disposal of fish waste by *H. illucens* larvae, the contribution of CO₂ to the global warming potential was 99.57 %, emissions of methane (0.005 t CO₂-eq.) and nitrous oxide (0.024 t CO₂-eq.) were insignificant and significantly lower compared to other processing scenarios. Emissions of nitrogen oxides, sulfur dioxide, and carbon monoxide during utilization by *H. illucens* larvae were absent. During the thermal treatment of fish waste, the maximum acidifying effect was observed — 3.712 kg SO₂-eq./kg of substance; during the disposal of waste at the MSW landfill, the emission of SO₂ and NO_x amounted to 0.4 kg SO₂-eq./kg.

Keywords: aquaculture; carbon footprint; greenhouse gases; fish waste; recycling; industry; emissions