

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УТИЛИЗАЦИИ ДОННЫХ ОТЛОЖЕНИЙ РЫБОВОДНЫХ ФЕРМ ЕВРОПЕЙСКОГО СЕВЕРА РОССИИ В СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЦЕЛЯХ

Е. Н. Икконен¹, И. О. Луконин², Т. Н. Попова¹, О. Н. Бахмет¹

¹ Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)

² ПАО INARCTICA (Мурманск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 23 декабря 2025 г.

Для цитирования

Икконен Е. Н., Луконин И. О., Попова Т. Н., Бахмет О. Н. Оценка возможности утилизации донных отложений рыбоводных ферм Европейского Севера России в сельскохозяйственных целях // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 3. — С. 430—438. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-3-430-438.

*Исследовали влияние внесения в агропочву донных отложений рыбоводного хозяйства территории Европейского Севера России на ростовые признаки листового салата (*Lactuca sativa* L.) с целью выявления последствий для растений утилизации отложений на сельскохозяйственных угодьях. Исследование не выявило негативного воздействия отложений аквакультуры на накопление растениями биомассы, возможно, из-за отсутствия токсичной нагрузки по тяжелым металлам и металлоидам. Отложения способствовали повышению относительной скорости роста листьев, показателя, экологически значимого и важного для продуктивности растений.*

Ключевые слова: аквакультура, форелеводство, управление отходами, растения, риски и угрозы.

Введение

Поскольку Арктическая зона России обладает значительным потенциалом для развития фермерских рыбоводных хозяйств, аквакультура данной территории находится на стадии активного роста. Европейский Север страны является в этом отношении перспективным регионом, располагающим значительным водным фондом [1]. Перспективы развития аквакультуры в Арктической зоне Европейской России определяются широким спектром объектов культивирования, возможностью формирования прибрежных биоценозов, большим количеством естественных биотопов, пригодных для использования аквафермами [1], а также длинным световым днем, оптимальными температурами и значительными запасами чистой воды [2]. Разви-

тие холодноводного индустриального рыбоводства, преимуществом которого является возможность круглогодичного культивирования рыбы, считается наиболее пригодным для данной территории [3].

В Республике Карелия, Мурманской и Архангельской областях сосредоточены рыбоводные фермы, специализирующиеся в основном на выращивании лосося и форели, но также других премиальных видов рыб, для которых северные воды наиболее подходят для активного роста и воспроизводства. В настоящее время в Карелии действует около 60 аквакультурных хозяйств, культивирующих преимущественно радужную форель, которой подходят как пресные озерные воды, так и опресненные морские [4]. Наличие объективного экономического тренда на северную аквакультуру создали возможности успешного развития данного вида промышленности в российской Арктике. Например, одно из

Таблица 1. Содержание элементов минерального питания и кислотность (pH) использованной в исследовании почвы [11]**Table 1. Nutrient content and acidity (pH) of the soil used in the study [11]**

Общий С, %	Общий N, %	P ₂ O ₅ , мг/кг	K ₂ O, %	CaO, %	MgO, %	pH _{ксл}
19,6	1,45	72,0	0,75	4,72	0,84	6,63

крупнейших в России предприятий аквакультуры INARCTICA нацелено на обеспечение полного цикла аквакультурной индустрии — от выпуска кормов и разведения мальков до производства рыбной продукции. Помимо обеспечения населения рыбой и работой, аквакультура способствует восстановлению популяции диких видов, составляя конкуренцию рыболовству и ограничивая браконьерство [5].

Однако аквакультурные хозяйства неизбежно оказывают определенное воздействие на среду обитания из-за попадания в водоемы продуктов жизнедеятельности рыб, кормов, удобрений, лекарств и химических веществ, применяемых для обеззараживания и чистки используемых конструкций [6], что приводит к накоплению на дне водоема осадка. Увеличенный нисходящий поток органического вещества может стимулировать анаэробную минерализацию и образование сульфидов в донных отложениях, способствуя снижению содержания кислорода в воде, а также накоплению избыточных концентраций аммиака и нитритов, которые, как правило, токсичны для выращиваемой рыбы и могут привести к снижению её продуктивности [7]. В северных регионах с более низкими температурами воды минерализация донного органического вещества происходит медленно, поэтому отходы аквакультуры могут не успевать трансформироваться, что приводит к изменению качества воды и даже трофического статуса водоемов [2]. Постоянное накопление рыбных отложений приводит к уменьшению глубины под садками, с чем связано ухудшение условий, необходимых для здоровой жизнедеятельности рыб, и, как следствие, со снижением экономической эффективности аквакультуры. Поскольку загрязнение среды ухудшает условия обитания рыб, рыбоводы заинтересованы в минимизации концентраций загрязняющих веществ. Одним из основных способов избежать негативных последствий является периодическое удаление накопленных отложений из-под рыбных садков [8]. Бесконтрольное хранение извлеченных отложений на прилегающих территориях может приводить к их негативному воздействию на окружающую среду и способствовать изменению или деградации ландшафта, в том числе за счет эвтрофикации поверхностных вод и загрязнения грунтовых вод нитратами. Поэтому, заботясь об окружающей среде и эффективно используя природные ресурсы, следует утилизировать донные отложения рыбоводных хозяйств с учетом экономической целесообразности процесса.

Показано, что донные отложения, удаленные при очистке водоемов на рыбоводных фермах, богаты органическим веществом, азотом и фосфором, накопленными в процессе аквакультуры, поэтому сельскохозяйственное использование рассматривается как один из способов применения отложений [9]. Органическое вещество, присутствующее в отложениях аквакультуры, может использоваться в качестве почвенного кондиционера и улучшать функциональные свойства почвы, а азот и фосфор могут повышать доступность элементов питания для растений. Ряд исследований показал как положительные, так и нейтральные эффекты внесения отложений аквакультуры на сельскохозяйственные почвы и растения [8], однако существуют исследования, сообщающие об определенных рисках, связанных с этой технологией [10]. Поэтому необходима тщательная оценка эффекта донных отложений аквакультуры на сельскохозяйственные растения при их утилизации на сельскохозяйственных угодьях. В связи с вышесказанным в задачу данного исследования входило определение реакции культурного вида (*Lactuca sativa* L.) на внесение отложений, основываясь на данных относительной скорости роста и нетто-ассимиляции сухого вещества растениями.

Материалы и методы

Отбор торфяной почвы, использованной в модельном опыте, был произведен из пахотного слоя экспериментальных полей сельскохозяйственной станции Карельского научного центра РАН. Свойства почвы представлены в табл. 1. Высушенная на воздухе почва была просеяна через сито с размером ячейки 2 мм.

Донные отложения из-под садков для радужной форели были отобраны на участках рыбоводного хозяйства INARCTICA на озере Сегозеро. Отложения были собраны с помощью грейфера Ван Веена и подняты во время процедуры очистки в апреле 2025 г. Содержание углерода и макроэлементов в отложениях, а также их кислотность представлены в табл. 2. Ранее не было обнаружено высоких уровней содержания тяжелых металлов и металлоидов в отложениях данного хозяйства и территории отбора (табл. 3).

Донные отложения рыбоводного хозяйства были внесены в почву в соотношениях 0:1, 1:10, 1:7, 1:5 (отложения:почва), тщательно перемешаны и инкубированы при 70—80% максимальной влагоемкости почвы и температуре воздуха 22±1°C в течение 60 дней с периодическим перемешиванием. Исполь-

Таблица 2. Содержание элементов минерального питания и кислотность (pH) использованных в исследовании донных отложений аквакультуры [11]

Table 2. Nutrient content and acidity (pH) of aquaculture sediment used in the study [11]

Общий С, %	Общий N, %	P ₂ O ₅ , mg kg ⁻¹	K ₂ O, %	CaO, %	MgO, %	pH _{ккл}
1,77	0,11	1215	1,46	2,14	0,61	6,64

Таблица 3. Содержание тяжелых металлов и металлоидов в донных отложениях аквакультуры, использованных в данном исследовании [11]

Table 3. Trace element content in aquaculture sediment used in the study [11]

Элемент	Содержание, мг/кг
Mn	202
Cu	9
Zn	36
Mo	0,68
Ni	9
Co	3
Si	35,2
Al	56,3
V	33,1
Ti	1,4
Pb	11
Cd	0,22
Cr	27
Tl	0,12
Bi	0,04
Y	7
W	0,1
U	1,2
Se	0,0
Sb	0,1
Te	0,03

зованные дозы внесения отложений были выбраны в серии предварительных экспериментов. После периода инкубации почвенные субстраты были вложены в сосуды объемом 0,8 л, в которые высевали пророщенные семена листового салата (*Lactuca sativa* L.). Растения выращивали в условиях вегетационного эксперимента при регулярном поливе и при естественном освещении и температуре воздуха в июне-июле 2025 г. Каждый опытный вариант

(0:1, 1:10, 1:7, 1:5) включал 9 сосудов с четырьмя растениями в каждом. Отбор надземной и подземной биомассы салата осуществляли на 14-е, 30-е и 46-е сутки после посева растений, используя по три сосуда каждого опытного варианта. Корневую систему тщательно отмывали от почвы и растение разделяли на корень, стебель и листья. Площадь листьев измеряли сканированием и рассчитывали с использованием программного обеспечения AreaS (Россия). Органы растений высушивали при 70°C до постоянного веса и взвешивали.

Абсолютную скорость роста (absolute growth rate — AGR) корней, стеблей и листьев рассчитывали по формуле

$$AGR = \frac{W_2 - W_1}{t_2 - t_1},$$

где W_1 и W_2 — сухая биомасса в моменты времени t_1 и t_2 .

Относительную скорость роста (relative growth rate — RGR) рассчитывали по формуле

$$RGR = \frac{\ln W_2 - \ln W_1}{t_2 - t_1}.$$

Чистую скорость ассимиляции (net assimilation rate — NAR) интактного растения определяли по формуле

$$NAR = \frac{AGR (\ln A_2 - \ln A_1)}{(A_2 - A_1)},$$

где A_2 и A_1 — площадь листьев в моменты времени t_2 и t_1 .

Данные представлены как среднее значение и стандартная ошибка по шести повторностям. Для оценки достоверности различий между средними величинами использовался критерий LSD при уровне значимости $p < 0,05$ (программное обеспечение Statistica, версия 8.0.550.0, StatSoft, Inc., Талса, Оклахома, США).

Результаты и обсуждение

В процессе роста листового салата визуально не наблюдали различий между опытными вариантами в накоплении растениями биомассы, а также признаков угнетения или повреждения листьев в виде хлороза или некроза (рис. 1).

Статистический тест не выявил значимого влияния ($p > 0,05$) донных отложений на накопление сухой



Рис. 1. Растения *Lactuca sativa* возраста 14 (а) и 30 (б) суток после посадки при выращивании на почве, содержащей донные отложения аквакультуры в соотношениях 0:1, 1:10, 1:7 и 1:5 (отложения:почва)

Fig. 3. *Lactuca sativa* plants on the 14th (a) and 30th (b) day after planting when grown on the soil containing aquaculture sediments in the ratio of 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) and 1:5 (4) (sediment:soil)

биомассы в органах *L. sativa*. Независимо от того, на какой день после посева измеряли биомассу листьев и корней растений, их значения не различались достоверно между опытными вариантами (рис. 2а и 2в). Формирование у листового салата стеблей начина-

лось не ранее чем через 14 сут после посадки (рис. 2б). Тогда как к 30-м сут после посева накопление биомассы в стеблях растений не отреагировало на внесение в почву отложений аквакультуры, у растений возраста 46 сут проявились различия между вариантами в массе стеблей. Внесение отложений снижало этот параметр, но достоверные различия были выявлены только между вариантами 0:1 и 1:7. Тенденция к снижению сухой биомассы 46-дневных растений *L. sativa* под влиянием внесения отложений наблюдалась и на уровне интактного растения (рис. 2г), однако статистический тест не выявил достоверность данного снижения ($p > 0,05$). Донные отложения аквакультуры также не оказали существенного влияния на долю органов в общей биомассе растений независимо от внесенной дозы.

На 14-й день после посева наименьшую среди всех исследованных вариантов площадь листьев сформировали растения варианта 1:10 (табл. 4). Но в процессе роста салата данные различия нивелировались и к 30-му дню после посева растения

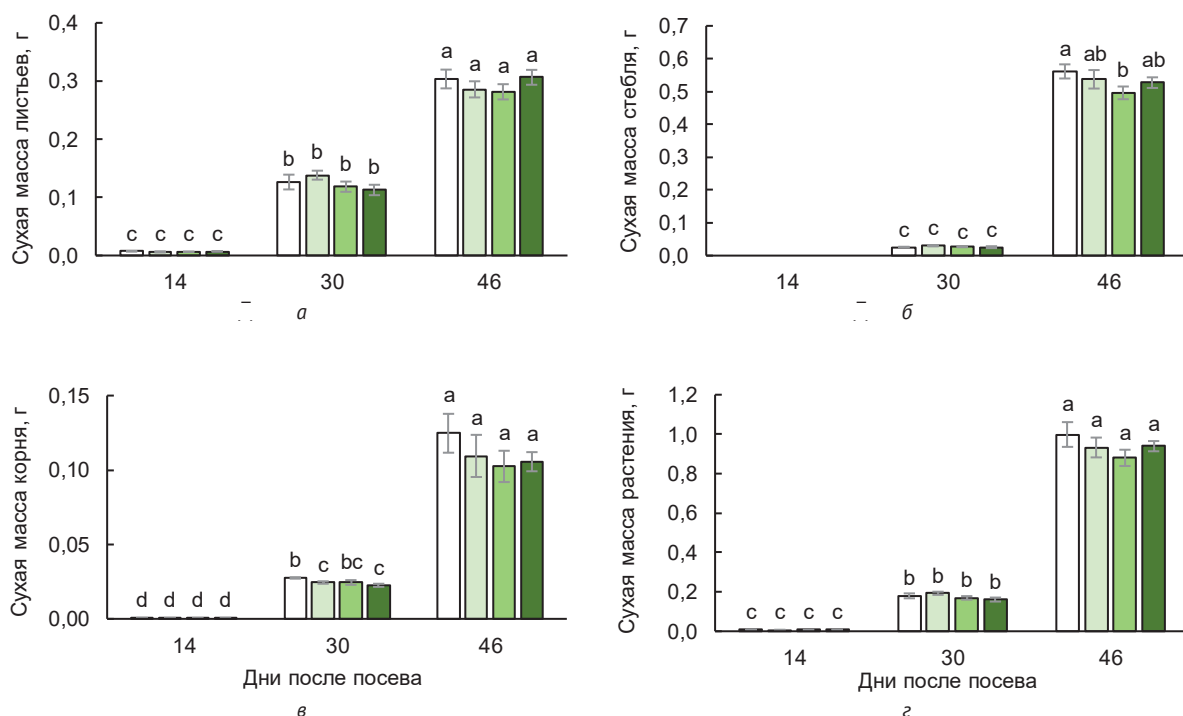


Рис. 2. Сухая биомасса листьев (а), стебля (б), корня (в) и общая биомасса (г) растений *Lactuca sativa* при выращивании на почве, содержащей донные отложения аквакультуры в соотношениях 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) и 1:5 (4) (отложения:почва). Различные буквы указывают на достоверность различий средних значений при $p < 0,05$

Fig. 1. Dry biomass of leaves (a), stems (б), roots (в) and total biomass (г) of *Lactuca sativa* plants grown on soil containing aquaculture sediments in the ratio of 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) and 1:5 (4) (sediment:soil). Different letters indicate significant differences in mean values at $p < 0,05$

Таблица 4. Общая площадь листьев *Lactuca sativa* при выращивании на почве, содержащей донные отложения рыбоводных ферм в соотношении 0:1, 1:10, 1:7 и 1:5 (отложения:почва)

Table 4. Total leaf area of *Lactuca sativa* when grown on soil containing fish farm sediments in the ratios of 0:1, 1:10, 1:7 and 1:5 (sediment:soil)

Площадь листьев, см ²	0:1	1:10	1:7	1:5
14 дней после посева	24±2 ^{ab}	19±2 ^b	27±3 ^a	22±2 ^{ab}
30 дней после посева	118±11 ^a	123±17 ^a	104±11 ^a	102±9 ^a
46 дней после посева	190±15 ^b	249±16 ^a	233±12 ^a	246±19 ^a

Примечание. Различные буквы указывают на достоверность различий средних значений.

Note. Different letters indicate significant differences between the means.

варианта 1:10 даже превышали контроль (вариант без отложений 1:0) по площади листьев. К 46-м сут в вариантах 1:10, 1:7 и 1:5 площадь листьев была выше, чем в варианте 0:1, соответственно на 31%, 23% и 29%, что отражает значимое влияние отложений аквакультуры на повышение площади листовой пластинки *L. sativa*.

Ранее были показаны как положительные [9; 12], так и отрицательные [13] эффекты внесения донных отложений аквакультуры на накопление растениями биомассы. Наше исследование не выявило негативного влияния отложений на продуктивность салата. Различия в отклике культурных видов на внесение отложений могут быть связаны с составом и свойствами отложений, которые, как было определено ранее, могут различаться в зависимости от типа водоема, системы аквакультуры, режима кормления рыб, геологии, климата местности и т. д. [8]. Содержание в донных отложениях потенциально токсичных микроэлементов может быть ответственно за негативный эффект на культурные виды [10; 14], что, разумеется, препятствует их утилизации и использованию в сельскохозяйственных целях. Поэтому необходима тщательная оценка потенциала донных отложений рыбоводных ферм различных водоемов, климатических и геологических зон при их утилизации на сельскохозяйственных землях. В донных отложениях аквакультуры на озере Сегозеро, использованных в данном исследовании, не обнаружено повышенных концентраций тяжелых металлов и металлоидов (см. табл. 3), что позволяет считать их в этом отношении безопасными. Можно предположить, что внесение отложений может даже улучшить качество почвы, поскольку содержит значительное количество фосфора (см. табл. 2), являющего важным элементом минерального питания растений.

Опосредованное отложениями повышение площади листьев отражает определенные структурные изменения, связанные, вероятно, с разрастанием эпидермиса и мезофилла, а также развитием проводящих пучков. Учитывая, что биомасса листьев не изменялась при внесении в почву отложений, можно предположить, что повышение площади листьев со-

проводилось снижением их толщины или плотности, обеспечивая лучшую доступность углекислого газа фотосинтезирующим тканям. Кроме того, формирование широких и тонких листовых пластинок обеспечивает растение большим захватом поступающего света, повышая тем самым их фотосинтетический и ростовой потенциал [15]. Увеличение доступности питательных веществ может быть одной из причин повышения доли площади листьев в биомассе растения [15]. Возможно, улучшение химических свойств почвы, прежде всего за счет увеличения

содержания фосфора, которым богаты отложения (табл. 2), способствовало структурным изменениям в листьях салата, приводящим к увеличению их площади. Нельзя исключить также, что внесение отложений аквакультуры приводило к улучшению физических свойств почвы, таких как насыщенность кислородом, водо- и теплопроводность, способность удерживать воду, оказывая тем самым благоприятное воздействие на растения. Однако для подтверждения данного предположения необходимы дальнейшие исследования.

В нашей работе мы стремились выявить реакцию культурного вида растений на внесение донных отложений рыбоводной фермы в почву для понимания возможности их утилизации в сельскохозяйственных целях. Относительная скорость роста RGR считается важным показателем продуктивности растений и имеет первостепенное значение в экологии растений из-за значимого влияния на их рост, развитие и размножение [16]. Потенциальные оценки RGR позволяют анализировать влияние окружающей среды и питания на рост растений [17], поэтому данный параметр, показывающий скорость накопления биомассы растениями относительно начальной, был использован нами для изучения отклика растений на внесение в почву отложений аквакультуры.

Относительная скорость роста корней была выше, чем листьев и стеблей, соответственно на 24% и 12% (рис. 3). Тогда как RGR стеблей не изменялась с ростом растений, RGR листьев и корней снижалась по мере их старения. Временная изменчивость RGR, выявленная в этом исследовании, подтверждает показанную ранее динамичность величины RGR [18; 19]. Наблюдаемое снижение относительной скорости роста по мере старения растений может быть объяснено онтогенетическими изменениями и более высоким распределением ресурсов в низкоэффективные ткани [20] или временными изменениями скорости чистой ассимиляции углерода NAR [21].

Внесение в почву отложений рыбоводных ферм не влияло на относительную скорость роста корней и стеблей *L. sativa* независимо от возраста растений (см. рис. 3б и 3в), но повышало RGR ли-

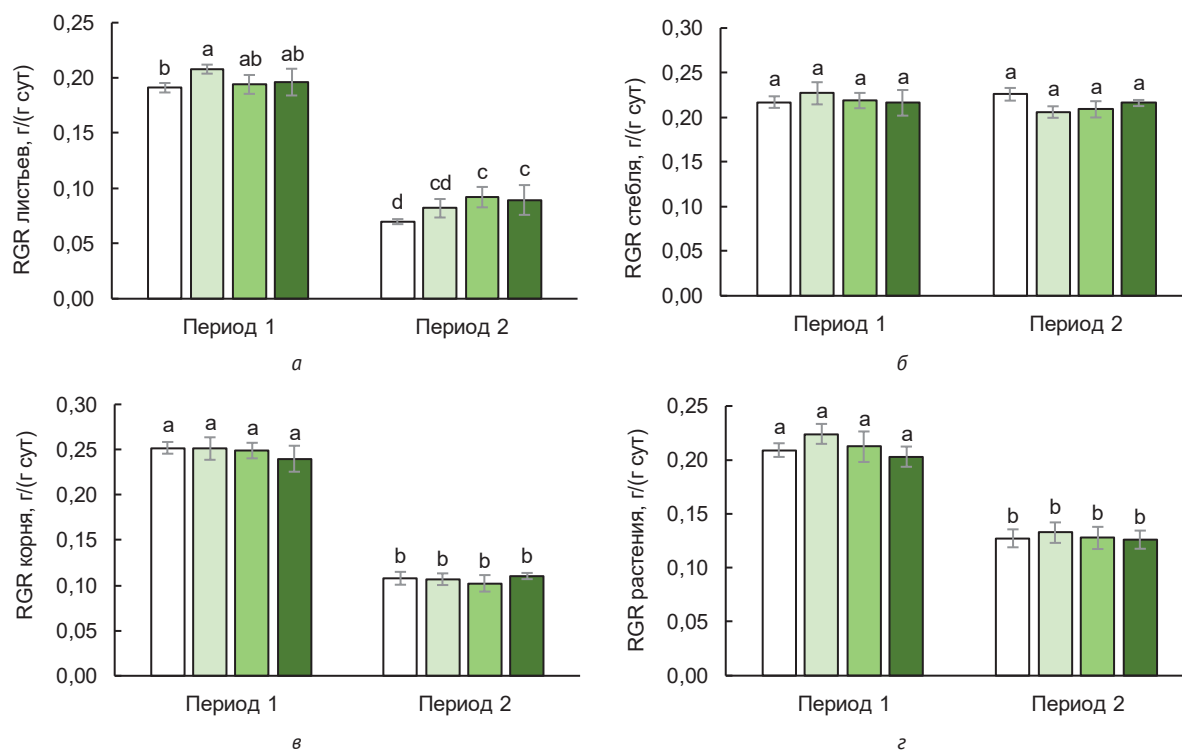


Рис. 3. Относительная скорость роста (RGR) листьев (а), стебля (б), корня (в) и интактного растения *Lactuca sativa* при выращивании на почве, содержащей донные отложения аквакультуры в соотношениях 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) и 1:5 (4) (отложения:почва). «Период 1» означает рост растений с 14 по 30 сут после посева, «Период 2» означает рост растений с 30 по 46 сут после посева. Различные буквы указывают на достоверность различий средних значений при $p < 0,05$

Fig. 3. Relative growth rate (RGR) of leaves (а), stems (б), roots (в) and intact *Lactuca sativa* plants grown on soil containing aquaculture sediments in the ratio of 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) and 1:5 (4) (sediment:soil). «Период 1» means plant growth from 14 to 30 days after sowing, «Период 2» means plant growth from 30 to 46 days after sowing. Different letters indicate significant differences in mean values at $p < 0,05$

стей как на ранней, так и более поздней стадиях развития, хотя не для всех вариантов данные повышения были подтверждены статистическим анализом (см. рис. 3а). Максимальное повышение RGR листьев достигалось у листового салата возраста 30—46 сут при внесении отложений в соотношении 1:7 (отложения:почва). При этом не выявлено достоверного влияния ($p > 0,05$) отложений аквакультуры на целое растение (см. рис. 3в).

Изменчивость RGR тесно связана с физиологическими и морфологическими характеристиками растений [22]. В ответ на изменяющиеся условия окружающей среды растительному организму необходимо адаптировать свои физиологические и/или морфологические признаки для поддержания или даже повышения относительной скорости роста и продуктивности. Основными компонентами RGR считаются площадь листьев на единицу массы растения, доля листьев в биомассе целого растения, а также величина NAR. Ранее определено, что изменения относительной скорости роста могут быть обусловлены изменением одного или нескольких компонентов, а скорость роста растения зависит прежде всего от структуры и функциональной активности листьев [23; 24]. Некоторые исследования подчеркивают важную роль в повышении продуктивности растений такого морфологического параметра, как

удельная площадь листьев [18; 23]. Другие исследования указывают на приоритет физиологических компонентов, таких как NAR, которая напрямую характеризует чистую ассимиляционную активность растения и зависит от интенсивности фотосинтеза, дыхания и соотношения фотосинтетических и нефотосинтетических органов [24]. Наше исследование не выявило изменения величины NAR у листового салата под воздействием отложений аквакультуры независимо от возраста растений (рис. 4), что отражает отсутствие явно выраженных физиологических преобразований у растений, способных вызвать изменение относительной скорости их роста.

Величина NAR тесно связана с такими физиологическими процессами, как фотосинтез и дыхание, которые реагируют на изменения окружающей среды быстрее, чем процессы, приводящие к структурным преобразованиям у растений. Несмотря на большую пластичность NAR по сравнению с морфологическими признаками [24], внесение в почву отложений аквакультуры способствовало в большей степени структурным, чем физиологическим преобразованиям у листового салата.

Выводы

Интенсификация рыбоводства на Европейском Севере России требует мер по предотвращению

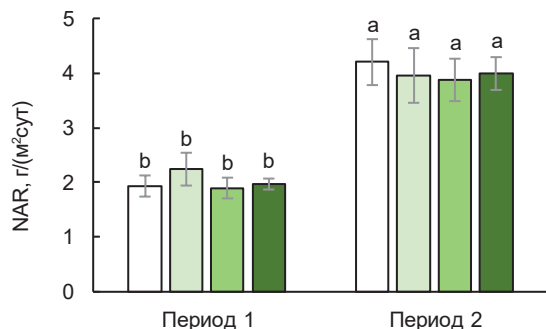


Рис. 4. Скорость нетто ассимиляции NAR растениями *Lactuca sativa* при выращивании на почве, содержащей донные отложения аквакультуры в соотношениях 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) и 1:5 (4) (отложения:почва). Различные буквы указывают на достоверность различий средних значений при $p < 0,05$

Fig. 3. Net assimilation rate (NAR) of *Lactuca sativa* plants grown on soil containing aquaculture sediments in the ratio of 0:1 (1), 1:10 (2), 1:7 (3) and 1:5 (4) (sediment:soil). Different letters indicate significant differences in mean values at $p < 0,05$

экологических рисков, связанных с этой деятельностью. Поскольку верхний слой донных отложений под садками регулярно удаляется для уменьшения загрязнения воды отходами рыболовных хозяйств, эффективная утилизация этих отложений имеет решающее значение. Одним из обсуждаемых способов утилизации является возможность внесения отложений в сельскохозяйственные почвы. В данном исследовании мы стремились выяснить, как добавление донных отложений аквакультуры в агропочву влияет на рост листового салата. В целом исследование не выявило негативного воздействия отложений на накопление растениями биомассы, возможно, из-за отсутствия токсичной нагрузки тяжелыми металлами и металлоидами. Отложения способствовали повышению относительной скорости роста листьев, экологически значимого и важного для продуктивности растений показателя. Нельзя исключить, что данное влияние связано с повышением доступности фосфора при внесении отложений в почву. Опосредованная отложениями активизация относительной скорости роста листьев салата была связана в большей степени со структурными, чем с физиологическими преобразованиями в растениях.

Таким образом, исследование не отвергло возможность утилизации отложений аквакультуры из водоемов Европейского Севера России на сельскохозяйственных землях. Они могут частично заменить традиционные дорогостоящие удобрения и быть потенциально подходящим субстратом для экологически чистого сельскохозяйственного использования. Однако в дальнейшем необходимо продолжать оценки наличия в отложениях поллютантов широкого спектра помимо тяжелых металлов и металлоидов. Последствия долгосрочного использования отложений аквакультуры в сельском хозяйстве и потенциальный риск накопления загрязняющих веществ при длительном применении отложений также заслуживают дальнейшего изучения. Кроме

того, для расширения понимания возможности утилизации отложений аквакультуры на сельскохозяйственных территориях в дальнейшие исследования должны быть вовлечены другие типы почв, включая менее плодородные.

Финансирование

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда (проект № 25-16-00264) «Перспективы использования донных отложений рыболовных хозяйств северных регионов России для повышения плодородия почв и урожайности агрокультур».

Благодарность

Авторы выражают признательность компании INARCTICA (Мурманск, Россия) и Центру коллективного пользования Карельского научного центра РАН за содействие исследованию.

Литература/References

1. Никандров В. Я., Павлисов А. А., Шиндавина Н. И. и др. Арктический голец (*Salvelinus alpinus* L.) — перспективный объект для аквакультуры севера России // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 137—143. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-137-143.
2. Nikandrov V. Ya., Pavlisov A. A., Schindavina N. I., Lukin A. A., Golod V. M., Lipatova M. I. Arctic char (*Salvelinus alpinus* L.) — a perspective aquaculture object for the North of Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 3 (31), pp. 137—143. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-137-143. (In Russian).
3. Стерлигова О. П., Кучко Я. А., Савосин Е. С., Ильмаст Н. В. Перспективы выращивания объектов аквакультуры в озерах Карелии // Вopr. рыболовства. — 2019. — № 2 (20). — С. 216—224. — DOI: 10.36038/0234-2774-2019-20-2-216-224.
4. Sterligova O. P., Kuchko Ya. A., Savosin E. S., Ilmast N. V. Prospects of cultivation of aquaculture objects in the lakes of Karelia. Voprosi ribolovstva [Problems of fisheries], 2019, no. 20, pp. 216—224. DOI: 10.36038/0234-2774-2019-20-2-216-224. (In Russian).
5. Лукин А. А., Богданова В. А., Костюничев В. В., Королев А. Е. Prospects for the development of aquaculture in the Western Arctic zone of the Russian Federation // Арктика: экология и экономика. — 2016. — № 4 (24). — С. 100—108.
6. Lukin A. A., Bogdanova V. A., Kostunich V. V., Korolev A. E. Prospects for the development of aquaculture in the Western Arctic zone of the Russian Federation. Arctic: Ecology and Economy, 2016, no. 4 (24), pp. 100—108. (In Russian).
7. Павленко В. И., Новоселов А. П., Студенов И. И. и др. Перспективные направления пресноводной аквакультуры на европейском севере России // Арктика: экология и экономика. — 2017. — № 2 (26). — С. 105—116.
8. Pavlenko V. I., Novoselov A. P., Studenov I. I. et al. The perspective directions of the fresh-water aquaculture

- in the European North of Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2017, no. 2 (26), pp. 105—116. (In Russian).
5. Павлов Д. С., Махров А. А. Аквакультура и ее влияние на дикие популяции лососевых // Рыболовство и рыбоводство. — 2022.
- Pavlov D. S., Maxrov A. A. Aquaculture and its impact on wild salmon populations. Ribolovstvo i ribovodstvo [Fishing and fish farming], 2022. (In Russian).
6. Weir L. K., Grant J. W. A. Effects of aquaculture on wild fish populations: a synthesis of data. Environmental Reviews, 2005, vol. 13, pp. 145—168. Available at: <https://doi.org/10.1139/a05-012>.
7. Sipaúba-Tavares L., Millan R., Amaral A. Influence of Management on the Water Quality and Sediment in Tropical Fish Farm. J. Water Resour. Prot., 2013, vol. 5, pp. 495—501. Available at: <https://doi.org/10.4236/jwarp.2013.55049>.
8. Drózd D., Malińska K., Kacprzak M., Mrowiec M., Szczypiór A., Postawa P., Stachowiak T. Potential of Fish Pond Sediments Composts as Organic Fertilizers. Waste Biomass Valor., 2020, vol. 11, pp. 5151—5163. Available at: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01074-6>.
9. Luo Z., Zhang Z., Guo Y., Lv L., Chen D., Duan J. Effects of Fish Pond Sediment on Quality of Saline-Alkali Soil and Some Vegetables: Water Spinach, Lettuce, and Chili. Agronomy, 2025, vol. 15, p. 1670. Available at: <https://doi.org/10.3390/agronomy15071670>.
10. Szara M., Baran A., Klimkowicz-Pawlas A., Tar-nawski M. Ecotoxicological characteristics and ecological risk assessment of trace elements in the bottom sediments of the Rożnów reservoir (Poland). Ecotoxicology, 2020, vol. 29, pp. 45—57. Available at: <https://doi.org/10.1007/s10646-019-02137-8>.
11. Ikkonen E., Lukonin I., Repkina N., Batova Y., Antonova E., Evstratova L., Tkachenko Y., Popova T., Nesterov G., Bakhmet O. Effect of aquaculture sediment on soil properties and lettuce growth. Eurasian Soil Science, 2026, vol. 59 (3). In press.
12. Scherwietes E., Stein M., Six J., Bawen T. K., Schaller J. Local sediment amendment can potentially increase barley yield and reduce the need for phosphorus fertilizer on acidic soils in Kenya. Front. Environ. Sci., 2024, vol. 12, p. 1458360. Available at: <https://doi.org/10.3389/fenvs.2024.1458360>.
13. Szara-Bąk M., Baran A., Klimkowicz-Pawlas A. Recycling of bottom sediment to agriculture: effects on plant growth and soil properties. J. Soils Sediments, 2023, vol. 23, pp. 539—551. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11368-022-03363-0>.
14. Kalantzi I., Shimmield T. M., Pergantis S. A., Papa-georgiou N., Black K. D., Karakassis I. Heavy metals, trace elements and sediment geochemistry at four Mediterranean fish farms. Sci. Tot. Env., 2013, vol. 444, pp. 128—137. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.11.082>.
15. Poorter H., Remkes C. Leaf area ratio and net assimilation rate of 24 wild species differing in relative growth rate. Oecologia, 1990, vol. 83, pp. 553—559. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00317209>.
16. Halsey K. H., Milligan A. J., Behrenfeld M. J. Physiological optimization underlies growth rate-independent chlorophyll-specific gross and net primary production. Photosynth. Res., 2010, vol. 103, pp. 125—137. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11120-009-9526-z>.
17. Loveys B. R., Scheurwater I., Pons T. L., Fitter A. H., Atkin O. K. Growth temperature influences the underlying components of relative growth rate: An investigation using inherently fast- and slow-growing plant species. Plant Cell Environ., 2002, vol. 25, pp. 975—988. Available at: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00879.x>.
18. Poorter H., Pothmann P. Growth and carbon economy of a fast-growing and slow-growing grass species as dependent on ontogeny. New Phytol., 1992, vol. 120, pp. 159—166. Available at: <https://doi.org/10.1007/BF00010275>.
19. Hunt R. Relative growth rates. Basic Growth Analysis. Dordrecht, Springer, 1990. Available at: https://doi.org/10.1007/978-94-010-9117-6_3.
20. Villar R., Marañón T., Quero J. L., Lambers H. Variation in relative growth rate of 20 Aegilops species (Poaceae) in the field: The importance of net assimilation rate or specific leaf area depends on the time scale. Plant Soil, 2005, vol. 272, pp. 11—27. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11104-004-3846-8>.
21. Shipley B. Plasticity in relative growth rate and its components following a change in irradiance. Plant Cell Environ., 2000, vol. 23, pp. 1207—1216. Available at: <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00635.x>.
22. Gent M. P. Factors Affecting Relative Growth Rate of Lettuce and Spinach in Hydroponics in a Greenhouse. HortScience, 2017, vol. 52, pp. 1742—1747. Available at: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI12477-17>.
23. Lambers H., Poorter H. Inherent variation in growth rate between higher plants: A search for physiological causes and ecological consequences. Adv. Ecol. Res., 1992, vol. 23, pp. 187—261. Available at: [https://doi.org/10.1016/S0065-2504\(08\)60148-8](https://doi.org/10.1016/S0065-2504(08)60148-8).
24. Veenendaal E., Swaine M., Lecha R., M., Abebrese I., Owusu-Afriyie K. Responses of West African forest tree seedlings to irradiance and soil fertility. Funct. Ecol., 1996, vol. 10, pp. 501—511. Available at: <https://doi.org/10.2307/2389943>.

Информация об авторах

Икконен Елена Николаевна, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт биологии Карельского научного центра РАН (185010, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11), e-mail: likkonen@gmail.com.

Луконин Илья Олегович, биолог, ПАО INARCTICA (184371, Россия, Мурманская область, Кольский район, село Ура-Губа, Рыбачья ул., д. 45/2).

Попова Татьяна Николаевна, аспирант, Отдел комплексных научных исследований Карельского научного центра РАН (185010, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11).

Бахмет Ольга Николаевна, доктор биологических наук, член-корреспондент РАН, генеральный директор Карельского научного центра РАН (115191, Россия, Петрозаводск, Пушкинская ул., д. 11).

ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF USING BOTTOM SEDIMENTS FROM FISH FARMS IN THE EUROPEAN NORTH OF RUSSIA FOR AGRICULTURAL PURPOSES

Ikkonen, E. N.¹, Lukonin, I. X.², Popova, T. N.¹, Bakhmet, O. N.¹

¹ Multidisciplinary Scientific Research Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (Petrozavodsk, Russian Federation)

² PJSC INARCTICA Company (Murmansk, Russian Federation)

For citing

Ikkonen E. N., Lukonin I. O., Popova T. N., Bakhmet O. N. Assessment of the possibility of using bottom sediments from fish farms in the European North of Russia for agricultural purposes. *Arctic: Ecology and Economy*, 2026, vol. 16, no. 3, pp. 430—438. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-16-3-430-438. (In Russian).

The article was received on December 23, 2025

Abstract

The authors studied the effect of adding aquaculture sediments from fish farms to agricultural soils in the European north of Russia on the growth characteristics of leaf lettuce (*Lactuca sativa* L.) to determine the impact of sediment utilization on plants in agricultural fields. The study revealed no negative impact of aquaculture sediments on plant biomass accumulation, possibly due to the absence of toxic loads of heavy metals and metalloids. The sediments contributed to an increase in the relative growth rate of leaves, a parameter that is ecologically significant and important for plant productivity.

Keywords: *aquaculture, trout-breeding, waste management, plants, risks and threats.*

Funding

This study was supported by the Russian Science Foundation (project No. 25-16-00264) "Prospects for the use of bottom sediments from fish farms in the northern regions of Russia to improve soil fertility and agricultural productivity".

Acknowledgements

The authors express their gratitude to INARCTICA (Murmansk, Russia) and the Core Facility of the Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences for facilitating the study.

Information about the authors

Ikkonen, Elena Nikolaevna, PhD, Researcher, Institute of Biology of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (11, Puskinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 185010), e-mail: likkonen@gmail.com.

Lukonin, Ilja Olegovich., Biologist, PJSC INARCTICA (45/2, Rybatskaya St., Ura-Guba, Murmansk region, Russia, 184371).

Popova, Tatjana Nikolaevna, PhD student, Department Multidisciplinary Scientific Research of Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences (11, Puskinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 185010).

Bakhmet, Olga Nikolaevna, Doctor of Biology, Corresponding Member of the Russian Academy of Sciences, Director General of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (11, Puskinskaya St., Petrozavodsk, Russia, 185010).