

УДК 581.1

ВЛИЯНИЕ ЭКСТРАКТА *LAMINARIA DIGITATA* ИЗ БЕЛОГО МОРЯ НА ПРОДУКТИВНОСТЬ И ПИЩЕВУЮ ЦЕННОСТЬ МИКРОЗЕЛЕНИ РАПИНИ

Т. Г. Шибаета*, Е. Г. Шерудило, А. А. Рубаева, И. А. Лёвкин,
А. Ф. Титов

Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН» (ул. Пушкинская, 11,
Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910), *shibaeva@krc.karelia.ru

В условиях контролируемой внешней среды исследовали влияние экстракта ламинарии пальчаторассеченной *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux (отход производства, ТУ 10.39.30-025-41669896-2019), сбор которой проводился в Белом море в акватории Соловецкого архипелага, на продуктивность и пищевую ценность микровзелени рапины *Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort. Результаты экспериментов позволили выявить оптимальную концентрацию раствора экстракта (10 мл/л) для использования при выращивании микровзелени рапины в качестве питательного раствора для полива с целью увеличения продуктивности (обеспечивая растения необходимым комплексом макро- и микроэлементов) и пищевой ценности микровзелени, которая рекомендуется в качестве функционального продукта для здорового питания. Применение более высоких концентраций раствора экстракта (50 мл/л) приводило к снижению продуктивности растений. Полученные результаты также свидетельствуют о том, что изученный экстракт ламинарии может повышать устойчивость растений к абиотическим факторам среды, в частности к пониженной температуре. Совокупность полученных данных позволяет заключить, что экстракт ламинарии ТУ 10.39.30-025-41669896-2019 в соответствии с регламентом ЕС (2019/1009) можно считать немикробным биостимулятором растений.

Ключевые слова: экстракты водорослей; отходы производства; *Laminaria digitata*; биостимуляторы; микровзелень; продуктивность; пищевая ценность

Для цитирования: Шибаета Т. Г., Шерудило Е. Г., Рубаева А. А., Лёвкин И. А., Титов А. Ф. Влияние экстракта *Laminaria digitata* из Белого моря на продуктивность и пищевую ценность микровзелени рапины // Труды Карельского научного центра РАН. 2026. № 1. С. 119–128. doi: 10.17076/eco2283

Финансирование. Исследование выполнено при финансовой поддержке из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (FMEN-2022-0004) и научно-образовательного центра мирового уровня «Российская Арктика: новые материалы, технологии и методы исследования».

**T. G. Shibaeva*, E. G. Sherudilo, A. A. Rubaeva, I. A. Levkin, A. F. Titov.
EFFECT OF THE WHITE SEA *LAMINARIA DIGITATA* EXTRACT ON THE YIELD
AND NUTRITIONAL VALUE OF RAPINI MICROGREENS**

*Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences
(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *shibaeva@krc.karelia.ru*

The effect of the extract of *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux (industrial waste, TU 10.39.30-025-41669896-2019) collected in the White Sea near the Solovetsky Archipelago on the productivity and nutritional value of rapini *Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort. microgreens was studied under controlled environmental conditions. The experiment allowed us to identify the optimal concentration of the extract (10 ml/l) to be used as a nutrient solution for irrigation in order to augment the yield (providing plants with the necessary macro- and micronutrients) and the nutritional value of rapini microgreens, which are recommended as a functional health food. The use of higher concentrations of the extract solution (50 ml/l) resulted in a decreased yield. The results also indicate that the studied kelp extract can improve plant resistance to abiotic environmental factors, particularly low temperatures. Taken together, these findings suggest that according to the EU 2019/1009 regulation the *Laminaria* extract TU 10.39.30-025-41669896-2019 can be classified as a non-microbial plant biostimulant.

Keywords: seaweed extract; industrial waste; *Laminaria digitata*; biostimulant; microgreens; yield; nutritional value

For citation: Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Levkin I. A., Titov A. F. Effect of the White Sea *Laminaria digitata* extract on the yield and nutritional value of rapini microgreens. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2026. No. 1. P. 119–128. doi: 10.17076/eco2283

Funding. This study was supported by the federal budget (Karelian Research Center of the Russian Academy of Sciences, FMEN-2022-0004) and the Center of Excellence in Research and Education “Russian Arctic: New Materials, Technologies and Research Methods”.

Введение

Безотходная переработка бурых водорослей позволяет рационально использовать их запасы и расширять ассортимент продукции на рынке. Особые перспективы в этом плане связаны с освоением водорослевых ресурсов Белого моря. В частности, промышленные запасы бурых водорослей в нем исчисляются десятками тысяч тонн, однако этот потенциал в значительной степени пока не осваивается, что создает возможность развивать новые инвестпроекты. В 2025 г. карельские компании добыли 1,6 тыс. т водорослей, на 43 % больше, чем в 2024 г. Но перед производителями стоит задача не только наращивать объемы, но и уйти от простой добычи водорослей к созданию продукции с высокой добавленной стоимостью. Поэтому уже ведется планомерная работа по созданию инфраструктуры для глубокой переработки водорослей, прорабатывается вопрос создания промышленных технопарков и научно-производственного центра по переработке морских биоресурсов в Республике Карелия на территории

Кемско-Беломорской агломерации (по информации Министерства сельского и рыбного хозяйства Республики Карелия в СМИ).

В процессе безотходной переработки бурых водорослей из сырья получают несколько продуктов, при этом отходы переработки утилизируются. Традиционными продуктами переработки бурых водорослей являются маннит и альгинат натрия. Остальные компоненты водорослей в настоящее время классифицируют как отходы. Однако вторичные продукты переработки бурых водорослей, как показывает мировая практика, вполне пригодны для дальнейшего использования. Учитывая это, нами в условиях контролируемой внешней среды исследовано влияние экстракта ламинарии (отход производства, ТУ 10.39.30-025-41669896-2019) на продуктивность и пищевую ценность микрозелени рапини при применении раствора экстракта в качестве питательного раствора для полива в условиях оптимальной и пониженной температуры. Рапини (*Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort.), известная также как спаржевая брокколи,

брокколи рабе, брокколи рааб, весенний рааб и руво кале, представляет собой богатый питательными веществами овощ семейства Brassicaceae. Она богата не только витаминами (А, С, К, Е и др.) и минеральными веществами (Са, Mg, P, K, Na, Fe, Zn, Cu и Mn), но и является хорошим источником пищевых волокон, фолиевой кислоты и различных антиоксидантов (аскорбиновая кислота, токоферолы, каротиноиды и глюкозинолаты) [Xiao et al., 2019; Zhang et al., 2021]. По своим полезным характеристикам рапини сходна с брокколи, обладая, к примеру, противораковым и противовоспалительным действием, способностью улучшать состояние сердечно-сосудистой системы и др.

Материалы и методы

Экстракт ламинарии (ТУ 10.39.30-025-41669896-2019, ООО «Архангельский водорослевый комбинат») является отходом производства и представляет собой темно-коричневую жидкость плотностью 1,3–1,4 г/см³ с рН 4 и массовой долей золы к сухому веществу 34 %. Сбор ламинарии пальчаторассеченной *Laminaria digitata* (Huds.) Lamouroux производился в акватории Соловецкого архипелага в Белом море.

Объектом исследования служила микрозелень рапини (*Brassica rapa* L. subsp. *sylvestris* L. Janch. var. *esculenta* Hort.). Эксперименты проводили в климатических камерах Vötsch (Германия) при температуре 23 °С, влажности воздуха 70 %; интенсивность света составляла 150 мкмоль/(м² с) ФАР. Микрозелень выращивали на специальных ковриках из агроваты. В первые трое суток после посева контейнеры с микрозеленью помещали для проращивания

в темноту и поливали водой. Начиная с 4-го дня после посева (фаза полностью раскрывшихся семядолей) растения освещали в режиме 16/8 ч (день/ночь).

В первой серии опытов растения поливали водой или растворами экстракта ламинарии в концентрации 0, 2,5, 5, 25 мл/л, затем 0, 10, 25, 50 мл/л. Во второй серии опытов растения поливали водой (вариант 1), раствором экстракта ламинарии в концентрации 10 мл/л (вариант 2) и 50% питательным раствором Хогланда – Арнона (вариант 3). Значения рН и электропроводности растворов представлены в табл. 1. Электропроводность растворов измеряли с помощью кондуктометра Эксперт-002 (Эконикс-Эксперт, Россия), а рН – с помощью рН-метра Hanna HI-98199 (Hanna Instruments Ltd., Великобритания).

Вторую серию опытов проводили параллельно в условиях температуры 23 и 15 °С.

Растения анализировали на 12-е сут (при 23 °С) или 16-е сут (при 15 °С) после посева при появлении первого настоящего листа. Биометрические измерения проводили на десяти растениях и включали определение длины гипокотыля, сырого и сухого веса побегов. Урожайность рассчитывали как сырой вес побегов, срезанных с площади 10 см². Индекс робастности RI (от англ. *robust* – крепкий) определяли как отношение произведения сухой массы побега и диаметра гипокотыля к длине гипокотыля [Treadwell et al., 2020]. Оводненность побегов определяли путем взвешивания растительных образцов до и после высушивания при 105 °С до постоянного веса. Площадь листьев определяли с помощью программы AreaS после сканирования.

Таблица 1. Значения рН и электропроводности растворов экстракта ламинарии и питательного раствора
Table 1. The values of pH and electrical conductivity of solutions of *Laminaria* extract and nutrient solution

Вариант опыта Treatment	рН	ЕС, мСм/см Electrical conductivity of the solution, mS/cm
Вода Water	6,3	0,07
Экстракт ламинарии 2,5 мл/л <i>Laminaria</i> extract 2.5 ml/l	6,0	1,08
Экстракт ламинарии 5 мл/л <i>Laminaria</i> extract 5 ml/l	5,9	2,13
Экстракт ламинарии 10 мл/л <i>Laminaria</i> extract 10 ml/l	5,8	4,10
Экстракт ламинарии 25 мл/л <i>Laminaria</i> extract 25 ml/l	5,5	9,48
Экстракт ламинарии 50 мл/л <i>Laminaria</i> extract 50 ml/l	5,4	14,9
Питательный раствор Хогланда – Арнона (50%) Hoagland-Arnon nutrient solution (50%)	6,9	0,85

Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофилла *a* и *b*, каротиноидов) определяли с помощью спектрофотометра СФ-2000 («Спектр», Россия) в экстракте 96% этилового спирта и рассчитывали по известным формулам [Lichtenthaler, Wellburn, 1983].

Для определения содержания антоцианов и флавоноидов навеску растительного материала гомогенизировали в 4 мл холодной смеси этанола и 1,5 N соляной кислоты (85:15, об/об) с последующей экстракцией в течение 14 ч в холодильнике в темноте. После 5 мин центрифугирования экстракта при 10 000 г и температуре +4 °С для антоцианов определяли оптическую плотность супернатанта при 530 и 657 нм на спектрофотометре СФ 2000 («Спектр», Россия). Суммарное содержание флавоноидов определяли спектрофотометрически при 300 нм в супернатанте для антоцианов (предварительно разбавив его в 10 раз) и рассчитывали как отношение оптической плотности к сырой массе (A300/г сырой массы) [Kolupaev et al., 2019].

Содержание свободного пролина в тканях листа оценивали спектрофотометрическим методом с использованием нингидринового реактива [Bates et al., 1973].

Экстракцию растворимых углеводов (сахаров) проводили дистиллированной водой согласно [Samuoliene et al., 2019], определяли их содержание с использованием антронового реактива [Kolupaev et al., 2019].

Для определения содержания нитратов навеску сухого растительного материала (0,1 г) гомогенизировали в 10 мл дистиллированной воды, экспонировали при температуре +45 °С в течение 1 ч и затем 15 мин центрифугировали при 5000 г. К 0,1 мл супернатанта добавляли 0,4 мл смеси салициловой кислоты (5 г) и концентрированной серной кислоты (100 мл), хорошо перемешивали и выдерживали 20 мин при комнатной температуре. Затем медленно добавляли 9,5 мл 8% раствора NaOH, смесь охлаждали до комнатной температуры и измеряли оптическую плотность при 410 нм на спектрофотометре СФ 2000. Содержание нитратов рассчитывали по стандартной концентрационной кривой с KNO₃ [Cataldo et al., 1975].

Для анализа активности антиоксидантных ферментов супероксиддисмутазы (СОД, КФ 1.15.1.1), каталазы (КАТ, КФ 1.11.1.6), аскорбатпероксидазы (АПО, КФ 1.11.1.11) и гваякол-пероксидазы (ГвПО, КФ 1.11.1.7) листья растений гомогенизировали в 50 мМ фосфатном буфере (рН 7,8), гомогенат центрифугировали при 14 000 г в течение 20 мин при 4 °С

и в супернатанте определяли активность ферментов с использованием спектрофотометра СФ-2000 [Shibaeva et al., 2023]. Активность АПО определяли в присутствии 0,5 мМ аскорбиновой кислоты и 0,25 мМ H₂O₂ по снижению оптической плотности при 290 нм; активность КАТ – по ферментативному разложению H₂O₂ при 240 нм; активность СОД – по способности ингибировать фотохимическую реакцию тетразолия нитросинего; активность ГвПО – на основании окисления гваякола в присутствии H₂O₂ при 470 нм. Активность ферментов рассчитывали на 1 г сухой массы листьев, а удельную активность – на 1 мг белка. Общее содержание белка определяли по Бредфорду, используя в качестве стандарта бычий сывороточный альбумин.

В работе представлены средние значения и их стандартные ошибки. Достоверность различий между средними значениями определяли на основе дисперсионного анализа (LSD тест) при *p* < 0,05 с использованием программного обеспечения Microsoft Excel.

Результаты и обсуждение

Результаты влияния экстракта ламинарии (2,5–50 мл/л) на рост и продуктивность микрозелени рапини представлены на рис. 1 и в табл. 2. По совокупности биометрических показателей (длина гипокотили, сырой вес побегов, содержание сухого вещества, урожайность на единицу площади, индекс робастности), показателей пищевой ценности (содержание хлорофилла, флавоноидов, белка, растворимых углеводов), безопасности (содержание нитратов) (табл. 3) и визуальной оценки лучший результат показали растения, выращенные при поливе раствором в концентрации 10 мл/л. У растений, выращенных при поливе раствором в концентрации 50 мл/л, снижались биометрические показатели (длина гипокотили, масса побега, урожайность) и визуальная оценка качества (рис. 1, табл. 2). Наши предыдущие исследования влияния этого экстракта ламинарии на прорастание семян и рост проростков огурца и пшеницы (используемых в качестве тест-объектов) выявили биостимулирующий эффект экстракта, который проявлялся при малых концентрациях раствора экстракта (0,25–10 мл/л) и зависел от способа воздействия на растения (предпосевная обработка семян или внесение в среду при проращивании семян) [Шибеева и др., 2025]. При использовании более высоких концентраций раствора экстракта (50 мл/л и выше) у растений

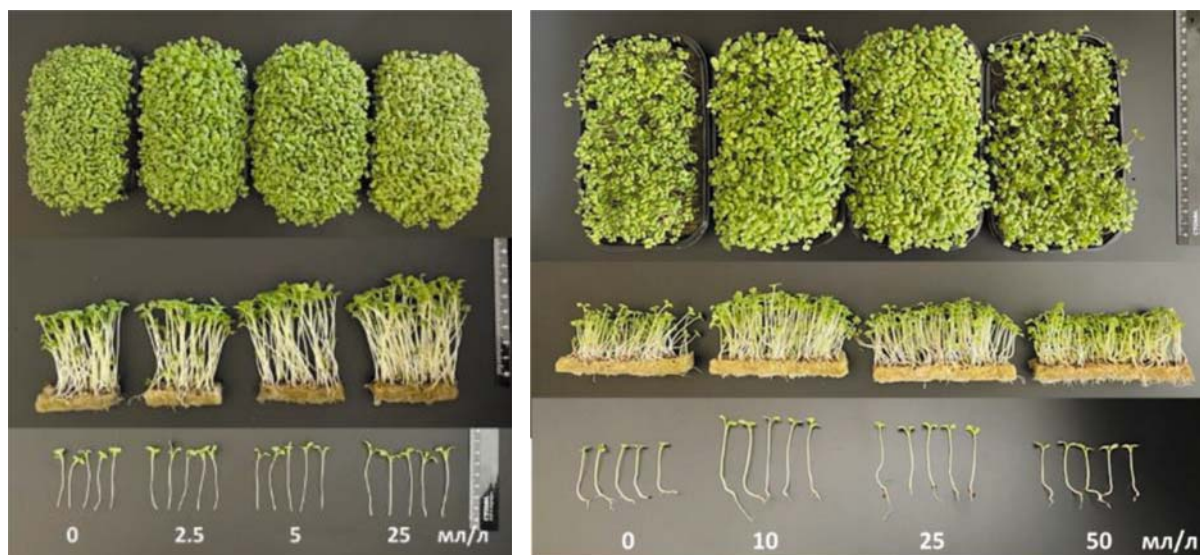


Рис. 1. Микрозелень рапини, выращенная при поливе растворами экстракта ламинарии в концентрации 0, 2,5, 5 и 25 мл/л (слева) и 0, 10, 25 и 50 мл/л (справа)

Fig. 1. Rapini microgreens grown under irrigation by *Laminaria* extract solutions of various concentrations – 0, 2.5, 5, 25 ml/l (left) and 0, 10, 25, 50 ml/l (right)

Таблица 2. Влияние растворов экстракта ламинарии на биометрические характеристики побегов микрозелени рапини

Table 2. Impact of *Laminaria* extract solutions on biometrical parameters of rapini microgreen shoots

Концентрация раствора, мл/л Concentration of extract solution, ml/l	Длина гипокотыля, мм Hypocotyl length, mm	Сырой вес побега, мг Shoot fresh weight, mg	Содержание сухого вещества, г/кг Dry matter content, g/kg	Урожайность, мг/см ² Yield, mg/cm ²	RI, мг/см RI, mg/cm
0	29,2 ± 0,7 ^b	24,9 ± 1,4 ^c	100,4 ± 8,0 ^b	141,1 ± 9,4 ^b	8,5 ± 0,4 ^b
2,5	29,8 ± 0,8 ^b	24,6 ± 1,7 ^c	101,3 ± 8,5 ^b	143,6 ± 15,9 ^b	8,3 ± 0,3 ^b
5	31,8 ± 0,8 ^b	28,4 ± 1,9 ^b	103,4 ± 7,5 ^b	150,7 ± 23,6 ^b	8,9 ± 0,5 ^b
10	36,5 ± 1,0 ^a	39,1 ± 2,0 ^a	102,3 ± 12,8 ^b	216,5 ± 27,6 ^a	10,7 ± 0,3 ^a
25	28,5 ± 1,3 ^b	29,7 ± 2,4 ^b	98,3 ± 7,3 ^b	165,3 ± 16,7 ^b	10,4 ± 0,6 ^a
50	17,8 ± 0,8 ^c	19,1 ± 1,1 ^d	120,4 ± 7,2 ^a	143,6 ± 28,9 ^b	10,7 ± 0,5 ^a

Примечание. Здесь и в табл. 3, 4 разные буквы указывают на достоверность различий между средними значениями при $p < 0,05$.

Note. Here and in Tables 3, 4 different letters for each plant species indicate significant differences between the mean values at $p < 0.05$.

Таблица 3. Влияние растворов экстракта ламинарии на содержание хлорофилла, флавоноидов, белка, растворимых углеводов и нитратов в микрозелени рапини

Table 3. Impact of *Laminaria* extract solutions on chlorophyll, flavonoid, protein, soluble sugars, and nitrates content in rapini microgreens

Концентрация раствора, мл/л Concentration of extract solution, ml/l	Хлорофилл a+b, мг/г Chlorophyll, mg/g	Флавоноиды, A ₃₀₀ /г Flavonoids, A ₃₀₀ /g	Белок, мг/г Protein, mg/g	Растворимые углеводы, мкг/г Soluble carbohydrates, µg/g	Нитраты, мкг/г Nitrates, µg/g
0	5,3 ± 0,2 ^c	27,6 ± 1,6 ^a	52,9 ± 2,7 ^b	270 ± 32 ^{ab}	680 ± 38 ^c
2,5	5,4 ± 0,3 ^{bc}	26,4 ± 1,7 ^a	52,5 ± 3,1 ^b	262 ± 28 ^b	685 ± 29 ^c
5	6,0 ± 0,3 ^b	25,7 ± 2,0 ^a	55,8 ± 2,2 ^b	271 ± 24 ^b	782 ± 31 ^b
10	7,1 ± 0,4 ^a	26,8 ± 3,4 ^a	62,8 ± 4,4 ^a	319 ± 19 ^a	829 ± 75 ^b
25	7,0 ± 0,3 ^a	21,4 ± 1,6 ^b	67,0 ± 3,1 ^a	275 ± 36 ^{ab}	1080 ± 145 ^a
50	7,4 ± 0,5 ^a	20,0 ± 0,8 ^b	63,0 ± 3,4 ^a	268 ± 37 ^{ab}	1114 ± 17 ^a

также наблюдали выраженное торможение ростовых процессов. Отметим, что когда экстракт добавляли в раствор для гидропоники, небольшое ростостимулирующее действие наблюдалось при применении концентраций 0,25–0,5 мл/л, а растворы экстрактов в концентрации 0,75–5 мл/л оказывали ингибирующее действие на рост корней [Шибалева и др., 2025].

Изучаемый экстракт ламинарии содержит в своем составе набор минеральных веществ (K, Mg, Ca, Fe, Na, Mn, Cd) и 16 аминокислот. Следовательно, одной из причин положительного влияния данного экстракта на рост растений может быть обеспечение их необходимым комплексом макро- и микроэлементов, отсутствующим в воде (контроле). В то же время это не исключает влияния биологически активных веществ, содержащихся в экстракте. В литературе имеется большое количество описаний защитного эффекта применения экстрактов морских водорослей против стресса, вызванного дефицитом элементов минерального питания. Например, экстракты *Ascophyllum nodosum* вызывали увеличение биомассы растений салата [Chrysargyris et al., 2018], а также длины побегов, площади и длины листьев, степени ветвления у растений миндаля в условиях, когда они испытывали дефицит калия [Saa et al., 2015]. Применение четырех коммерческих экстрактов на основе *A. nodosum* и *Durvillaea potatorum* на растениях томата снижало уровень стресса, вызванного дефицитом железа [Carrasco-Gil et al., 2018].

Ингибирующее действие экстракта ламинарии более высоких концентраций может быть связано с чрезмерно высокой электропроводностью раствора, обусловленной высокой концентрацией веществ в экстракте. Так, растворы экстракта в концентрации выше 10 мл/л значительно выходят за пределы нормального диапазона электропроводности, подходящего для выращивания растений (0,5–2,5 мСм/см) (табл. 1). Еще одной возможной причиной негативного воздействия растворов экстракта в более высоких концентрациях может быть действие на растения полифенолов, содержащихся в экстракте. Известно, что их содержание в арктических водорослях может в десятки раз превышать таковое в водорослях тех же видов, произрастающих в более южных водах [Клиндух, Облучинская, 2013; Боголицын и др., 2018].

В дальнейшем с концентрацией раствора экстракта ламинарии 10 мл/л, выбранной нами в качестве рабочей, была проведена серия сравнительных опытов с выращиванием

микрозелени при поливе водой, раствором экстракта ламинарии и питательным раствором Хогланда – Арнона. Результаты показали, что в оптимальных условиях (23 °C) растения рапины, выращенные на растворе экстракта, значительно превосходили растения, выращенные на воде, по высоте, площади листьев, массе побега, урожайности на единицу площади, содержанию хлорофилла, каротиноидов, белка и пролина (рис. 2, табл. 4). При этом по ряду показателей (высота, площадь листьев, масса побега, урожайность, содержание фотосинтетических пигментов, белка) растения, выращенные на растворе экстракта, уступали растениям в варианте опыта с питательным раствором Хогланда – Арнона. Содержание нитратов было ниже у растений, выращенных на воде и растворе экстракта. По содержанию углеводов, антоцианов и флавоноидов растения в вариантах опыта не различались (данные не приводятся). Активность антиоксидантных ферментов была схожа, отмечено лишь увеличение активности ГПО в варианте с экстрактом и КАТ у растений, выращенных на воде.

Аналогичная серия опытов, проведенная в условиях пониженной температуры (15 °C), показала, что растения, выращенные на растворе экстракта, превосходят по тем же показателям растения, выращенные на воде, но не отличаются достоверно от растений, выращенных на питательном растворе, по площади листьев, массе побега, урожайности, оводненности, содержанию хлорофилла, антоцианов, флавоноидов, пролина и углеводов (табл. 4). Активность антиоксидантных ферментов (КАТ, СОД и АПО) была максимальной у растений, выращенных на растворе экстракта, что, вероятно, позволило им лучше переносить действие пониженной температуры. В литературе также имеются данные, свидетельствующие о том, что экстракты морских водорослей могут повышать устойчивость растений к низким температурам, лимитирующим рост и развитие растений. Например, препарат Algafert на основе экстрактов из *A. nodosum*, *Fucus* spp. и *Laminaria* spp. снижал степень некроза листьев и увеличивал плотность корней у растений кукурузы, подвергавшихся действию пониженных температур (12–14 °C) в зоне корней в течение двух недель [Bradacova et al., 2016]. Коммерческий экстракт из *A. nodosum* Seasol повышал морозостойкость винограда [Wilson, 2001], а обработка препаратом Maxicrop озимого ячменя способствовала повышению зимо- и морозостойкости растений в полевых условиях [Burchett et al., 1998].

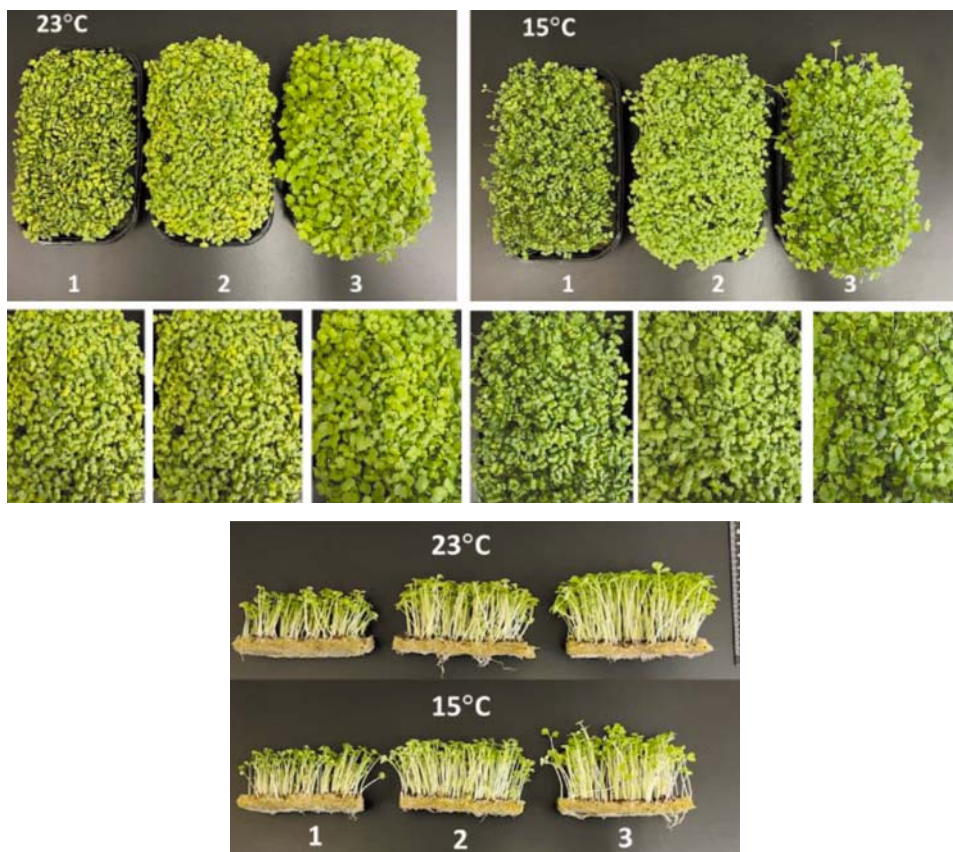


Рис. 2. Микрозелень рапини, выращенная при температуре 23 и 15 °С при поливе водой (1), экстрактом ламинарии 10 мл/л (2) и 50% питательным раствором Хогланда – Арнона (3)

Fig. 2. Rapini microgreens grown at 23 °C and 15 °C irrigated by water (1), *Laminaria* extract 10 ml/l (2) and 50% Hoagland-Arnon nutrient solution (3)

Таблица 4. Биометрические и биохимические показатели растений рапини, выращенных в условиях оптимальной (23 °С) и пониженной (15 °С) температуры

Table 4. Biometric and biochemical parameters of rapini microgreens grown at optimal (23 °C) and low (15 °C) temperature

Показатель Variable	Вариант опыта Treatments					
	23 °			15 °		
	1	2	3	1	2	3
Длина hypocotyla, мм Hypocotyl length, mm	28,7 ± 1,1 ^c	38,1 ± 1,5 ^b	48,0 ± 1,3 ^a	37,5 ± 1,4 ^c	40,2 ± 1,3 ^b	50,1 ± 1,6 ^a
Площадь листьев, мм ² Leaf area, mm ²	92 ± 3 ^c	101 ± 5 ^b	174 ± 8 ^a	72 ± 3 ^b	109 ± 5 ^a	106 ± 5 ^a
Сырой вес побега, мг Shoot fresh weight, mg	20,2 ± 0,7 ^c	32,5 ± 1,9 ^b	48,4 ± 3,1 ^a	23,2 ± 1,6 ^b	36,8 ± 2,6 ^a	33,3 ± 2,2 ^a
Содержание сухого вещества, г/кг Dry matter content, g/kg	109 ± 6 ^a	101 ± 7 ^a	74 ± 8 ^b	87 ± 6 ^a	62 ± 5 ^b	61 ± 7 ^b
Урожайность, мг/см ² Yield, mg/cm ²	97,1 ± 6,4 ^c	156,8 ± 16,4 ^b	210,9 ± 8,7 ^a	98,8 ± 6,7 ^b	175,9 ± 7,0 ^a	183,0 ± 8,0 ^a
Хлорофилл a+b, мг/г Chlorophyll, mg/g	5,8 ± 0,4 ^b	7,1 ± 0,4 ^{ab}	9,9 ± 0,7 ^a	8,2 ± 0,6 ^b	9,4 ± 1,1 ^{AB}	10,8 ± 0,6 ^a
Каротиноиды, мг/г Carotenoids, mg/g	1,06 ± 0,03 ^c	1,19 ± 0,05 ^b	1,53 ± 0,02 ^a	1,3 ± 0,1 ^b	1,4 ± 0,1 ^b	1,7 ± 0,1 ^a

Окончание табл. 4
Table 4 (continued)

Показатель Variable	Вариант опыта Treatments					
	23 °			15 °		
	1	2	3	1	2	3
Белок, мг/г Protein, mg/g	98,5 ± 4,0 ^c	125,8 ± 0,6 ^b	156,3 ± 0,1 ^a	114,2 ± 3,0 ^b	148,1 ± 5,5 ^A	147,8 ± 2,3 ^A
Пролин, мкмоль/г Proline, μmol/g	486 ± 41 ^b	946 ± 89 ^a	449 ± 36 ^b	567 ± 24 ^A	560 ± 40 ^A	670 ± 92 ^A
КАТ, мкмоль/мг мин CAT, μmol/mg min	27,5 ± 2,1 ^a	22,6 ± 1,8 ^b	24,3 ± 2,1 ^{ab}	24,8 ± 3,7 ^B	32,2 ± 2,3 ^A	27,9 ± 2,9 ^{AB}
СОД, у.е./мг белка SOD, unit/mg protein	13,5 ± 1,2 ^a	14,2 ± 1,6 ^a	12,2 ± 0,8 ^a	9,6 ± 1,2 ^B	13,0 ± 1,3 ^A	9,9 ± 1,0 ^B
АПО, мкмоль/мг мин APX, μmol/mg min	100 ± 3 ^a	112 ± 2 ^a	121 ± 20 ^a	114 ± 16 ^B	189 ± 22 ^A	138 ± 14 ^B
ГПО, мкмоль/мг мин GPX, μmol/mg min	302 ± 28 ^b	450 ± 100 ^a	319 ± 51 ^b	395 ± 35 ^A	326 ± 16 ^B	284 ± 12 ^C
Нитраты, мкг/г Nitrates, μg/g	654 ± 39 ^b	573 ± 24 ^b	2506 ± 133 ^a	719 ± 59 ^B	612 ± 22 ^{AB}	2527 ± 110 ^A

Примечание. Варианты опыта: 1 – вода, 2 – экстракт ламинарии 10 мл/л, 3 – 50% питательный раствор Хогланда – Арнона.
Note. Treatments: 1 – water, 2 – *Laminaria* extract 10 ml/l, 3 – 50% Hoagland-Arnon nutrient solution.

Заключение

Понятие «биостимулятор растений» определяется как «продукт, назначение которого заключается в стимулировании процессов питания растений независимо от содержания питательных веществ в продукте с целью улучшения одной или более из следующих характеристик растения (или ризосферы растения): а) эффективность поглощения и использования питательных веществ растениями, б) устойчивость растений к абиотическому стрессу, в) качественные признаки культур и г) доступность ограниченных питательных веществ в почве или ризосфере» [European..., 2019].

Проведенная нами работа по изучению влияния экстракта ламинарии на рост, продуктивность и пищевую ценность (содержание белков, углеводов и веществ с антиоксидантными свойствами) микрозелени рапини показала, что данный экстракт в концентрации 10 мл/л может применяться в качестве питательного раствора для полива при выращивании микрозелени, обеспечивая растения необходимым комплексом макро- и микроэлементов и увеличивая пищевую ценность микрозелени, которая рекомендуется в качестве функционального продукта (functional food) для здорового питания. Более высокие концентрации (50 мл/л и выше) могут вызывать торможение роста растений.

Полученные результаты также свидетельствуют о том, что изученный экстракт ламинарии может повышать устойчивость растений к абиотическим факторам среды, в частности к пониженной температуре.

Проведенные исследования подтверждают, что использование экстрактов, являющихся отходами переработки водорослей, требует специальной методической проработки, а именно выявления эффективных концентраций растворов экстрактов, способа обработки ими растений и установления видовых (сортовых) особенностей в реакции разных культур на обработку.

В целом из совокупности полученных данных можно заключить, что изученный нами экстракт ламинарии (ТУ 10.39.30-025-41669896-2019) может быть отнесен к группе немикробных биостимуляторов растений (в соответствии с регламентом ЕС (2019/1009) «Об установлении правил размещения удобрений на рынке ЕС»). Очевидно, что более полно преимущества экстрактов морских водорослей могут быть реализованы в растениеводстве прежде всего в результате дальнейших исследований их химической (биохимической) природы и механизмов действия на продуктивность растений, а также на те или иные их характеристики как пищевого продукта.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук».

Литература

Боголицын К. Г., Дружинина А. С., Овчинников Д. В., Каплицин П. А., Шульгина Е. В., Паршина А. В. Полифенолы бурых водорослей // Химия

растительного сырья. 2018. № 3. С. 5–21. doi: 10.14258/jcprm.2018031898

Клиндух М. П., Облучинская Е. Д. Сравнительное исследование химического состава бурых водорослей *Fucus vesiculosus* и *Ascophyllum nodosum* // Вестник МГТУ. 2013. Т. 16, № 3. С. 466–471.

Шibaева Т. Г., Шерудило Е. Г., Рубаева А. А., Левкин И. А., Титов А. Ф. О возможном применении отходов переработки *Laminaria digitata* из Белого моря в качестве биостимуляторов растений // Труды Карельского научного центра РАН. 2025. № 8. С. 196–204. doi: 10.17076/eco2253

Bates L. S., Waldren R. P., Teare I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies // Plant Soil. 1973. Vol. 39. P. 205–207. doi: 10.1007/BF00018060

Bradacova K., Weber N. F., Morad-Talab N., Asim M., Imran M., Weinmann M., Neumann G. Micro-nutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize // Chem. Biol. Technol. Agric. 2016. Vol. 3. Art. 9. doi: 10.1186/s40538-016-0069-1

Burchett S., Fuller M. P., Jellings A. J. Application of seaweed extract improves winter hardiness of winter barley cv. Igri // Proceedings of the Society for Experimental Biology, Annual Meeting, The York University, March 22–27, 1998. Springer, 1998.

Carrasco-Gil S., Hernandez-Apaolaza L., Lucena J. J. Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of iron chlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) // Plant Growth Regul. 2018. Vol. 86. P. 401–411. doi: 10.1007/s10725-018-0438-9

Cataldo D. A., Haroon M., Schrader L. E., Youngs V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid // Commun. Soil Sci. Plant Anal. 1975. Vol. 6. P. 71–80. doi: 10.1080/00103627509366547

Chrysargyris A., Xylia P., Anastasiou M., Pantelides I., Tzortzakis N. Effects of *Ascophyllum nodosum* seaweed extracts on lettuce growth, physiology and fresh-cut salad storage under potassium deficiency // J. Sci. Food Agric. 2018. Vol. 98. P. 5861–5872. doi: 10.1002/jsfa.9139

European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. 2019. P. 114. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> (дата обращения: 12.01.2026).

Kolupaev Y. E., Fisoва E. N., Yastreb T. O., Ryabchun N. I., Kirichenko V. V. Effect of hydrogen sulfide donor on antioxidant state of wheat plants and their resistance to soil drought // Russ. J. Plant Physiol. 2019. Vol. 66. P. 59–66. doi: 10.1134/S1021443719010084

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents // Biochem. Soc. Trans. 1983. Vol. 11. P. 591–592.

Saa S., Olivos-Del Rio A., Castro S., Brown P. H. Foliar application of microbial and plant based biostimulants increases growth and potassium uptake in almond

(*Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb) // Front. Plant Sci. 2015. Vol. 6. Art. 87. doi: 10.3389/fpls.2015.00087

Samuoliene G., Brazaityte A., Virsle A., Miliauskienė J., Vastakaitė-Kairienė V., Duchovskis P. Nutrient levels in Brassicaceae microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra // Front. Plant Sci. 2019. Vol. 10. Art. 1475. doi: 10.3389/fpls.2019.01475

Shibaeva T. G., Rubaeva A. A., Sherudilo E. G., Titov A. F. Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens // Russ. J. Plant Physiol. 2023. Vol. 70, no. 6. P. 623–634. doi: 10.31857/S0015330323600262

Treadwell D. D., Hochmuth R., Landrum L., Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop // EDIS. 2020. Ed. 5. HS1164. doi: 10.32473/edis-hs1164-2020

Wilson S. Frost management in cool climate vineyards // University of Tasmania Research Report UT 99/1, Grape and Wine Research & Development Corporation. 2001.

Xiao Z., Rausch S. R., Luo Y., Sun J., Yu L., Wang Q., Chen P., Yu L., Stommel J. R. Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity // LWT – Food Science and Technology. 2019. Vol. 101. P. 731–737. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.076

Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou C., Shao M., Yang Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen // Plants. 2021. Vol. 10. Art. 176. doi: 10.3390/plants10010176

References

Bates L. S., Waldren R. P., Teare I. D. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil*. 1973;39:205–207. doi: 10.1007/BF00018060

Bogolitsyn K. G., Druzhinina A. S., Ovchinnikov D. V., Kaplitsin P. A., Shul'gina E. V., Parshina A. V. Polyphenols of brown seaweeds. *Khimiya rastitel'nogo syr'ya = Chem. Plant Raw Materials*. 2018;3:5–21. (In Russ.). doi: 10.14258/jcprm.2018031898

Bradacova K., Weber N. F., Morad-Talab N., Asim M., Imran M., Weinmann M., Neumann G. Micro-nutrients (Zn/Mn), seaweed extracts, and plant growth-promoting bacteria as cold-stress protectants in maize. *Chem. Biol. Technol. Agric.* 2016;3:9. doi: 10.1186/s40538-016-0069-1

Burchett S., Fuller M. P., Jellings A. J. Application of seaweed extract improves winter hardiness of winter barley cv. Igri. *Proceedings of the Society for Experimental Biology, Annual Meeting, The York University, March 22–27, 1998*. Springer; 1998.

Carrasco-Gil S., Hernandez-Apaolaza L., Lucena J. J. Effect of several commercial seaweed extracts in the mitigation of iron chlorosis of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.). *Plant Growth Regul.* 2018;86:401–411. doi: 10.1007/s10725-018-0438-9

Cataldo D. A., Haroon M., Schrader L. E., Youngs V. L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* 1975;6:71–80. doi: 10.1080/00103627509366547

Chrysargyris A., Xylia P., Anastasiou M., Pantelides I., Tzortzakis N. Effects of *Ascophyllum nodosum* seaweed extracts on lettuce growth, physiology and fresh-cut salad storage under potassium deficiency. *J. Sci. Food Agric.* 2018;98:5861–5872. doi: 10.1002/jsfa.9139

European Union. Regulation (EU) 2019/1009 of the European Parliament and of the Council of 5 June 2019 laying down rules on the making available on the market of EU fertilising products and amending Regulations (EC) No 1069/2009 and (EC) No 1107/2009 and repealing Regulation (EC) No 2003/2003. 2019:114. URL: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2019/1009/oj> (accessed: 12.01.2026).

Klindukh M. P., Obluchinskaya E. D. Comparative study of the chemical composition of brown seaweeds *Fucus vesiculosus* and *Ascophyllum nodosum*. *Vestnik MGTU = Herald of MSTU.* 2013;16(3):466–471. (In Russ.)

Kolupaev Y. E., Fisova E. N., Yastreba T. O., Ryabchun N. I., Kirichenko V. V. Effect of hydrogen sulfide donor on antioxidant state of wheat plants and their resistance to soil drought. *Russ. J. Plant Physiol.* 2019;66:59–66. doi: 10.1134/S1021443719010084

Lichtenthaler H. K., Wellburn A. R. Determinations of total carotenoids and chlorophylls *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983;11:591–592.

Saa S., Olivos-Del Rio A., Castro S., Brown P. H. Foliar application of microbial and plant based biostimulants increases growth and potassium uptake in almond (*Prunus dulcis* [Mill.] D. A. Webb). *Front. Plant Sci.* 2015;6:87. doi: 10.3389/fpls.2015.00087

Samuoliene G., Brazaityte A., Virsile A., Miliauskiene J., Vastakaite-Kairiene V., Duchovskis P. Nutri-

ent levels in Brassicaceae microgreens increase under tailored light-emitting diode spectra. *Front. Plant Sci.* 2019;10:1475. doi: 10.3389/fpls.2019.01475

Shibaeva T. G., Rubaeva A. A., Sherudilo E. G., Titov A. F. Continuous lighting increases yield and nutritional value and decreases nitrate content in Brassicaceae microgreens. *Russ. J. Plant Physiol.* 2023;70(6):623–634. doi: 10.31857/S0015330323600262

Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Rubaeva A. A., Levkin I. A., Titov A. F. On the possible use of White Sea *Laminaria digitata* processing wastes as plant biostimulants. *Trudy Kareli'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2025;8:196–204. (In Russ.). doi: 10.17076/eco2253

Treadwell D. D., Hochmuth R., Landrum L., Laughlin W. Microgreens: A new specialty crop. *EDIS.* 2020;5:HS1164. doi: 10.32473/edis-hs1164-2020

Wilson S. Frost management in cool climate vineyards. *University of Tasmania Research Report UT 99/1, Grape and Wine Research & Development Corporation.* 2001.

Xiao Z., Rausch S. R., Luo Y., Sun J., Yu L., Wang Q., Chen P., Yu L., Stommel J. R. Microgreens of Brassicaceae: Genetic diversity of phytochemical concentrations and antioxidant capacity. *LWT – Food Science and Technology.* 2019;101:731–737. doi: 10.1016/j.lwt.2018.10.076

Zhang Y., Zha L., Liu W., Zhou C., Shao M., Yang Q. LED light quality of continuous light before harvest affects growth and AsA metabolism of hydroponic lettuce grown under increasing doses of nitrogen. *Plants.* 2021;10:176. doi: 10.3390/plants10010176

Поступила в редакцию / received: 14.01.2026; принята к публикации / accepted: 16.01.2026.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шибяева Татьяна Геннадиевна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник
e-mail: shibaeva@krc.karelia.ru

Шеруди́ло Елена Георгиевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник
e-mail: sherudil@krc.karelia.ru

Рубаева Александра Александровна

аспирант
e-mail: arubaeva@krc.karelia.ru

Лёвкин Илья Александрович

аспирант
e-mail: levkin-556@mail.ru

Титов Александр Федорович

чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, профессор,
руководитель лаборатории экологической
физиологии растений
e-mail: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shibaeva, Tatyana

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Sherudilo, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Rubaeva, Alexandra

Doctoral Student

Levkin, Ilya

Doctoral Student

Titov, Alexander

RAS Corr. Fellow, Dr. Sci. (Biol.), Professor,
Head of Laboratory