



Экспериментальное использование остаточных компонентов переработки водорослей при выращивании семян сосны обыкновенной

Елена Н. Наквасина, e.nakvasina@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Мария В. Никитина, m.nikitina@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>

Евгений М. Романов, e.romanov@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-8225-1991>

Сергей В. Коптев, s.koptev@narfu.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, 163002, Российская Федерация

Проведено экспериментальное изучение по использованию сухих остаточных компонентов переработки водорослей (ламинария пальчато-рассеченная, *Laminaria digitata*, ламинария сахаристая, *Saccharina latissima* и две разновидности фукуса: фукус пузырчатый, *Fucus vesiculosus* и аскофиллум узловатый, *Ascophyllum nodosum*). В качестве основы для композиций субстратов использовали субстрат “Велторф”, подготовленный на основе верхового торфа. По общепринятым методам изучали комплекс водно-физических и агрохимических показателей. По результатам эксперимента установлено, что внесение сухих остаточных компонентов переработки водорослей не значительно влияет на водно-физические свойства экспериментальных субстратов. В то же время показано заметное подщелачивание субстрата при внесении даже 10 % водорослей и повышение pH среды. Водорослевые сухие отходы при внесении небольших доз способны повысить содержание подвижного калия в водной вытяжке субстрата, при повышении дозы более 50 % поддерживают уровень калия, соответствующий базовому субстрату. Добавка сухих водорослевых компонентов в количестве 30 % и более приводит к снижению содержания в субстрате нитратного азота и подвижного фосфора. В процессе выращивания однолетних семян сосны обыкновенной в теплице в субстратах с компонентами водорослей происходят большие, чем на контроле потери подвижного калия и нитратного азота, даже при внесении минеральных подкормок, согласно технологии, а также подщелачивание субстратов. Наблюдается высвобождение фосфатов, связанное с долей внесения водорослевого компонента. Подобная несбалансированность питания растений и реакции среды привела к ухудшению роста и развития семян первого года жизни. Положительное влияние сказалось лишь на росте главного корня семян. Использование остаточных компонентов переработки водорослей в качестве добавки к готовым субстратам возможно лишь в небольших дозах (не более 20 %, однако можно ожидать его большую положительную результативность при использовании кислых природных торфов в качестве базовой основы для приготовления субстратов).

Ключевые слова: субстраты, остаточные компоненты переработки водорослей, свойства субстратов, сосна обыкновенная, однолетние семена, закрытый грунт

Финансирование: Исследования проводились при финансировании АО «Архангельский ЦБК» в рамках договора на выполнение работ «Разработка составов субстрата для выращивания посадочного материала с закрытой корневой системой» № ДД-513.2023 от 01.12. 2023 г. (рук. М.В. Никитина).

Благодарности: авторы благодарят Н.Н. Максимова, Л.В. Засухину, Н. Саидова за организацию и проведение эксперимента в теплице и лаборатории Лесного селекционного центра, рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов: авторы заявили об отсутствии конфликта интересов

Для цитирования: Наквасина Е.Н., Никитина М.В., Романов Е.М., Коптев С.В. Экспериментальное использование отходов переработки водорослей при выращивании сеянцев сосны обыкновенной / Е.Н. Наквасина, М.В. Никитина, Е.М. Романов, С. В. Коптев // Лесотехнический журнал. – 2025. – Т. 15. – № 1 (57). – С. 23-37. –

Поступила 25.01.2025. *Пересмотрена* 25.02.2025. *Принята* 11.03.2025. *Опубликована онлайн* 24.03.2025.

Article

Experimental use of residual components of algae processing waste in growing of pine seedlings

Elena N. Nakvasina, ✉ e.nakvasina@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>

Mariya V. Nikitina, m.nikitina@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>

Evgeny M. Romanov, e.romanov@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-8225-1991>

Sergey V. Koptev, s.koptev@narfu.ru,  <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>

Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002, Russian Federation

Abstract

An experimental study was carried out on the use of dry residual components from the processing of algae (*Laminaria palmate*, *Laminaria digitata*, kelp saccharine, *Saccharina latissima* and two varieties of fucus: *fucus vesicularis*, *Saccharina latissima* and *ascophyllum nodosum*, *Ascophyllum nodosum*). “Veltorf” substrate, prepared on the basis of high-moor peat, was used as the basis for the substrate compositions. Using generally accepted methods, a complex of water-physical and agrochemical indicators was studied. Based on the results of the experiment, it was established that the addition of dry residual components from algae processing does not significantly affect the water-physical properties of the experimental substrates. At the same time, a noticeable alkalization of the substrate is shown when even 10 % of algae components is added and the pH of the environment increases. Algal dry components, when applied in small doses, can slightly increase the mobile potassium in the soil solution of the substrate; with an increase in the application dose, more than 50% maintains the level of potassium corresponding to the base substrate. The addition of dry algal components in an amount of 30% or more leads to a decrease the nitrate nitrogen and mobile phosphorus in the substrate. In the process of annual Scots pine seedlings growing in a greenhouse on substrates with algae, greater losses of mobile potassium and nitrate nitrogen occur than in the control, despite of mineral fertilizers adding according to technology, as well as alkalization of the substrates. There is a noticeable release of phosphates, directly related to the proportion of the algal component introduced. Such an imbalance in plant nutrition and environmental reaction led to growth degradation of seedlings in the first year of life. The positive effect only the growth of the main root of the seedlings. The use of algae residual processing as an additive to ready-made substrates is possible only in small doses (no more than 20 %), but one can expect greater positive results when using acidic natural peats as a base for preparing substrates.

Keywords: substrates, residual components of algae processing, properties of substrates, pine, annual seedlings, greenhouse

Funding: The research was carried out with the financing Arkhangelsk Pulp and Paper Mill JSC within the framework of the work contract "Development of substrate formulations for growing planting material with a closed root system" No. DD-513.2023 dated December 01, 2023 (supervisor M.V. Nikitina).

Acknowledgments: authors thank the reviewers for their contribution to reviewing the article.

Conflict of interest: authors declare no conflict of interest

For citation: Nakvasina E.N., Nikitina M.V., Romanov E.M. Koptev S.V., (2025). Experimental use of algae processing waste in growing of pine seedlings. Forestry Engineering journal, Vol. 15, No. 1 (57), pp. 23-37 (in Russian). DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2025.1/2>

Received 25.01.2025. **Revised** 25.02.2025. **Accepted** 11.03.2025. **Published online** 24.03.2025.

Введение

Морские водоросли имеют уникальный биохимический состав и могут быть использованы в качестве источников природных минеральных веществ, углеводов, белков (1, 2, 3) и по мнению ученых имеют разносторонний потенциал (4). Они находят применение для получения ценных препаратов (агар, маннит, альгинат) и применяются в медицинской и пищевой промышленности (5,6,7).

В них присутствуют биологически активные вещества и минеральные соединения, которые делают их незаменимыми в качестве добавок в рецептуры кормов рыб и сельскохозяйственных животных [8]. Они содержат много питательных веществ, включая азот, фосфор, калий и важные витамины и могут найти применение в качестве удобрений при выращивании сельскохозяйственных культур [9, 10, 11]. Подобное использование морских водорослей, заготовленных при штормовых выбросах, издревле практиковалось в приморских районах страны.

Они могут быть полезны для решения экосистемных проблем, связанных с потеплением климата, в частности со снижением проблем эвтрофикации, за счет поглощения избытка фосфора и азота (12). В то же время считается, что морские водоросли обогащают почву биологически ценными органическими и минеральными веществами (С, N, P, входящие в их состав Mn и Са позволят снизить кислотность почв. Они разрыхляют почву, способствуют сохранению влаги в ней и привносят азотосовояющие бактерии [11], что способствует повышению плодородия почв, усилению развития корневой системы и увеличению урожайности растений [17, 18]. В связи с высоким содержанием в морских водорослях цитокининов, ауксинов, гиббереллинов, аминокислот, фитогормонов, осмозащитных, минеральных питательных элементов и антимикробных соединений, водоросли являются устойчивыми био-

стимуляторами и повышают устойчивость и выживаемость растений, особенно в стрессовых условиях [16]. Благодаря этому, в настоящее время использование морских водорослей и препаратов из них считается наиболее перспективным в сельском хозяйстве.

При переработке водорослей, в том числе и на Архангельском водорослевом комбинате, образуется большое количество твердых (сухих) остаточных компонентов, которые содержат высокую концентрацию биоразлагаемых ценных органических и неорганических веществ, и могут найти широкое применение в разных направлениях: для биотехнологии, для производства био-наполнителей, пищевых продуктов, усилителей вкуса, в качестве корма скоту и на удобрения [21, 22]. Их можно также применять в качестве компонентов для приготовления компостов [23, 24], в том числе в смеси с рыбными отходами. Хороший компост с высокой долей отходов переработки водорослей соответствует использованию непосредственно свежих водорослей (например, морской капусты) и способен поддерживать высокие темпы роста растений даже при низких дозах внесения [26].

Подобное использование сухих остаточных компонентов переработки водорослей может быть перспективным в регионах их получения, когда производство заинтересовано в подборе субстратов, в том числе для конкретных пород, в тепличных комплексах [27]. В настоящее время работы по исследованию возможностей применения сухих отходов переработки водорослей как перспективных агрохимикатов только начинаются, для лесного хозяйства носят поисковый характер. Особенно важно их применение для основных лесообразующих пород региона, в частности сосны обыкновенной, и получения выхода стандартных семян за однолетний период выращивания в условиях закрытого грунта.

Цель наших исследований состояла в проверке воз-

возможностей использования сухих остаточных компонентов переработки морских водорослей, полученных на Архангельском водорослевом комбинате, в качестве добавки к субстратам для повышения уровня обеспеченности питательными веществами и обеспечения экологической и экономической выгоды за счет снижения применения минеральных

Материалы и методы

Исследования проводили на базе Лесного селекционно-семеноводческого центра (ЛССЦ, г. Новодвинск). Использовали субстрат “Велторф”, подготовленный на основе верхового торфа (рН 4,5-5,0, содержащего 120-180 мг/л подвижных форм азота (суммарно аммонийный и нитратный), 100-170 мг/л фосфора в пересчете на P_2O_5 , 230-310 мг/л калия в пересчете на K_2O). В качестве экспериментальной добавки применяли сухие остаточные компоненты переработки водорослей, заготовленных в Белом море: ламинария пальчаторассеченная (*Laminaria*, ламинария сахаристая, или сахарина большая и две разновидности фукуса - фукус пузырчатый и аскофиллум узловатый (*Ascophyllum nodosum*), полученные на Архангельском водорослевом комбинате, после производства фармацевтического сырья, пищевых продуктов и натуральной косметики.

Сухие компоненты водорослей имели обменную кислотность рН 9,5, насыщены органическими компонентами (плотность твердой фазы составила 0,752 г/см³), содержали 3,62 мг/100 г нитратного азота, но очень мало подвижных форм фосфора и калия (менее 0,011 мг/100 г).

Постановка опыта включала добавку к субстрату компонентов водорослевого производства от 10 до 70 %, набивку кассет (81 ячейка объемом 0,9 дм³), посев семян сосны и выращивание однолетних сеянцев по технологии производственной теплицы ЛССЦ на фоне подкормок, начиная с 1 недели после посева (в мае-июле 2 подкормки Акварин 5 (N – 18 %) по 3,9 г/м² и 6 подкормок по 7,8 г/м²; в августе – 4 подкормки Акварин 5 (N – 6 %) с дозой 3,9 г/м²). На каждый вариант закладывали 4-5 кассет. В качестве контроля использовали субстрат “Велторф” без добавок водорослевого компонента.

удобрений при выращивании сеянцев древесных пород, в частности на примере сосны обыкновенной, на комбинированных субстратах в теплице.

Изучение субстрата проводили до начала эксперимента и в динамике с интервалом не реже 20 дней. Изучали следующие агрохимические показатели: зольность (прокаливанием по ГОСТ 11306-2013 п.7; Обменная кислотность – ГОСТ 11623-89 п.2; массовая доля нитратного азота (сухое вещество), % – ГОСТ 27894.4-88 п.4; массовая доля калия в пересчете на K_2O – ГОСТ 27753.6-88 п.3; массовая доля фосфора в пересчете на P_2O_5 (на сухое вещество) – ГОСТ 27894.4-88 п.3.

Плотность сухого субстрата (масса единицы объема, г/см³) определяли насыпным способом, с использования режущего ножа (бурика) с известным объемом в абсолютно сухом состоянии. Расчет плотности проводили общепринятыми способами. Истинную плотность (плотность твердой фазы) определяли пикнометрическим методом. Рассчитали пористость субстрата общепринятыми в почвоведении способами [19].

Полную влагоемкость (%) – способность торфа поглощать и удерживать воду определяли в цилиндрах с сетчатым дном по соответствующим методикам [20].

Все эксперименты проводились в 4-5 повторностях.

В конце сезона вегетации проводили выкопку и замеры не менее 50 шт. сеянцев сосны из каждого варианта кассет. Измеряли высоту, диаметр, отмечали число сеянцев с разветвлениями осевого побега. Определяли сухую массу надземной и корневой части растений в абсолютно сухом состоянии. Биометрические показатели обрабатывали методами вариационной статистики.

Результаты и обсуждение

Сухие остаточные компоненты переработки водорослей представляют из себя органическую массу, по степени зольности ниже зольности субстрата на основе верхового торфа, и повышают содержание органической массы в смешанных композициях экспериментальных субстратов (табл. 1). Это приводит также к тому, что за счет меньшей истинной плотности они способствуют ее снижению при смешивании с промышленным субстратом. Однако в них много мелких раздробленных частиц, что несколько повышает насыпную плотность экспериментальных субстратов пропорционально внесённой доле водорослевого компонента. Несмотря на то, что различия невелики (10-15 %), но все же это влияет на клинальное снижение таких показателей, как скважность и полная влагоемкость.

Соотношение торфа и компонентов переработки водорослей значимо определяет все показатели водно-физических свойств субстратов, и прежде всего, их зольность (коэффициент корреляции r равен -0,985). От содержания органики в свою очередь зависят плотность и истинная плотность ($r = 0,579$ и $-0,751$ соответственно), пористость ($r = -0,811$) и полная влагоемкость ($-0,549$).

Согласно полученным данным (табл. 1), наиболее заметные изменения свойств наблюдаются при добавке в субстрат водорослевого компонента более 4 частей по объёму. Внесение водорослей в меньших долях (10-40 %) незначительно влияет на изменение водно-физических свойств экспериментальных субстратов по сравнению с контролем.

Таблица 1

Сравнительная характеристика водно-физических свойств субстратов с добавлением остаточных компонентов переработки водорослей (В)

Table 1

Comparative characteristics of the water-physical properties of substrates with the addition of residual components of algae processing (В)

Вариант	Зольность, % / Ash content, %	Плотность, г/см ³ / Density, g/cm ³	Истинная плотность, г/см ³ / True density, g/cm ³	Пористость общ., % / Porosity gen., %	Полная влагоемкость, % / Full moisture capacity, %
10Т*	7,75	0,164	1,698	91,1	564,6
1чВ+9чТ	7,70	0,181	1,415	87,2	535,9
2чВ+8чТ	7,47	0,178	1,389	87,9	548,7
3чВ+7чТ	6,98	0,180	1,273	86,4	556,7
4чВ+6чТ	6,83	0,179	1,298	86,8	572,6
5чВ+5чТ	6,26	0,197	1,405	85,9	506,5
6чВ+4чТ	6,06	0,190	1,319	85,6	515,1
7чВ+3чТ	5,93	0,177	1,213	85,9	532,5

В – водорослевые компоненты / algal components, Т – субстрат / substrate.

Источник: собственные экспериментальные данные / Source: own experimental data

Более заметные изменения происходят с агрохимическими свойствами при добавлении к торфяному субстрату водорослевого компонента (табл. 2). Как отмечалось в ранее проведенных исследованиях других авторов [12] водоросли и их жмых снижают

кислотность почвы/субстрата, пропорционально величине добавки на 0,3-0,6 рН на каждые 10 % внесения водорослевого компонента. Однако при применении готовых субстратов, в частности “Велторф”, используемый в опыте с рН 4,5-5,0, подобное подщелачивание может быть нежелательным, так как

реакция почвенного раствора становится не соответствующей биолого-экологическим требованиям хвойных пород. Так, согласно [28] наиболее оптимальной кислотностью среды для выращивания сеянцев ели является рН 4,0-5,0, для сосны – 4,5-5,5, для лиственницы – 5,5-6,0. В то же время, подобное

влияние сухих компонентов переработки водорослей может быть полезным при применении в качестве основы для создания субстратов из природного торфа, кислотность которого часто не превышает рН заменять химические раскислители.

Таблица 2

Сравнительная характеристика агрохимических свойств субстратов с добавлением компонентов переработки водорослей (В)

Table 2

Comparative characteristics of the agrochemical properties of substrates with the addition of algae processing components (B)

Вариант / Variant	Обменная кислотность, рН / Metabolic acidity, рН	Массовая доля, мг/100г (на сухое вещество) / Mass fraction, mg/100g (on dry matter)		
		калия в пересчете на К ₂ О, мг/100г / potassium in terms of К ₂ О, mg/100g	нитратного азота, мг/100г / nitrate nitrogen, mg/100g	фосфора в пересчете на Р ₂ О ₅ , мг/100г / phosphorus in terms of Р ₂ О ₅ , mg/100g
10Т*	5,0	494	6,61	26,86
1чВ+9чТ	5,7	617	17,38	23,69
2чВ+8чТ	6,2	733	15,65	17,94
3чВ+7чТ	6,6	662	13,49	13,48
4чВ+6чТ	7,1	624	10,12	7,14
5чВ+5чТ	7,7	543	1,15	0,30
6чВ+4чТ	8,0	479	1,17	0,30
7чВ+3чТ	8,4	457	2,00	0,30

* В - водорослевые компоненты / algal components, Т – субстрат / substrate.

Источник: собственные экспериментальные данные / Source: own experimental data

Внесение сухих остаточных компонентов переработки водорослей, не смотря на низкое содержание в них подвижного калия, не снижает его количество в экспериментальных субстратах, а даже способствуют его некоторому повышению при внесении не более 50 % по объему. Это может быть связано с высвобождением калия из сухих отходов водорослей при относительно невысокой кислотности

при малых дозах их внесения в субстрат. При увеличении подщелачивания, высвобождение калия снижается, что отражается в криволинейности зависимости (рис. 1). По фосфатам и нитратному азоту проявляется прямолинейная и близкая к ней связь с долей сухих водорослевых компонентов, внесенных в субстрат.

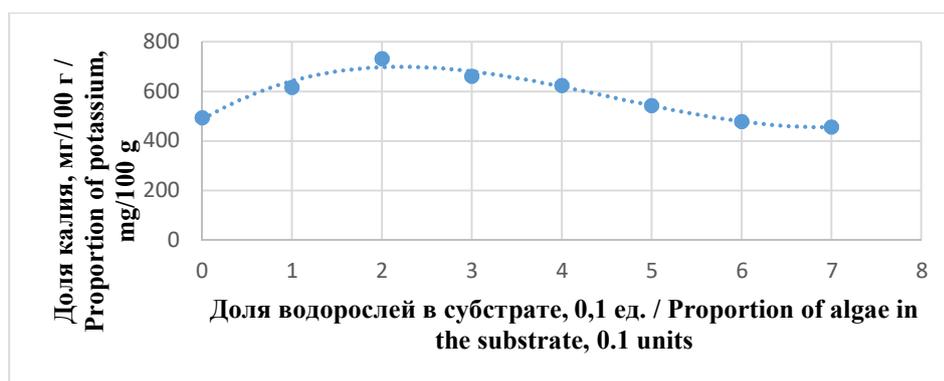


Рисунок 1. Зависимость содержания подвижного калия (K₂O) в экспериментальных субстратах

Figure 1. Dependence of mobile potassium share (K₂O) in experimental substrates

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Зависимость выражается уравнением:

$$D_k = 486,9 + 216,05 \cdot D_v - 64,672 \cdot D_v^2 + 4,7348 \cdot D_v^3 \quad (1)$$

Где D_k – Доля калия, мг/100 г

D_v – доля водорослей в субстрате, 0,1 ед

Увеличение содержания фосфора, привнесимого с отходами водорослей, что было получено в результатах других авторов [14] нами не наблюдалось. Наоборот, внесение водорослевого компонента в субстрат снижает содержание подвижного фосфора в почвенном растворе. Резкое снижение содержания фосфатов, возможно, связанное с фиксацией органическими материалами водорослевого компонента их мобильных форм, начинается с добавки их в экспериментальный субстрат в количестве 30 %, а при увеличении доли отходов в субстрате до 50 % и повышении величины pH более 7, в почвенном растворе остаются его следовые количества.

Аналогично фосфору прослеживается и изменение содержания нитратного азота в экспериментальных субстратах с использованием различных долей внесения компонентов водорослевого производства. При их доле до 40 % идет отдача азота нитратных форм, а при увеличении доли 50 % и выше – сорбция и поглощение из почвенного раствора.

Возможно, именно на сорбирующей роли водорослей и основано мнение о возможности использования отходов их переработки для поглощения азота и фосфора при очистке сточных вод.

По мнению Abobatta, 2024 [16] на эффективность экстрактов морских водорослей, используемых

в сельском хозяйстве, влияют различные факторы, такие как источник морских водорослей, методы производства и концентрация. Важна также и технология их применения для улучшения роста растений.

Добавка компонентов водорослевого производства может быть перспективной с точки зрения улучшения агрохимических свойств субстратов при их использовании в малых дозах, при внесении не более 20 %. Их использование поможет поддержать содержание нитратного азота и калия, но потребует дополнительного внесения фосфорных удобрений.

Проследили динамику изменения агрохимических свойств субстратов при внесении в их состав компонентов водорослей. Это связано с проведением подкормок, применяемых в технологии выращивания посадочного материала. Дополнительное внесение минеральных удобрений может изменить свойства субстрата, а органические добавки либо предотвратить, либо усилить происходящие изменения.

Субстрат без добавки сухих водорослей в течение цикла выращивания посадочного материала (примерно 150 дней) несколько подщелачивается (на 0,5-0,9 pH). Экспериментальные субстраты с добавкой водорослевого компонента ведут себя по-разному, в зависимости от доли их внесения. При добавке 10-30 % водорослей в субстрат изменения

соответствуют колебаниям субстрата без добавок, то есть идет подщелачивание в такой же пропорции рН (рисунок 2). При больших добавках сухих водорослей, наблюдается некоторое подкисление, рН снижается на 0,1 – 0,2 единица на каждые 10 % ор-

ганических водорослевых компонентов в экспериментальном субстрате. Вероятно, в этом случае начинают действовать поглощательные свойства водорослей, которые проявились с подвижным фосфором и нитратным азотом (табл. 3).

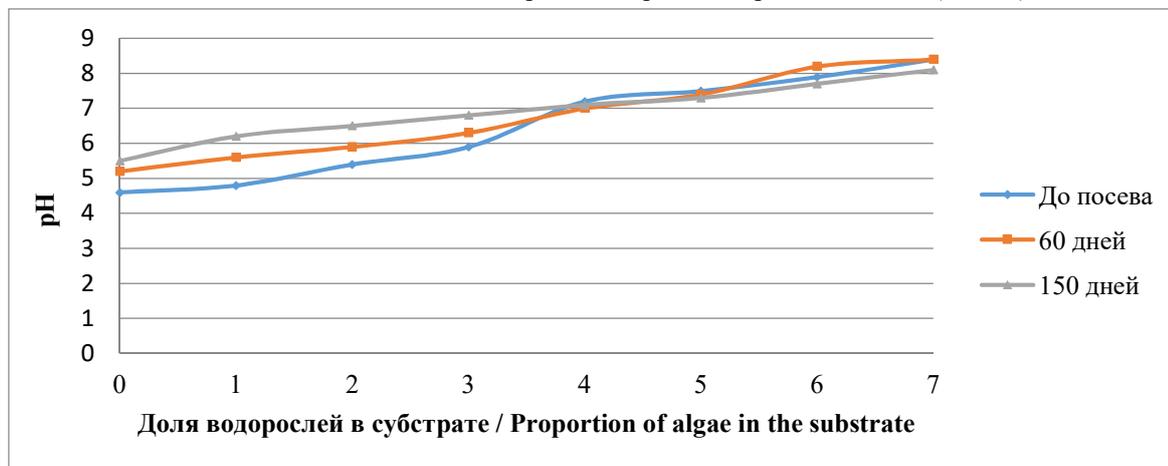


Рисунок 2. Динамика реакции среды при выращивании однолетних сеянцев сосны обыкновенной
 Figure 2. Dynamics of environmental reaction when growing annual pine seedlings
 Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

В процессе выращивания сеянцев по принятой в теплице технологии, несмотря на поддерживающий потенциал вносимых минеральных подкормок, в контрольном и экспериментальных субстратах происходили потери питательных веществ, расходуемых сеянцами сосны в течение ротации их выращивания. Содержание подвижного калия во всех вариантах опыта синхронно уменьшилось в 4-5 раз (таблица 3). Содержание нитратного азота снизилось до 4-5 % от начального количества в исходном субстрате, не зависимо от доли его внесения. Не исключено влияние поглощательных свойств водорослевого компонента, которое отмечалось выше, так как в контрольном варианте через 100 дней вегетации и внесения подкормок, включающих азот, содержание его восстанавливается до 22 % от начального.

В то же время, внесение сухих остаточных компонентов водорослей способствовало повышению фосфатов в подвижной форме, вероятно за счет их высвобождения в процессе компостирования на фоне подщелачивания почвенного раствора (рисунок 2). Содержание фосфатов значимо зависит от доли сухих водорослевых отходов в субстрате (коэффициент корреляции $r = 0,780$).

Получены уравнения связи массовой доли химических элементов (Y), в % сухого вещества от срока посева с долей сухих компонентов переработки водорослей (X) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице на субстратах (рис. 3 – 5).

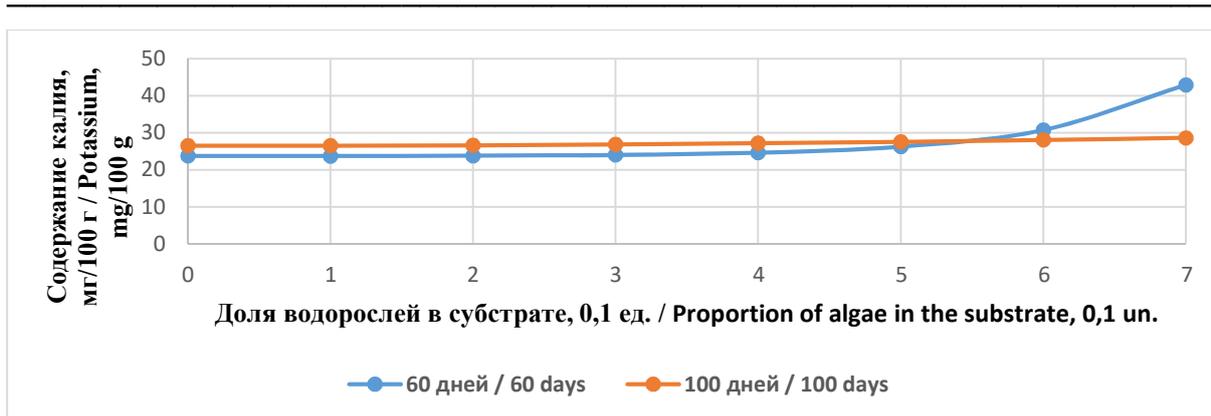


Рисунок 3. Динамика изменения содержания калия в пересчете на K_2O (уравнения 3, 4).

Figure 3. Dynamics of changes in potassium in terms of K_2O (equations 3, 4)

$$60 \text{ дней: } Y=23,686+0,01759 \cdot e^x \quad R^2=0,74 \quad (3)$$

$$100 \text{ дней: } Y=26,54+0,0437 \cdot X^2 \quad R^2=0,26 \quad (4)$$

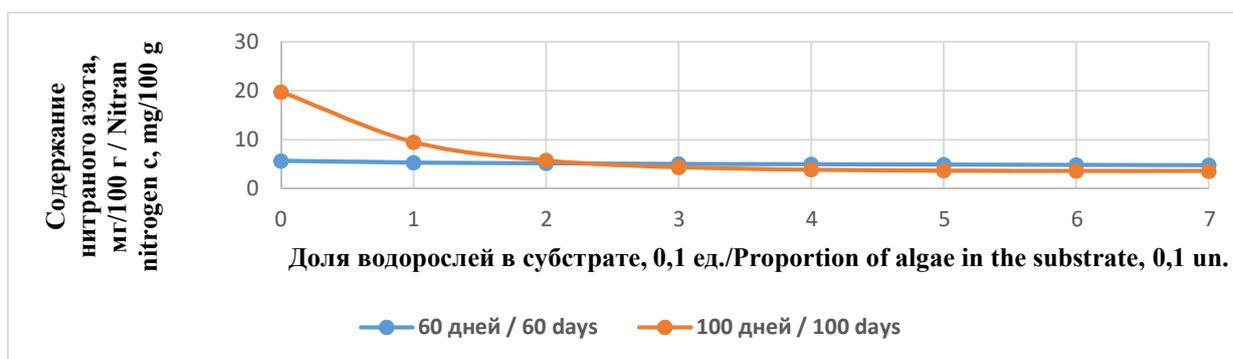


Рисунок 4. Динамика изменения нитратного азота (уравнения 5, 6)

Figure 4. Dynamics of changes in nitrate nitrogen (Equations 5, 6)

$$60 \text{ дней: } Y=5,86-0,3339 \cdot x^{0,5} \quad R^2=0,24 \quad (5)$$

$$100 \text{ дней: } Y=3,589+16,177 \cdot e^{-x} \quad R^2=0,285 \quad (6)$$

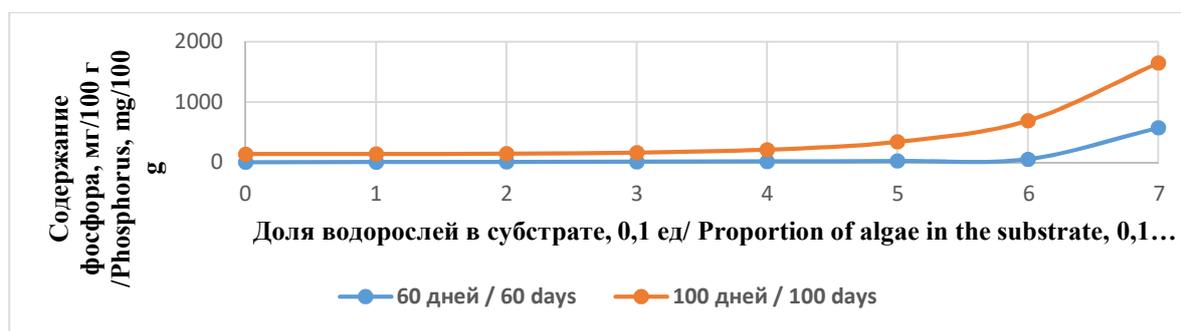


Рисунок 5. Динамика изменения фосфора в пересчете на P_2O_5 (уравнения 7, 8)

Figure 5. Dynamics of changes in phosphorus in terms of P_2O_5 (equations 7, 8)

$$60 \text{ дней: } Y=(6,877+0,335 \cdot x)/(1-0,140 \cdot x) \quad R^2=0,24 \quad (7)$$

$$100 \text{ дней: } Y=138,3+1,376 \cdot e^x \quad R^2=0,28 \quad (8)$$

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Таблица 3

Динамика изменения массовой доли химических элементов (% сухого вещества от даты посева) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице на субстратах с добавлением сухих компонентов переработки водорослей

Table 3

Dynamics of the mass fraction of chemical elements (% of dry matter from the date of sowing) when growing pine seedlings in a greenhouse on substrates with the addition of dry residual components from algae processing

Вариант / Variant	Калий в пересчете на K ₂ O / Potassium in terms of K ₂ O		Нитратный азот / Nitrate nitrogen		Фосфор в пересчете на P ₂ O ₅ / Phosphorus in terms of P ₂ O ₅	
	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days	60 дней / 60 days	100 дней / 100 days
10Т*	23,8	26,5	4,5	21,8	4,0	71,9
1В+9Т	25,4	24,8	8,4	4,4	17,7	101,9
2В+8Т	30,1	29,7	4,5	4,5	6,1	134,7
3В+7Т	21,9	26,9	4,5	4,5	12,9	293,5
4В+6Т	24,9	29,1	4,9	4,9	12,9	277,6
5В+5Т	18,6	24,5	4,2	4,2	13,0	397,8
6В+4Т	31,6	25,1	4,6	4,6	100,0	516,0
7В+3Т	43,7	31,6	5,4	5,4	511,3	1701,3

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

После первого года ротации провели сравнение роста сеянцев сосны обыкновенной между вариантами используемых субстратов.

Добавление к субстрату “Велторф” водорослевого компонента не улучшило рост и развитие однолетних сеянцев сосны (табл. 4).

Таблица 4

Характеристика однолетних сеянцев сосны, выращенных на субстрате с добавлением компонентов переработки водорослей

Table 4

Characteristics of annual pine seedlings grown on a substrate with the addition of residual components of algae processing

Вариант / Variant	Диаметр у шейки корня, мм / Diameter at the root neck, mm	Высота сеянца, см / Seedling height, cm	Длина стержневого корня, см / Rod length root, cm	Количество сеянцев с боковыми побегами, % / Number of seedlings on the sides shoots, %	Масса 10 сеянцев, абс. сух., г / Weight of 10 seedlings, abs. dry, g		Соотношение надземной части / корни / Aboveground part / roots ratio
					наземная часть	корни	
10Т / 10							
1В9Т / 1W9S							

2B8T / 2W8S							
3B7T / 3W8S							
4B6T / 4W6S							
5B5T / 5W5S							
6B4T / 6W4S							
7B3T / 7W3S							

* В – отходы переработки водорослей (waste), Т – субстрат (substrate); ** – в числителе – среднее значение, в знаменателе – минимальное и максимальное.

Источник: собственные экспериментальные данные | Source: own experimental data

Наблюдается снижение по высоте на 15-43 %, по диаметру у шейки корня на 13-27 %, уменьшение массы растений и развитости (число боковых побегов). Все эти снижения наблюдаются с добавки малых объемов (10 %) водорослевого компонента и возрастают с увеличением их доли в субстрате. Не исключено, что главным фактором ограничения роста, явилось подщелачивание субстрата, выше биологически обоснованного для породы уровня, и снижающего развитие микоризы и поступление питательных веществ [29].

Единственный показатель, который позитивно среагировал на внесение водорослевого компонента – главный стержневой корень. Стимулирование роста корневой системы водорослевыми компонентами отмечалось в исследованиях [14, 16]. В результате, несмотря на снижение массы корней и надземной части по сравнению с контролем, их соотношение с надземной частью однолетних сеянцев сосны обыкновенной изменилось незначительно, в пределах 5-6 %.

Заключение

Экспериментальное использование сухих остаточных отходов переработки ламинарии, аскофиллума и фукуса, полученных на Архангельском водорослевом комбинате, для добавки в субстрат (“Велторф”) при выращивании сеянцев сосны обыкновенной в теплице, позволило проследить механизм изменения водно-физических и агрохимических свойств при различной доле их применения. Добавление водорослевого компонента к субстрату на основе верхового торфа незначительно меняет его

рыхлость и водопоглощение. Агрохимические свойства субстрата реагируют на внесение сухих водорослевых компонентов в зависимости от соотношения их в исходном субстрате. При малых дозах внесения (10-20 % по объему) они могут оказать стимулирующее или поддерживающее значение в обеспечении почвенного раствора нитратным азотом и подвижными формами калия и фосфора. Однако при увеличении дозы внесения вступают в действие сорбирующие силы органического компонента водорослей, и перехватывают водорастворимые вещества, которые могли бы поступить на питание растений. Это ведет к ухудшению роста посадочного материала. Одной из причин подобного поведения водорослевого компонента может быть резкое подщелачивание субстратов при больших дозах внесения водорослевого компонента.

Не смотря на весьма позитивные ожидания и результаты, полученные другими авторами, механизм действия остаточных компонентов водорослевого производства Архангельского водорослевого комбината отличается, и требует дополнительного рассмотрения в различных вариантах использования. Можно ожидать его большую положительную результативность при использовании кислых природных торфов в качестве базовой основы для приготовления субстратов.

Список литературы

1. Dhargalkar V.K., Pereira N. Seaweed: promising plant of the millennium // *Science and Culture*. 2005; 71: 60–66 (in Engl.)
2. Hasselström, L., Thomas, J.B., Nordström, J. *et al.* Socioeconomic prospects of a seaweed bioeconomy in Sweden // *Science Report*. 2020; 10: 1610. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58389-6> (in Engl.)
3. Zhang, L., Liao, W., Huang, Y. *et al.* Global seaweed farming and processing in the past 20 years // *Food Product Process and Nutrient*. 2022; 4: 23. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2> (in Engl.)
4. Buschmann A.H., Camus C., Infante J., Neori A., Israel Á., Hernández-González M.C., Pereda S.V., Gomez-Pinchetti J.L., Golberg A., Tadmor-Shalev N. & Critchley A.T. Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity, *European Journal of Phycology*, 2017; 52,4: 391–406. DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175 (in Engl.)
5. Подкорытова А. В., Игнатова Т. А., Бурова Н. В., Усов А. И. Перспективные направления рационального использования промысловых красных водорослей рода *Ahnfeltia*, добываемых в прибрежных зонах морей России // *Труды ВНИРО*. – 2019. Т. 176. – С. 14–26.
6. Коровкина Н.В., Богданович Н.И., Кутакова Н.А. Исследование состава бурых водорослей Белого моря с целью дальнейшей переработки // *Химия растительного сырья*. 2007. – №1. – С. 59–64.
7. Наумов И.А., Буркова Е.А., Канарская З.А., Канарский А.В. Водоросли - источник биополимеров, биологически активных веществ и субстрат в биотехнологии. Часть 1. Биополимеры клеток тканей водорослей // *Вестник Казанского технологического университета*. –2015. –№1. – с. 198–203.
8. Popescu M. Agricultural uses of seaweeds extracts // *Current trends in natural sciences*. 2013; 2: 36–39 (in Engl.)
9. Щербак А.П., Тишков С.В. Водоросли Белого моря и перспективы их использования // *Вестник Российского университета Дружбы народов*. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. –2015. –№4. – С. 60–67.
10. Eyra M.C., Defosse G.E., Dellatorre F. Seaweed compost as an amendment for horticultural soils in Patagonia, Argentina. // *Compost Sci. Util*. 2008; 16L 119–124. (in Engl.)
11. Pandya M., Mehta S. Seaweed Utilizing as a Biostimulants in Agriculture Sector: A Review // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*. 2023; 11 Is. III <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49561> (in Engl.)
12. Satyabrata S., Mitali P., Lakshman N. Uses of seaweed and its application to human welfare: a review // *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*. 2016; 8: 12–20 (in Engl.)
13. Юркевич М.Г., Сидорова В.А., Дубровина И.А. Влияние применения экстрактов бурой морской водоросли *Fucus vesiculosus* L. на плодородие почв и продуктивность растений [Электрон. ресурс] // *АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал*. – 2021. – №5. Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/5/st_517.pdf. Дата обращения 06.01.2025 г. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215517>
14. Kaur I. Seaweeds: Soil Health Boosters for Sustainable Agriculture. In: Giri, B., Varma, A. (eds) *Soil Health. Soil Biology*. 2020; 59. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_10 (in Engl.)
15. Abobatta W.F. Seaweed Extract as a Tool for Sustainable Agriculture // *JOJ Horticulture* 2024; 4(2): JOJHA.MS.ID.555634 DOI: 10.19080/JOJHA.2023.04.555634 (in Engl.)
16. MacKinnon S.A., Craft C.A., Hiltz D., Ugarte R. Improved methods of analysis for betaines in *Ascophyllum nodosum* and its commercial seaweed extracts // *J. Appl. Phycol*. 2010; 22: 489–494. (in Engl.)
17. Chen S.K., Edwards C.A., Subler S. The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms // *Soil Biol. Biochem*. 2003; 35: 9–19. (in Engl.)
18. Наквасина Е.Н., Любова С.В. Почвоведение: учебн. пособие., Архангельск: САФУ, 2016. 146 с.
19. Мисников О.С. Физико-химические основы торфяного производства: учебное пособие / О.С. Мисников, О.В. Пухова, Е.Ю. Черткова. Тверь: Тверской государственный технический университет, 2015. –168 с.
20. Luo, X., Wu, Y., Wang, S. *et al.* Frontier review of key reduction technologies and resource utilization of waste during the seaweed gel production process // *Blue Biotechnology*. 2024. 1, 12 <https://doi.org/10.1186/s44315-024-00013-7> (in Engl.)
21. Torres, M.D., Kraan, S. & Domínguez, H. Seaweed biorefinery // *Rev Environ Sci Biotechnol*. 2019. 18, 335–388 <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09496-y> (in Engl.)
22. Sushri S.B., Elavarasan K., Safeena M.P., Devi H.M., Tejpal C.S. Valorisation of Seaweed Waste from // *Agar Processing Industry. Examines Mar Biol Oceanogr*. 2023; 5(3): EIMBO. 614 DOI: 10.31031/EIMBO.2023.05.000614 (in Engl.)
23. López-Mosquera E., Fernández-Lema E., Villares R., Corral R., Alonso B., Blanco C. Composting Fish Waste and Seaweed to Produce a Fertilizer for use in Organic Agriculture // *Procedia Environmental Sciences*. –2011; 9:113–117. DOI- 10.1016/j.proenv.2011.11.018 (in Engl.)

24. Michalak I., Tuhy Ł., Chojnacka K. Co-Composting of Algae and Effect of the Compost on Germination and Growth of *Lepidium sativum* // Pol. J. Environ. Stud. 2016; 25 (3):1107–1115. DOI: 10.15244/pjoes/61795 (in Engl.)
25. Cole A.J., Roberts D.A., Garside A.L. et al. Seaweed compost for agricultural crop production // J. Appl. Phycol. 2016; 28: 629–642 <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0544-2> (in Engl.)
26. Коновалова Д.А., Пономарев Д.Д., Братилова Н.П., Коротков А.А., Мантулина А.В. Выращивание семян сосны кедровой сибирской с закрытой крневой системой на экспериментальных субстратах // Хвойные бореальной зоны. –2023. –Т. XLI, № 5. –С. 379–383 DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-379-383
27. Субстраты торфяно-перлитные технические условия ТУ ВУ 100061961.002-2015 Утв. Первый заместитель Министра Министерства лесного хозяйства Республики Беларусь А. А. Кулик 31.03.2015 г. <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf>;
28. Наквасина Е.Н. Ритмика роста семян сосны и ели. Биоэкологическое обоснование агротехники выращивания. Архангельск, 2016. –158 с.

References

1. Dhargalkar V.K., Pereira N. *Seaweed: promising plant of the millennium* // Science and Culture. 2005; 71: 60-66
2. Hasselström, L., Thomas, JB., Nordström, J. et al. *Socioeconomic prospects of a seaweed bioeconomy in Sweden* // Science Report. 2020; 10: 1610. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-58389-6>
3. Zhang, L., Liao, W., Huang, Y. et al. *Global seaweed farming and processing in the past 20 years* // Food Product Process and Nutrient. 2022; 4: 23. <https://doi.org/10.1186/s43014-022-00103-2>
4. Buschmann A.H., Camus C., Infante J., Neori A., Israel Á., Hernández-González M.C., Pereda S.V., Gomez-Pinchetti J.L., Golberg A., Tadmor-Shalev N. & Critchley A.T. *Seaweed production: overview of the global state of exploitation, farming and emerging research activity*, European Journal of Phycology, 2017; 52, 4: 391-406. DOI: 10.1080/09670262.2017.1365175
5. Podkorytova A. V., Ignatova T. A., Burova N. V., Usov A. I. *Perspektivnye napravleniya racional'nogo ispol'zovaniya promyslovykh krasnykh vodoroslej roda Ahnfeltia, dobyvaemykh v pribrezhnykh zonah morej Rossii* [Promising areas of racial use of industrial red reservoirs of the genus Anfeltia, mined in the coastal zones of the Russian sea] // Trudy VNIRO = Proceedings of VNIRO. 2019;176: 14–26. (In Russ.)
6. Korovkina N.V., Bogdanovich N.I., Kutakova N.A. *Issledovanie sostava burykh vodoroslej Belogo morya s cel'yu dal'nejshej pererabotki* [Investigation of the composition of brown algae of the White Sea for the purpose of further processing] // Himiya rastitel'nogo syr'ya = Chemistry of plant raw materials. 2007;1: 59–64. (In Russ.)
7. Naumov I.A., Burkova E.A., Kanarskaya Z.A., Kanarskij A.V. *Vodorosli - istochnik biopolimerov, biologicheski aktivnykh veshchestv i substrat v biotekhnologii. Chast' I. Biopolimery kletok tkanej vodoroslej* [Algae is a source of biopolymers, biologically active substances and a substrate in biotechnology. Part 1. Biopolymers of algae tissue cells] // Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta = Bulletin of Kazan Technological University.. 2015;1: 198-203. (In Russ.)
8. Popescu M. *Agricultural uses of seaweeds extracts* // Current trends in natural sciences. 2013. V. 2. Pp. 36–39
9. Shcherbak A.P., Tishkov S.V. *Vodorosli Belogo morya i perspektivy ih ispol'zovaniya* [Algae of the White Sea and prospects for their use] // Vestnik Rossijskogo universiteta Druzhyby narodov. Seriya: Ekologiya i bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti = Bulletin of the Peoples' Friendship University of Russia. Series: Ecology and life safety.. 2015; 4: 60–67. (in Russ.)
10. Eyra M.C., Defosse G.E., Dellatorre F. *Seaweed compost as an amendment for horticultural soils in Patagonia, Argentina*. // Compost Sci. Util. 2008. –V. 16. – Pp. 119–124.
11. Pandya M., Mehta S. *Seaweed Utilizing as a Biostimulants in Agriculture Sector: A Review* // International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET). 2023; 11. Is. III <https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.49561>
12. Satyabrata S., Mitali P., Lakshman N. *Uses of seaweed and its application to human welfare: a review* // International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences. 2016; 8: 12–20.
13. Yurkevich M.G., Sidorova V.A., Dubrovina I.A. *Vliyaniye primeneniya ekstraktov buroj morskoy vodorosli Fucus vesiculosus L. na plodorodie pochv i produktivnost' rastenij* [The effect of using extracts of brown seaweed *Fucus vesiculosus* L. soil fertility and plant productivity] // AgroEkoInfo: Elektronnyj nauchno-proizvodstvennyj zhurnal =

AgroEcoInfo: An electronic scientific and production journal. 2025; 5. Rezhim dostupa: http://agroeco.info.ru/STATYI/2021/5/st_517.pdf. Data obrashcheniya 06.01.2025 g. DOI: <https://doi.org/10.51419/20215517> (in Russ.)

14. Kaur, I. *Seaweeds: Soil Health Boosters for Sustainable Agriculture*. In: Giri, B., Varma, A. (eds) *Soil Health. Soil Biology*. 2020. V. 59. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44364-1_10

15. Abobatta W.F. *Seaweed Extract as a Tool for Sustainable Agriculture* // *JOJ Horticulture* 2024. 4(2): JOJHA.MS.ID.555634 DOI: 10.19080/JOJHA.2023.04.555634

16. MacKinnon S.A., Craft C.A., Hiltz D., Ugarte R. *Improved methods of analysis for betaines in *Ascophyllum nodosum* and its commercial seaweed extracts* // *J. Appl. Phycol.* 2010. V. 22 P. 489–494.

17. Chen S.K., Edwards C.A., Subler S. *The influence of two agricultural biostimulants on nitrogen transformations, microbial activity, and plant growth in soil microcosms* // *Soil Biol. Biochem.* 2003.–35. –P. 9–19.

18. Nakvasina E.N., Lyubova S.V. *Pochvovedenie: uchebn. Posobie* [Soil Science: textbook. Stipend]. Arhangel'sk: SAFU, 2016. 146 s. (in Russ.)

19. Misnikov O.S. *Fiziko-himicheskie osnovy torfyanogo proizvodstva: uchebnoe posobie* [Physico-chemical fundamentals of peat production: training manual] / O.S. Misnikov, O.V. Puhova, E.Yu. Chertkova. Tver': Tverskoj gosudarstvennyj tekhnicheskij universitet = Tver: Tver State Technical University. 2015. 168 p. (in Russ.)

20. Luo, X., Wu, Y., Wang, S. et al. *Frontier review of key reduction technologies and resource utilization of waste during the seaweed gel production process* // *Blue Biotechnology*. 2024; 1: 12 <https://doi.org/10.1186/s44315-024-00013-7>

21. Torres, M.D., Kraan, S. & Domínguez, H. *Seaweed biorefinery* // *Rev Environ Sci Biotechnol.* 2019; 18: 335–388 <https://doi.org/10.1007/s11157-019-09496-y>

22. Sushri S.B., Elavarasan K., Safeena M.P., Devi H.M., Tejal C.S. *Valorisation of Seaweed Waste from Agar Processing Industry*. *Examines Mar Biol Oceanogr.* 2023; 5(3): 614 EIMBO. DOI: 10.31031/EIMBO.2023.05.000614

23. López-Mosquera E., Fernández-Lema E., Villares R., Corral R., Alonso B., Blanco C. *Composting Fish Waste and Seaweed to Produce a Fertilizer for use in Organic Agriculture* // *Procedia Environmental Sciences*. 2011; 9: 113–117. DOI- 10.1016/j.proenv.2011.11.018

24. Michalak I., Tuhy Ł., Chojnacka K. *Co-Composting of Algae and Effect of the Compost on Germination and Growth of *Lepidium sativum** // *Pol. J. Environ. Stud.* 2016; 25, 3: 1107–1115. DOI: 10.15244/pjoes/61795

25. Cole A.J., Roberts D.A., Garside A.L. et al. *Seaweed compost for agricultural crop production* // *J. Appl. Phycol.* 2016; 28: 629–642 <https://doi.org/10.1007/s10811-015-0544-2>

26. Konovalova D.A., Ponomarev D.D., Bratilova N.P., Korotkov A.A., Mantulina A.V. *Vyrashchivanie seyancev sosny kedrovoj sibirskoj s zakrytoj krnevoj sistemoj na eksperimental'nyh substratah* [Cultivation of Siberian cedar pine seedlings with a closed root system on experimental substrates] // *Hvojnye boreal'noj zony = Conifers of the boreal zone* 2023; XLI, 5: 379–383 DOI: 10.53374/1993-0135-2023-5-379-383 (in Russ.)

27. *Substraty torfjano-perlitnye tekhnicheskie usloviya TU BY 100061961.002-2015* [Peat-pearlite substrates technical specifications of TU BY 100061961.002-2015] Utv. Pervyj zamestitel' Ministra Ministerstva lesnogo hozjajstva Respubliki Belarus' A. A. Kulik = Technical specifications for peat-perlite substrates TU BY 100061961.002-2015 31.03.2015 g. <https://mlh.by/lioh/2015-5/3.pdf> (in Russ.)

28. Nakvasina E.N. *Ritmika rosta seyancev sosny i eli. Bioekologicheskoe obosnovanie agrotekhniki vyrashchivaniya* [The rhythm of growth of pine and spruce seedlings. Bioecological justification of agricultural cultivation techniques.]. Arhangel'sk, 2016. 158 p. (in Russ.)

Сведения об авторах

Накvasина Елена Николаевна - доктор сельскохозяйственных наук, профессор кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7360-3975>, e-mail: e.nakvasina@narfu.ru.

Никитина Мария Викторовна – кандидат химических наук, доцент кафедры теоретической и прикладной химии Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8056-8944>, e-mail: m.nikitina@narfu.ru

Романов Евгений Михайлович – кандидат сельскохозяйственных наук, доцент кафедры лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002. ORCID: <https://orcid.org/000-0002-8225-1991>, e-mail: e.romanov@narfu.ru.

Коптев Сергей Викторович – доктор сельскохозяйственных наук, доцент, заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства, Высшей школы естественных наук и технологий ФГАОУ ВО Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия, 163002, главный научный сотрудник ФБУ Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия, 163062, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.

Information about the authors

Elena N. Nakvasina – Doctor of Agricultural Sciences, Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnaya Dvina 17, Arkhangelsk, Russia, 163002, ORCID: 0000-0002-7360-3975, e-mail: e.nakvasina@narfu.ru

Maria V. Nikitina – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor of the Department of Theoretical and Applied Chemistry of the Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, nab. Severnaya Dvina 17, Arkhangelsk, Russia, 163002, ORCID: 0000-0002-8056-8944 e-mail: m.nikitina@narfu.ru

Evgeny M. Romanov – Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies, Lomonosov Northern (Arctic) Federal University, nab. Severnaya Dvina, 17, Arkhangelsk, Russia, 163002. ORCID: 000-0002-8225-1991, e-mail: e.romanov@narfu.ru

Sergey V. Koptev – Doctor of Agricultural Sciences, Head of the Department of Forestry and Forest Management, Higher School of Natural Sciences and Technologies of the Northern (Arctic) Federal University Named after M. V. Lomonosov, Nabereznaya Severnoi Dviny, 17, Arkhangelsk, 163002 Russian Federation, chief researcher Northern Research Institute of Forestry, Nikitova Str., 13, Arkhangelsk, 163062 Russian Federation., ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5402-1953>, e-mail: s.koptev@narfu.ru.