

DOI: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-250-268


EDN: KOJVUG

УДК 574/577

Научная статья / Research article

## Влияние термовермикулита на рост и развитие овощных культур на ювенильном этапе онтогенеза

М.А. Ярцева  , И.П. Кременецкая ,  
Л.А. Иванова , М.В. Слуковская 

Кольский научный центр РАН, г. Апатиты, Российская Федерация  
 468975@mail.ru

**Аннотация.** Представлены результаты экспериментов по использованию вспученного вермикулита для проращивания семян пяти видов овощных культур, перспективных для выращивания в условиях Кольской Субарктики: свекла столовая (*Beta vulgaris* L.), капуста белокочанная (*Brassica oleracea* L.), капуста цветная (*Brassica oleracea* L. var. botrytis L.), капуста пекинская (*Brassica rapa* L. Chinese Cabbage Group), салат кочанный (*Lactuca sativa* L.). Использованы два вида субстратов из вермикулита Ковдорского месторождения, отличающихся по условиям обжига, в качестве контроля — агропочва. Показатели роста и развития растений на ювенильном этапе онтогенеза статистически значимо ( $p < 0,005$ ) отличались для трех вариантов эксперимента. Лучшие результаты получены в вариантах с применением вермикулитовых субстратов, которые способствовали более интенсивному, по сравнению с почвой, прорастанию семян, росту надземной части и корней сеянцев всех пяти овощных культур. Достоверные отличия в накоплении проростками зеленой биомассы были отмечены только в опыте со свеклой столовой. У других четырех видов разница в массе сеянцев была несущественной. Термовермикулит марки ТВ2-Н, полученный обжигом в инновационной печи конструкции А.И. Нижегородова, оказал более выраженное по сравнению с термовермикулитом марки Випон-2 положительное влияние на прорастание семян, рост сеянцев и длину корневой системы проростков изученных видов овощных культур. Субстрат ТВ2-Н рекомендован для применения в растениеводстве при проращивании семян овощных культур.

**Ключевые слова:** вермикулит, фазы развития, сельскохозяйственные растения, прорастание, всхожесть, Субарктика, Мурманская область

**Заявление о конфликте интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Финансирование. Благодарности.** Работа выполнена в рамках государственного задания по теме НИР «Стратегия развития и содержания коллекционных фондов ПАБСИ, как базы для проведения научных

© Ярцева М.А., Кременецкая И.П., Иванова Л.А., Слуковская М.В., 2024




This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License  
<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/legalcode>

изысканий в области интродукции и экологии в Арктической зоне РФ» (рег. № 1023032400462–1–1.6.19;1.6.20;1.6.4;1.6.11). Автор благодарит рецензентов за их вклад в экспертную оценку этой работы. История статьи: поступила в редакцию 9 декабря 2023 г., принята к публикации 25 января 2024 г.

**Для цитирования:** Ярцева М.А., Кременецкая И.П., Иванова Л.А., Слуковская М.В. Влияние термовермикулита на рост и развитие овощных культур на ювенильном этапе онтогенеза // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Агротомия и животноводство. 2024. Т. 19. № 2. С. 250—268. doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-250-268

## The effect of thermovermiculite on the early stages of vegetable growth and development

Maria A. Yartseva  , Irina P. Kremenetskaya ,  
Lyubov A. Ivanova , Marina V. Slukovskaya 

Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, Apatity, Russian Federation  
 468975@mail.ru

**Abstract.** Laboratory experiments on the use of expanded vermiculite for seed germination of five vegetable plant species promising for cultivation in the Kola Subarctic (*Beta vulgaris* L., *Brassica oleracea* L., *Brassica oleracea* L. var. *botrytis* L., *Brassica rapa* L. Chinese Cabbage Group, *Lactuca sativa* L.) were carried out. The research used two types of substrates from Kovdor vermiculite differing in firing conditions; agricultural soil was used as a control. Plant growth and development at the juvenile stage of ontogenesis differed significantly ( $p < 0.005$ ) for three variants of the experiment. The best results were obtained in the variants with the use of vermiculite substrates, which promoted more intensive seed germination, growth of shoots and roots in seedlings of all five vegetable crops, compared to the control (soil). Significant differences in accumulation of green biomass by seedlings were observed only in the experiment with beetroot. In the other four species, the difference in seedling weight was insignificant. New type of thermovermiculite (TV2-H), obtained by firing in an innovative furnace of A.I. Nizhegorodov's design, had a more pronounced positive effect on seed germination, seedling growth and root length of the studied species of vegetable crops, compared with Vipon-2 thermovermiculite. TV2-H thermovermiculite can be recommended for the use in crop production for germination of vegetable seeds.

**Key words:** vermiculite, ontogenesis, vegetable crops, sprouting, germination, Subarctic, Murmansk region

**Conflict of interests.** The authors declare that they have no conflict of interests.

**Funding. Acknowledgements.** The work was carried out within the framework of a state assignment on the research topic “Strategy for the development and maintenance of PABSI collection funds as a basis for conducting scientific research in the field of introduction and ecology in the Arctic zone of the Russian Federation” (reg. No. 1023032400462–1–1.6.19; 1.6.20; 1.6.4;1.6.11). The author would like to thank the reviewers for their contribution to the peer review of this paper.

**Article history:** Received: 9 December 2023. Accepted: 25 January 2024.

**For citation:** Yartseva MA, Kremenetskaya IP, Ivanova LA, Slukovskaya MV. The effect of thermovermiculite on the early stages of vegetable growth and development. *RUDN Journal of Agronomy and Animal Industries*. 2024;19(2):250—268. (In Russ.). doi: 10.22363/2312-797X-2024-19-2-250-268

## Введение

Жизненный цикл (онтогенез) растений условно можно разделить на несколько этапов. Каждый из них имеет свои отличительные особенности развития и роста структурных элементов организма, которые имеют отношение к их целевому предназначению. У двудольных цветковых растений предгенеративный период включает эмбриональный, ювенильный и виргинильный этапы онтогенеза [1]. В свою очередь ювенильный этап состоит из прорастания зародыша и включает три последовательные фазы: физическую (семена поглощают воду и набухают), биохимическую (превращение нерастворимых запасных веществ в растворимые) и морфологическую (начало роста зародыша) (рис. 1) [2]. Ювенильный этап является этапом доминирования ростовых процессов вегетативных органов — семя прорастает, образуется корневая система, растут стебель и листья. Как правило, процесс прорастания семени может длиться от трех до семи дней, после чего растение входит в стадию роста рассады, которая обычно длится в течение одного месяца.



**Рис. 1.** Последовательность процессов прорастания сухих семян цветковых двудольных растений: 1 — покой; 2 — набухание; 3 — наклевывание; 4 — рост первичных корешков; 5 — развитие ростка; 6 — становление ростка

*Источник:* фото М.А. Ярцевой

**Fig. 1.** Sequence of germination processes in dry seeds of dicotyledonous plants: 1 — dormancy; 2 — swelling; 3 — chitting; 4 — growth of primary roots; 5 — sprout development; 6 — sprout establishment

*Source:* photo by Maria A. Yartseva

Изучение роста и развития проростков семян — один из наиболее перспективных путей выявления потенциальных и адаптивных возможностей видов и может служить основой направленного отбора более устойчивых особей, что очень важно для успешного культивирования растений [3].

Выращивание здоровых и продуктивных растений из семени сложно, поскольку скорость обмена веществ и направленность процессов, происходящих в прорастающих семенах, во многом зависят не только от их состава и физиологического состояния, но и в значительной степени от обеспеченности влагой и кислородом, наличия подходящего для конкретного вида растений температурного и светового режима. Только в таких условиях жизнеспособное семя выходит из состояния анабиоза и зародыш начинает свое развитие [4]. Процесс роста зародыша из семян у большинства видов растений начинается при содержании воды в среде прорастания на уровне 20...40 % (исключение составляют семена с повышенным содержанием

белка, прорастающие при более высоком уровне влажности — 50...60 %). Однако для дальнейшего полного формирования проростков требуется еще большая влажность среды — 85...95 % [5, 6].

В качестве благоприятной среды для прорастания семян, обеспечивающей надлежащую влажность и наличие кислорода, могут служить воздухо- и влагоемкие субстраты-почвозаменители (перлит, термовермикулит, гидрогель, торф, сфагновый мох, опилки и др.). Из них наиболее перспективным общепризнан термовермикулит [7]. Он представляет собой гофрированные гранулы («гармошки»), состоящие из вспученных при обжиге пластинок минерала вермикулита [8] (рис. 2).



**Рис. 2.** Вспученные гофрированные гранулы термовермикулита

*Источник:* фото М.А. Ярцевой

**Fig. 2.** Expanded corrugated granules of thermovermiculite

*Source:* photo by Maria A. Yartseva

В Мурманской области, близ г. Ковдор, было открыто одно из богатейших в мире месторождений вермикулита [9]. Начиная с 1963 г. сотрудниками Кольского научного центра РАН проводятся научные исследования по созданию технологий эффективного применения ковдорского вермикулита в растениеводстве, в частности, для гидропонного культивирования одно- и многолетних культур защищенного грунта [10], выращивания травяной ковровой дернины (открытый грунт) [11], рассады овощных и декоративно-цветочных культур [12], в т. ч. для посева семян разных видов культурных растений [13]. Первоначально на предприятии «Ковдорслюда»

выпускался крупнофракционированный золотисто-коричневый вермикулитовый наполнитель, затем несколько модификаций субстратов марки «Верпон» и «УВС». В 2004 г. была разработана усовершенствованная электрическая печь, на которой получали вермикулитовый субстрат пяти модификаций «Випон» [14–16].

Задача по повышению эффективности тепловых агрегатов для обжига вермикулита успешно решена в конструкции электрической модульно-спусковой печи, разработанной под руководством д-ра техн. наук А.И. Нижегородова, заведующего кафедрой строительных, дорожных машин и гидравлических систем Иркутского национального исследовательского технического университета.

Экземпляр печи для выполнения исследований по тематике ИХТРЭМС КНЦ РАН изготовлен в ООО «Центр экспериментальной отработки инноваций» (директор А.В. Звездин). Электрическая модульно-спусковая печь (ЭМСП) предназначена для непрерывной высокотемпературной обработки вермикулита и сунгулита или их конгломератов [17]. По энергоэффективности ЭМСП превосходят традиционные огневые печи, работающие на углеводородном топливе [18].

Особенностью модульно-спусковой печи является использование электрической энергии для термической обработки сыпучих минералов. В пространстве обжига наклонных электрических модулей, на специальных токопроводящих головках продольно потоку сыпучей среды установлены электрические нагреватели, выполненные из полосового нихрома. Пространства между соседними полосами образуют тепловые камеры, в которых создается локализованное тепловое поле, воздействующее непосредственно на сыпучую среду, движущуюся вдоль камер. Термокрышки модулей, расположенные над нагревателями, замыкают пространство обжига.

Благодаря локализации теплового излучения, направленного непосредственно на обрабатываемый материал, удельная энергоемкость процесса обжига вермикулита в таких печах составляет 155...170 КДж/м<sup>3</sup>, тогда как в огневых печах, работающих на углеводородном топливе, она не опускается ниже 210...230 КДж/м<sup>3</sup> [17].

Исследовано влияние температуры обжига на свойства термовермикулита, полученного в печи конструкции А.И. Нижегородова (вермикулит маркирован как ТВ-Н). Установлено, что оптимальными условиями обжига является температура 500 °С [18].

Свойства полученного вермикулита сравнили с характеристиками промышленного образца — вспученного вермикулита марки ВИПОН (производитель — ООО «Випон»). При определении режимов обжига субстратов марки Випон стремились к максимальному вспучиванию, которое сочеталось бы со слабой структурой минерала и высокой прочностью суспензионного раствора, а также высоким рН воды [16].

В нашем исследовании вермикулит марки ВИПОН представлен в качестве эталонного субстрата. Вермикулит, полученный с использованием печи конструкции А.И. Нижегородова (маркировка ТВ2-Н), исследован с точки зрения его применения в агротехнологиях.

**Цель исследования** заключается в сравнительной оценке влияния разных типов субстратов на рост и развитие пяти видов овощных культур на ювенильном этапе онтогенеза.

## Материалы и методы исследования

Объекты исследования — три субстрата и пять овощных культур (табл. 1). При выборе культур предпочтение отдавалось наиболее популярным у населения овощным растениям, сорта которых включены в Госреестр по Мурманской области и рекомендованы для выращивания в условиях Кольского Заполярья.

Таблица 1

### Характеристики овощных культур

№ опыта	Культура	Вид	Сорт	Репродукция семян	Всхожесть, %
1	Свекла столовая	<i>Beta vulgaris</i> L.	'Бордо 237'	Фирма «Гавриш»	88
2	Капуста белокочанная	<i>Brassica oleracea</i> L.	'Номер первый Полярный к 206'	ВИР (Полярная опытная станция)	70
3	Капуста цветная	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>Botrytis</i> L.	'Сноуболл 123'	Фирма «Гавриш»	62
4	Капуста пекинская	<i>Brassica rapa</i> L. Chinese Cabbage Group	'Хибинская'	ВИР (Полярная опытная станция)	100
5	Салат кочанный	<i>Lactuca sativa</i> L.	'Кучерявец одесский'	Фирма «Гавриш»	80

Table 1

### Characteristics of vegetable crops

Experiment	Crop	Species	Cultivar	Seed reproduction	Germination, %
1	Beetroot	<i>Beta vulgaris</i> L.	'Bordo 237'	"Gavrish" company	88
2	Cabbage	<i>Brassica oleracea</i> L.	'Nomer pervyy Polyarnyy k 206'	Vavilov Institute of Plant Industry (Polar experimental station)	70
3	Cauliflower	<i>Brassica oleracea</i> L. var. <i>botrytis</i> L.	'Snowball 123'	"Gavrish" company	62
4	Chinese cabbage	<i>Brassica rapa</i> L. Chinese Cabbage Group	'Khibinskaya'	Vavilov Institute of Plant Industry (Polar experimental station)	100
5	Lettuce	<i>Lactuca sativa</i> L.	'Kucheryavets odesskiy'	"Gavrish" company	80

**Характеристика субстратов.** Мелкофракционированный термовермикулит марки Випон-2 использован как эталонный материал, уже прошедший испытание в растениеводстве и рекомендованный в качестве универсального субстрата для посева семян, укоренения черенков, выращивания рассады и зеленных культур. Этот искусственный субстрат обладает рядом превосходных свойств, которые отличают его от других. Особенно важны при посеве и проращивании семян его высокая влагоемкость и влагоудерживающая способность, легкость, буферность, стерильность и воздухопроницаемость [19].

Мелкофракционированный термовермикулит марки ТВ2-Н, как и более ранние и известные типы термовермикулитов, получен из ковдорского вермикулитового концентрата. Однако его обжиг был произведен в другом тепловом агрегате — инновационной ЭМСП, разработанной на базе ООО «Квалитет» (г. Иркутск) сотрудником Национального исследовательского Иркутского государственного технического университета А.И. Нижегородовым [17], поэтому характеризуется другими физико-химическими свойствами [20].

По сравнению с вермикулитом марки Випон-2 у вспученного вермикулита, полученного на ЭМСП, меньшая насыпная плотность и он является более щелочным, удерживающим меньшее количество влаги, впервые проходит испытание в растениеводстве с точки зрения возможности его применения в агротехнологиях (табл. 2).

Таблица 2

**Характеристики субстратов**

Субстрат	Показатель					
	Размер частиц, мм	Насыпная плотность, г/дм <sup>3</sup>	Влагоемкость, мас.%	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Eh, mV
ТВ2-Н	0,45...2,0	300...350	100	9,2	7,4	114
Випон-2	0,45...2,0	400...500	180	8,8	7,1	176
Почва	2,0...2,5	300...400	42,7	6,4	6,1	200

Table 2

**Growing medium characteristics**

Growing medium	Indicator					
	Particle size, mm	Bulk density, g/dm <sup>3</sup>	Moisture capacity, %	pH (H <sub>2</sub> O)	pH (KCl)	Eh, mV
TV2-H thermovermiculite	0.45...2.0	300...350	100	9.2	7.4	114
Vipon-2 thermovermiculite	0.45...2.0	400...500	180	8.8	7.1	176
Soil	2.0...2.5	300...400	42.7	6.4	6.1	200

Садовая земля (далее по тексту почва) — почвосмесь, приготовленная из дерновой, перегнойно-навозной, компостной, торфяной, листовой, огородной и хвойной земель, а также крупнозернистого речного песка, взятых в соотношениях

1:1:1:1:1:0.3:0.5 (по объему), и небольшого количества древесного угля. Этот состав рекомендуется использовать в тепличных и оранжерейных хозяйствах, а также в парниках и теплицах для таких задач, как посев семян, укоренение черенков, выращивание рассады и зеленых культур, а также культивирование различных цветочных, декоративных и овощных растений [21].

Эксперименты проводили весной 2022 г. на базе Полярной опытной станции филиала Всероссийского института генетических ресурсов растений имени Н.И. Вавилова (ВИР) и Кольского научного центра Российской академии наук (ФИЦ КНЦ РАН).

Проведено пять лабораторных опытов (по количеству видов овощных культур) длительностью 10 дней каждый. Схема каждого эксперимента включала выращивание культуры на трех вариантах субстратов (табл. 3), выполненное в пяти повторностях.

Таблица 3

Схема опытов

№ опыта	Культура	№ варианта	Субстрат	Количество повторностей <i>n</i>
1	Свекла столовая	1	ТВ2-Н	5
		2	Випон-2	5
		3	Почва	5
2	Капуста белокочанная	1	ТВ2-Н	5
		2	Випон-2	5
		3	Почва	5
3	Капуста цветная	1	ТВ2-Н	5
		2	Випон-2	5
		3	Почва	5
4	Капуста пекинская	1	ТВ2-Н	5
		2	Випон-2	5
		3	Почва	5
5	Салат кочанный	1	ТВ2-Н	5
		2	Випон-2	5
		3	Почва	5

Table 3

Experimental design

Experiment	Crop	Variant	Growing medium	Number of replications <i>n</i>
1	Beetroot	1	TV2-H	5
		2	Vipon-2	5
		3	Soil	5



End of the table 3

Experiment	Crop	Variant	Growing medium	Number of replications <i>n</i>
2	Cabbage	1	TV2-H	5
		2	Vipon-2	5
		3	Soil	5
3	Cauliflower	1	TV2-H	5
		2	Vipon-2	5
		3	Soil	5
4	Chinese cabbage	1	TV2-H	5
		2	Vipon-2	5
		3	Soil	5
5	Lettuce	1	TV2-H	5
		2	Vipon-2	5
		3	Soil	5

Субстрат объемом 250 мл помещали в пластиковые контейнеры размером 10×10×6 см и увлажняли 125 мл воды. Затем проводили прямой посев семян в субстрат с их заделкой на глубину 0,5 см и последующим орошением водой в количестве 50 мл. Посевы закрывали пленкой для сохранения влажности. После появления первых всходов пленку удаляли.

Перед посевом определяли всхожесть семян согласно ГОСТ 12038–84 с использованием фильтровальной бумаги [22] (см. табл. 1). Полученный результат учитывали при расчете нормы высева семян. Таким образом, количество высеянных семян на одну емкость составило: для свеклы столовой — 114, капусты белокочанной — 143, капусты цветной — 161, капусты пекинской — 100, салата кочанного — 125 шт.

В экспериментах проводили наблюдения за динамикой прорастания семян каждой из культур, фиксируя появление первых и массовых всходов. К непроросшим относили набухшие, но не развившиеся, а также проросшие семена с недоразвившимися зелеными семядолями. Учет проросших семян осуществляли ежедневно, вплоть до прекращения появления новых проростков. Всходы считали массовыми при достижении 50%-го уровня прорастания семян в повторностях [23, 24].

Оценку качественных показателей проростков проводили на пятые сутки эксперимента. В каждой повторности всех пяти опытов учитывали по 10 растений (всего 50 растений по всем повторностям для каждой культуры), измеряли их высоту, см, длину корней, см, и вес зеленой биомассы, г. Итоговые результаты приведены в процентах от показателей в контроле, за 100 % приняты данные, полученные в контрольном варианте.

Интенсивность освещения в помещениях составляла в пасмурные дни 6, в солнечные — 20 кЛк, температура воздуха не превышала 25...26 °С, влажность

воздуха — 60 %. Для искусственного досвечивания посевов использовали белые светодиодные лампы марки ЗНР2 3800–4300 К.

Для обработки полученных данных применяли методы описательной статистики, однофакторного дисперсионного и корреляционного анализов в программах Microsoft Excel и Statistica 8. Достоверность различий между вариантами принималась при значениях  $p < 0,05$  ( $n = 50$ ). При  $p > 0,05$  различия по вариантам считались недостоверными. Коэффициент вариации  $V$  рассчитывался по формуле

$$V = \frac{\sigma}{\mu} 100 \%,$$

где  $\sigma$  — стандартное отклонение;  $\mu$  — среднее значение. При  $V$ , %, меньше 10 степень рассеивания данных считается незначительной, если  $10 < V < 20$  — средней и при  $20 < V < 33$  — значительной.

## Результаты исследования и обсуждение

### Влияние субстратов на прорастание семян

*Появление первых всходов.* Вермикулитовые субстраты оказали положительное статистически значимое влияние на появление первых всходов у четырех овощных культур (свекла столовая, капуста белокочанная, капуста цветная, капуста пекинская) (табл. 4, опыты 1–4). В опыте со свеклой столовой наилучшие результаты отмечены в варианте с использованием термовермикулитов в качестве субстрата для прорастания, где первые всходы появились на два дня раньше, чем в контроле. В опытах с тремя видами капусты эта разница составила 1 день. На появление первых всходов семян салата кочанного вермикулитовые субстраты не оказали существенного влияния, результаты были одинаковые как в опытных, так и в контрольном вариантах — всходы появились одновременно во всех вариантах на вторые сутки от посева семян (табл. 4).

Таблица 4

### Динамика появления всходов овощных культур

Культура	Субстрат	Количество всходов, шт.					НСР <sub>05</sub> **
		1 сутки	2 сутки	3 сутки	4 сутки	5 сутки	
Свекла столовая	ТВ2-Н	33,4±1,1*	40,4±1,1	58,3±1,4	68,5±1,5	72,2±1,9	3,8
	Випон-2	36,6±0,7	48,6±0,8	63,4±1,2	81,4±1,5	87,2±2,5	2,5
	Почва	0	0	8,6±0,2	11,3±1,0	19,4±0,6	0,6
Капуста белокочанная	ТВ2-Н	0	27,6±1,5	66,3±0,7	70,1±0,8	76,0±4,0	4,0
	Випон-2	0	47,6±2,9	79,2±0,8	90,3±0,6	94,6±2,1	2,1
	Почва	0	0	11,2±0,4	20,2±0,6	27,6±0,6	0,6

Окончание табл. 4

Культура	Субстрат	Количество всходов, шт.					НСР <sub>05</sub> **
		1 сутки	2 сутки	3 сутки	4 сутки	5 сутки	
Капуста цветная	ТВ2-Н	0	14,8±1,0	64,2±0,6	88,6±1,2	94,6±2,1	4,1
	Випон-2	0	19,4±0,7	70,2±0,8	93,4±1,6	104,4±2,6	5,1
	Почва	0	0	9,8±0,4	45,2±0,9	56,0±0,4	0,8
Капуста пекинская	ТВ2-Н	0	30,8±0,6	72,3±0,9	86,7±0,6	95,6±0,3	0,6
	Випон-2	0	27,6±0,9	65,1±0,6	77,3±0,6	82,0±0,2	0,5
	Почва	0	0	18,2±1,2	54,3±0,4	68,8±0,4	0,7
Салат кочанный	ТВ2-Н	0	67,0±1,2	89,0±1,0	98,0±0,5	107,8±0,6	1,2
	Випон-2	0	59,2±0,9	79,4±0,9	84,1±0,7	90,8±0,8	1,6
	Почва	0	52,8±1,0	67,3±0,9	70,2±0,9	74,4±0,9	1,7

Примечание. \* – стандартная ошибка; \*\* – НСР<sub>05</sub> на пятые сутки экспериментов.

Table 4

### Dynamics of emergence of vegetable crops

Crop	Growing medium	Number of seedlings					LSD <sub>05</sub> **
		1 day	2 days	3 days	4 days	5 days	
Beetroot	TV2-Н	33.4±1.1*	40.4±1.1	58.3±1.4	68.5±1.5	72.2±1.9	3.8
	Vipon-2	36.6±0.7	48.6±0.8	63.4±1.2	81.4±1.5	87.2±2.5	2.5
	Soil (c)	0	0	8.6±0.2	11.3±1.0	19.4±0.6	0.6
Cabbage	TV2-Н	0	27.6±1.5	66.3±0.7	70.1±0.8	76.0±4.0	4.0
	Vipon-2	0	47.6±2.9	79.2±0.8	90.3±0.6	94.6±2.1	2.1
	Soil (c)	0	0	11.2±0.4	20.2±0.6	27.6±0.6	0.6
Cauliflower	TV2-Н	0	14.8±1.0	64.2±0.6	88.6±1.2	94.6±2.1	4.1
	Vipon-2	0	19.4±0.7	70.2±0.8	93.4±1.6	104.4±2.6	5.1
	Soil (c)	0	0	9.8±0.4	45.2±0.9	56.0±0.4	0.8
Chinese cabbage	TV2-Н	0	30.8±0.6	72.3±0.9	86.7±0.6	95.6±0.3	0.6
	Vipon-2	0	27.6±0.9	65.1±0.6	77.3±0.6	82.0±0.2	0.5
	Soil (c)	0	0	18.2±1.2	54.3±0.4	68.8±0.4	0.7
Lettuce	TV2-Н	0	67.0±1.2	89.0±1.0	98.0±0.5	107.8±0.6	1.2
	Vipon-2	0	59.2±0.9	79.4±0.9	84.1±0.7	90.8±0.8	1.6
	Soil (c)	0	52.8±1.0	67.3±0.9	70.2±0.9	74.4±0.9	1.7

Note. \* – standard error; \*\* – LSD<sub>05</sub> on the fifth day of experiments.

**Появление массовых всходов.** Вермикулитовые субстраты оказали также положительное статистически значимое влияние на появление массовых всходов у тех же четырех овощных культур (свекла столовая, капуста белокочанная, капуста цветная, капуста пекинская). Они были зафиксированы на третьи сутки после посева семян. В опыте с салатом кочанным массовые всходы зафиксированы одновременно во всех трех вариантах, разница между ними была статистически незначимой. В контрольных вариантах опыта со свеклой столовой и капустой белокочанной количество проросших семян составляло менее 50 %, тогда как в опыте с капустой цветной этот максимум был зафиксирован только на пятые сутки от посева семян, т. е. на два дня позже, чем в вариантах с использованием вермикулитовых субстратов. В опыте с капустой пекинской всхожесть на уровне 50 % отмечена в вариантах с вермикулитовыми субстратами на одни сутки раньше, чем в контроле, и это различие было статистически значимо.

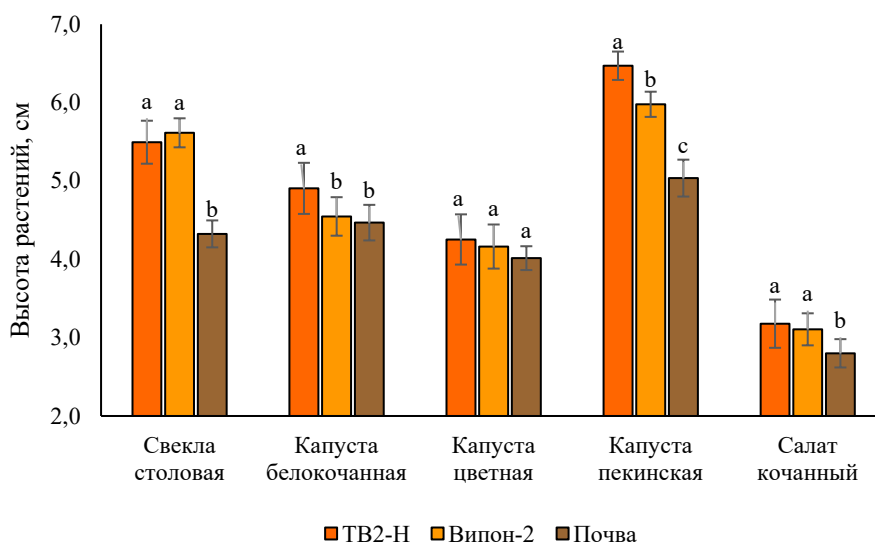
Расчет итоговой всхожести семян (общего количества взошедших семян) каждой из пяти овощных культур в проведенных экспериментах достоверностью 95 % показал, что в вариантах с вермикулитовыми субстратами этот показатель был выше, чем в контроле с почвой (см. табл. 4).

Всхожесть семян была выше в варианте 2 (Випон-2), по сравнению с вариантом 1 (ТВ2-Н) и 3 (почва): в опыте 1 (свекла столовая) — на 15 и 68 %, опыте 2 (капуста белокочанная) — на 19 и 67 % и в опыте 3 (капуста цветная) — на 10 и 48 % соответственно. Более того, в опыте 3 всхожесть семян в варианте с использованием Випона-2 оказалась выше на 4 % относительно предпосевного определения данного показателя. В опытах № 4 и 5 (капуста пекинская и салат кочанный) лучшие результаты получены в варианте 1 с применением вермикулита ТВ2-Н, а разница с вариантом 2 и контролем составила 14/17 и 27/33 % соответственно, причем в варианте 1 (вермикулит ТВ2-Н) опыта 5 возшло на 8 % больше семян, чем при предпосевном определении всхожести с использованием фильтровальной бумаги.

Дисперсионный анализ итоговых данных о количестве взошедших семян подтвердил благоприятное воздействие влагоемких воздухопроницаемых вермикулитовых субстратов на всхожесть семян всех пяти овощных культур. Коэффициент вариации  $V$  был менее 19 % во всех вариантах опытов.

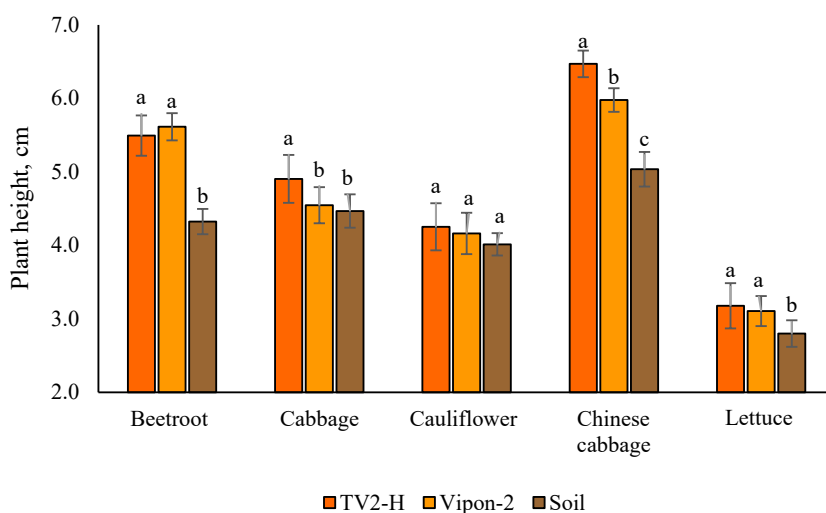
### **Влияние субстратов на биометрические показатели проростков**

**Высота проростков.** В опытах со всеми пятью видами растений, высота проростков в вариантах с вермикулитовыми субстратами была выше, чем в контроле, %: в опыте 1 на 28 и 30, опыте 2 — на 11 и 2, опыте 3 — на 8 и 5, опыте 4 — на 28 и 18 и опыте 5 — на 11 и 11 для вариантов 1 и 2 соответственно (рис. 3). Статистически достоверные различия между опытными и контрольным вариантами были выявлены только в опытах 1, 4 и 5, в то время как в опыте 2 отличия являлись достоверными только между вариантом 1 и контролем, а в опыте 3 все отличия были недостоверными. Коэффициент вариации  $V$  составил величину менее 8,5 %.



**Рис. 3.** Высота сеянцев овощных растений при выращивании в вермикулитовых субстратах и почве. Различные буквы над столбцами указывают статистически значимое различие между вариантами субстратов

Источник: выполнила М.А. Ярцева с помощью Microsoft Excel

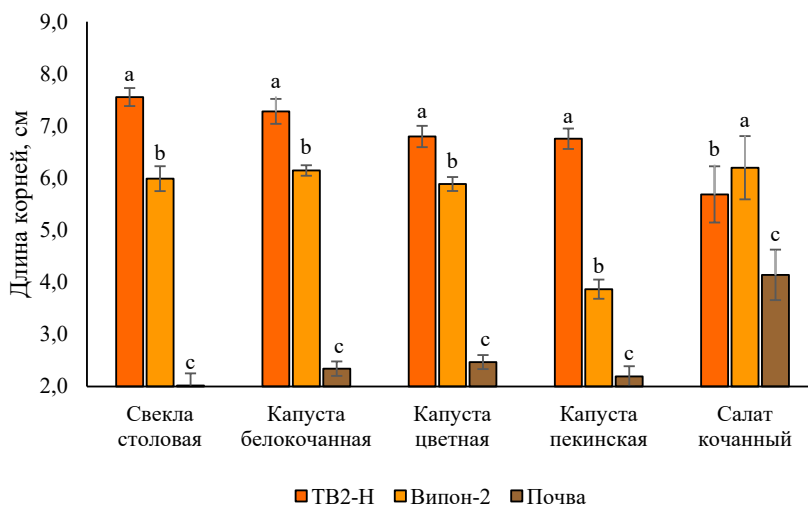


**Fig. 3.** Height of vegetable seedlings in vermiculite substrates and soil. Different lowercase letters indicate statistically significant differences between the variants of growing media

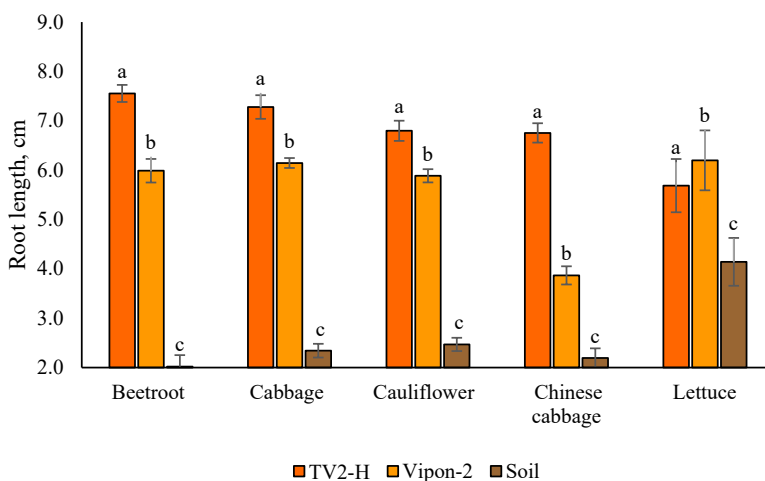
Source: created by Maria A. Yartseva using Microsoft Excel

*Длина корней.* Показатель длины корней проростков оказался более чувствительным к влиянию субстратов по сравнению с высотой проростков (рис. 4). Корни ювенильных растений были достоверно длиннее в опытных вариантах, чем в контроле, %: в опыте 1 — на 275 и 195, опыте 2 — на 217 и 170, опыте 3 — на 183 и 146,

опыте 4 — на 204 и 73, опыте 5 — на 49 и 39 для вариантов 1 и 2 соответственно. При этом следует подчеркнуть, что этот биометрический показатель в вариантах с применением вермикулита ТВ2-Н во всех пяти опытах был выше по сравнению с вариантами с Випоном-2 на 80, 47, 37, 131 и 10 % соответственно. Такую разницу в длине корней проростков между опытными вариантами можно объяснить меньшей насыпной плотностью термовермикулита ТВ2-Н.



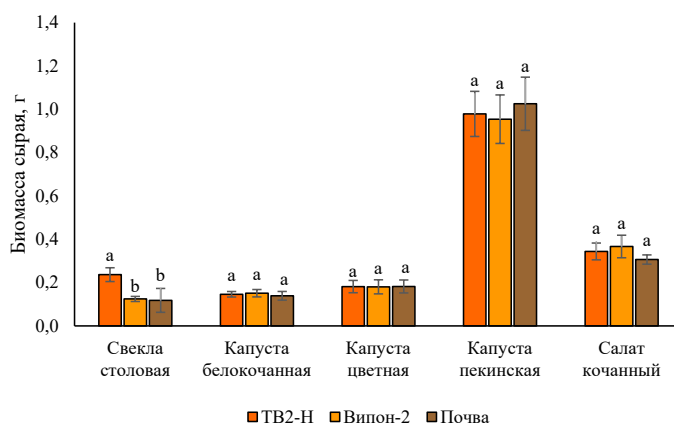
**Рис. 4.** Длина корней сеянцев овощных растений при выращивании в вермикулитовых субстратах и почве  
 Источник: выполнила М.А. Ярцева с помощью Microsoft Excel



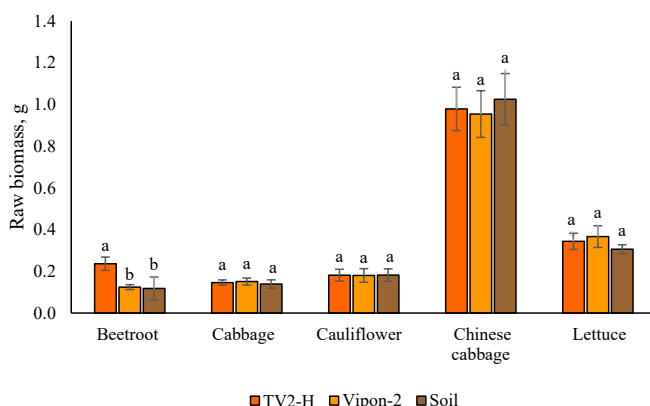
**Fig. 4.** Root length of vegetable seedlings after growing in vermiculite substrates and soil  
 Source: created by Maria A. Yartseva using Microsoft Excel

Установлена положительная линейная корреляционная связь между длиной корней и высотой сеянцев всех культур ( $r = 0,6$ ). Это позволило сделать вывод о том, что искусственные вермикулитовые субстраты-почвозаменители способны создавать более благоприятные, по сравнению с почвой, условия для роста и развития корневой системы проростков изучаемых видов овощных культур, что способствует лучшему росту надземной части сеянцев. Коэффициент вариации  $V$  составил менее 14,2 %.

**Накопление биомассы.** Достоверные отличия в накоплении проростками овощных растений зеленой биомассы были отмечены только в опыте со свеклой столовой (рис. 5). В варианте 1 она на 100 %, а в варианте 2 всего на 8 % оказалась больше, чем в варианте 3 (контроль), при этом биомасса растений в варианте с применением вермикулитового субстрата ТВ2-Н была выше в два раза по сравнению с вариантом с использованием Випона и почвы. В остальных четырех опытах разница в массе сеянцев была несущественной. Коэффициент вариации  $V$  составил менее 17,3 %.



**Рис. 5.** Сырая биомасса проростков овощных растений при выращивании в вермикулитовых субстратах и почве  
 Источник: выполнила М.А. Ярцева с помощью Microsoft Excel



**Fig. 5.** Fresh weight of vegetable seedlings after growing in vermiculite substrates and soil  
 Source: created by Maria A. Yartseva using Microsoft Excel

## Заключение

Результаты лабораторных экспериментов по проращиванию пяти перспективных для выращивания в Кольской Субарктике овощных культур (свеклы столовой, капусты белокочанной, капуста цветной, капуста пекинской и салата кочанного) показали статистически значимое влияние вермикулитовых субстратов (термовермикулита марки ТВ2-Н, термовермикулита Випон-2) на прорастание семян и биометрические параметры сеянцев.

Вермикулитовые субстраты способствовали более интенсивному, по сравнению с почвой, прорастанию семян, росту надземной части и корней сеянцев. Достоверные отличия в накоплении проростками овощных растений зеленой биомассы были отмечены только в опыте со свеклой столовой, тогда как у других четырех видов разница в массе сеянцев была несущественной.

Корреляционный анализ показал, что термовермикулит маркировки ТВ2-Н, благодаря его меньшей, по сравнению с другим почвозаменителем (Випон-2), насыпной плотности, способен создавать более благоприятные условия для роста корневой системы проростков изучаемых видов овощных культур и тем самым оказывает более существенное влияние на рост надземной части сеянцев и качественные показатели проростков, в связи с чем может быть рекомендован для применения в растениеводстве при проращивании семян овощных культур.

## Библиографический список

1. *Чепик Ф.А.* Этапы онтогенеза древесных растений и их использование в диагностических целях // Материалы 3-го международного совещания «Сохранение лесных генетических ресурсов Сибири», Красноярск, Россия / Учреждение Российской академии наук Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН. 2011. С. 147.
2. *Науменко Н.В., Потороко И.Ю., Науменко Е.Е.* Применение шкалы микрофенологических фаз для процесса контролируемого проращивания зерна пшеницы // Вестник Южно-Уральского государственного университета. 2021. Т. 9. № 2. С. 47–56. doi: 10.14529/food210205
3. *Гэлстон А., Девис П., Сэттер Р.* Жизнь зеленого растения: пер. с англ. / ред. Н.П. Воскресенская. М.: Мир, 1983. 552 с.
4. *Филиппова Г.В., Андросова Д.Н., Филиппов Э.В., Прокотьев И.А.* Влияние температуры и осадков на морфологию, прорастание и стрессоустойчивость семян некоторых представителей флоры Севера // Экология. 2019. № 6. С. 410–418. doi: 10.1134/S0367059719050044
5. *Бисенова Г.Н., Сармурзина З.С., Ракишев К.Б., Закарья К.Д., Ракишева А.К.* Разработка биосубстрата как стимулятора роста для выращивания органических видов сельскохозяйственных культур // Вестник Евразийского национального университета имени Л.Н. Гумилева. 2022. № 4 (141). С. 37–44. doi: 10.32523/2616-7034-2022-141-4-37-44
6. *Борисова Н.Н., Седенко Д.М., Овчаров К.Е.* Превращение веществ в семенах кукурузы, проращиваемых при различных температурах // Биологические основы повышения качества семян сельскохозяйственных растений. М.: Наука, 1964. С. 87.
7. *Вендило Г., Солдатова С., Аврамова Т.* Субстраты для выращивания овощей без почвы // Картофель и овощи. 1965. № 10. С. 26.
8. *Болотников Д.П.* Вермикулит. Мурманск: Кн. изд-во, 1964. 50 с.
9. *Львова И.А., Дьяконов Ю.С.* Минералогические особенности вермикулитового месторождения СССР как критерий их качества // Исследование и применение вермикулита. Л.: Наука, 1969. С. 53–54.
10. *Иванова Л.А.* Гидропонное выращивание декоративно-цветочных растений с использованием вермикулита ковдорского месторождения: препр. Апатиты, 1989. 16 с.



11. Иванова Л.А., Слукловская М.В., Кременецкая И.П., Горбачёва Т.Т. Пора озеленять Арктику. Инновационные газонные технологии для создания травяного покрова различного назначения в условиях Заполярья. Апатиты: Изд-во ФИЦ КНЦ РАН, 2020. 37 с.
12. Иванова Л.А. Технология выращивания альстромерии гибридной в Заполярье // Информ. листок Мурман. межотрасл. террит. ЦНТИ и пропаганды, 1996. № 152. 96 с.
13. Бухаров А.Ф., Балеев Д.Н., Бухарова А.Р. Кинетика прорастания семян. Методы исследования и параметры // Известия Тимирязевской сельскохозяйственной академии. 2017. № 2. С. 5–19.
14. Иванова Л.А., Котельников В.А. Перспективы гидропонного выращивания растений в условиях Мурманской области. Апатиты: Изд-во Кольского научного центра РАН, 2006. 106 с.
15. Иванова Л.А. Ковдорский вермикулит — гидропонный субстрат для северного растениеводства (Кольский полуостров) // Экология северных территорий России. Проблемы, прогноз ситуации, пути развития, решения: тез. докл. Междунар. конференции, г. Архангельск. 2002. Т. 1. С. 166–168.
16. Иванова Л.А. Особенности ускоренного формирования высококачественных газонных фитоценозов в условиях Заполярья // Субтропическое и декоративное садоводство: сб. науч. тр. / ГНУ ВНИИЦиСК Россельхозакадемии. 2013. № 49. С. 224–227.
17. Нижегородов А.И. Электрические модульно-спусковые печи с системой рекуперации энергии для обжига вермикулитовых концентратов // Новые огнеупоры. 2015. № 10. С. 22–27. doi: 10.17073/1683–4518–2015–10–22–27
18. Звездин А.В., Нижегородов А.И. Оценка энергоэффективности подвесной нагревательной системы электрической печи для тепловой обработки сыпучих материалов // Вестник ИрГТУ. 2019. Т. 23. № 1. С. 41–53.
19. Иванова Л.А., Котельников В.В., Быкова А.Е. Физико-химическая трансформация минерала вермикулита в субстрат для выращивания растений // Вестник МГТУ. 2006. Т. 9. № 5. С. 883–889.
20. Мосендз И.А., Кременецкая И.П. Оценка влияния способов термообработки вермикулита для применения его в качестве гидропонного субстрата // Труды Ферсмановской научной сессии ГИ КНЦ РАН. 2022. № 19. С. 248–252. doi: 10.31241/FNS.2022.19.045
21. Высочкина Л.И., Высочкина Т.Н. Повышение урожайности сельскохозяйственных культур за счет накопления влаги в почве // Технические науки — от теории к практике. 2014. № 38. С. 93–99.
22. Сотченко В.С., Горбачева А.Г., Ветошкина И.А., Соломко В.И. Методика определения лабораторной всхожести и силы роста семян // Кукуруза и сорго. 2021. № 1. С. 12–24. doi: 10.25715/o8981–6773–2383-a
23. Веллингтон П. Методика оценки проростков семян / под ред. Н.Г. Хорошайлова. М.: Колос, 1973. 175 с.
24. Алексейчук Г.Н., Ламан Н.А. Физиологическое качество семян сельскохозяйственных культур и методы его оценки. Мн.: Право и экономика, 2005. 48 с.

## References

1. Chepik FA. Stages of ontogenesis of woody plants and their use for diagnostic purposes. In: *Conservation of forest genetic resources of Siberia: conference proceedings*. Krasnoyarsk; 2011. p.147. (In Russ.).
2. Naumenko NV, Potoroko IY, Naumenko EE. Application of the microphenological phase scale for the process of controlled germination of wheat grain. *Bulletin of the South Ural state university*. 2021;9(2):47–56. (In Russ.). doi: 10.14529/food210205
3. Galston A, Davies P, Satter R. *Zhizn' zelenogo rasteniya* [The life of the green plant]. Moscow: Mir publ.; 1983.
4. Filippova GV, Androsova DN, Filippov EV, Prokopyev IA. Influence of temperature and precipitation on the morphology, growth, and stress resistance of seeds of some representatives of Northern flora. *Russian Journal of Ecology*. 2019;(6):410–418. (In Russ.). doi: 10.1134/S0367059719050044
5. Bisenova GN, Sarmurzina ZS, Rakishev KB, Zakarya KD, Rakisheva AK. Development of a biosubstrate as a growth stimulator for growing organic types of agricultural crops. *Bulletin of L.N. Gumilyov ENU. Bioscience Series*. 2022;(4):37–44. (In Russ.). doi: 10.32523/2616–7034–2022–141–4–37–44
6. Borisova NN, Sedenko DM, Ovcharov KE. Transformation of substances in corn seeds germinated at different temperatures. In: *Biological basis for improving the quality of seeds of agricultural plants: conference proceedings*. Moscow; 1964. p.87. (In Russ.).
7. Vendilo G, Soldatova S, Avramova T. Substrates for growing vegetables without soil. *Potato and vegetables*. 1965;(10):26. (In Russ.).
8. Bolotnikov DP. *Vermikulit* [Vermiculite]. Murmansk; 1964. (In Russ.).

9. Lvova IA, Dyakonov YS. Mineralogical features of vermiculite deposits in the USSR as a criterion of their quality. In: *Research and application of vermiculite*. Leningrad: Nauka publ.; 1969. p.53–54. (In Russ.).
10. Ivanova LA. *Gidropionnoe vyrashchivanie dekorativno-tsvetochnykh rastenii s ispol'zovaniem vermiculita kovdorskogo mestorozhdeniya* [Hydroponic cultivation of ornamental plants using vermiculite from the Kovdor deposit]. Apatity; 1989. (In Russ.).
11. Ivanova LA, Slukovskaya MV, Kremenetskaya IP, Gorbacheva TT. *Pora ozelenyat' Arktiku. Innovatsionnyye gazonnnye tekhnologii dlya sozdaniya travyanogo pokrova razlichnogo naznacheniya v usloviyakh Zapolyar'ya* [It's time to green the Arctic. Innovative lawn technologies for creating grass for various purposes in the Arctic]. Apatity; 2020. (In Russ.).
12. Ivanova LA. Technology for growing hybrid alstroemeria in the Arctic. *Information leaflet: Murmansk intersectoral territorial center for social and information work and propaganda*. 1996;(152):96. (In Russ.).
13. Bukharov AF, Baleev DN, Bukharova AR. Kinetics of seed germination. Research methods and parameters. *Izvestiya of Timiryazev Agricultural Academy*. 2017;(2):5–19. (In Russ.).
14. Ivanova LA, Kotelnikov VA. *Perspektivy gidropionnogo vyrashchivaniya rastenii v usloviyakh Murmanskoi oblasti* [Prospects for hydroponic growing of plants in the conditions of the Murmansk region]. Apatity; 2006. (In Russ.).
15. Ivanova LA. Kovdor vermiculite — hydroponic substrate for northern crop production (Kola Peninsula). In: *Ecology of the northern territories of Russia. Problems, situation forecast, development paths, solutions: conference proceedings*. 2002. p.166–168. (In Russ.).
16. Ivanova LA. Features of rapid formation of lawn phytocenoses in Polar region. *Subtropical and ornamental horticulture*. 2013;(49):224–227. (In Russ.).
17. Nizhegorodov AI. Electric modular firing furnaces with an energy recovery system for firing vermiculite concentrates. *New refractories*. 2015;(10):22–27. (In Russ.). doi: 10.17073/1683–4518–2015–10–22–27
18. Zvezdin AV, Nizhegorodov AI. Assessing energy efficiency of electric furnace suspended heating system for bulk material heat treatment. *Proceedings of Irkutsk State Technical University*. 2019;23(1):41–53. (In Russ.). doi: 10.21285/1814–3520–2019–1–41–53
19. Ivanova LA, Kotelnikov VV, Bykova AE. Physico-chemical transformation of the mineral vermiculite into a substrate for growing plants. *Vestnik MSTU*. 2006;9(5):883–889. (In Russ.).
20. Mosendz IA, Kremenetskaya IP. Evaluating the effect of vermiculite heat treatment methods for its application as a hydroponic substrate. Proceedings of the Fersman scientific session of the State Institute of Science and Technology of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. 2022;(19):248–252. (In Russ.). doi: 10.31241/FNS.2022.19.045
21. Vysochkina LI, Vysochkina TN. Increasing crop yields due to accumulation of moisture in the soil. *Tekhnicheskie nauki — ot teorii k praktike*. 2014;(38):93–99. (In Russ.).
22. Sotchenko VS, Gorbacheva AG, Vetoshkina IA, Solomko VI. Methodology for determining laboratory germination and seed vigor. *Kukuruza i sorgo*. 2021;(1):12–24. (In Russ.). doi: 10.25715/o8981–6773–2383-a
23. Wellington P. *Metodika otsenki prorostkov semyan* [Methodology for assessing seed sprouts]. Moscow: Kolos publ.; 1973. (In Russ.).
24. Alekseychuk GN, Laman NA. *Fiziologicheskoe kachestvo semyan sel'skokhozyaistvennykh kul'tur i metody ego otsenki* [Physiological quality of agricultural seeds and methods for its assessment]. Minsk; 2005. (In Russ.).

#### Об авторах:

Ярцева Мария Александровна — аспирант, ведущий инженер, лаборатория интродукции и акклиматизации растений, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, Российская Федерация, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18 а; e-mail: 468975@mail.ru  
ORCID: 0000–0001–7560–6339 SPIN-код: 9820–0196

Кременецкая Ирина Петровна — старший научный сотрудник, Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, 184209, г. Апатиты, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru  
ORCID: 0000–0003–3531–8273 SPIN-код: 7227–0180

*Иванова Любовь Андреевна* — главный научный сотрудник, лаборатория декоративного цветоводства и озеленения, Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук»; ведущий научный сотрудник, Институт проблем промышленной экологии Севера Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр Российской академии наук», г. Апатиты, Российская Федерация, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, мкрн. Академгородок, д. 18 а; e-mail: ivanova\_la@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7994-5431 SPIN-код: 5752-3648

*Слуковская Марина Вячеславовна* — старший научный сотрудник, лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики, ФИЦ Кольский научный центр РАН, Российская Федерация, 184209, г. Апатиты, ул. Ферсмана, д. 14; Институт химии и технологии редких элементов и минерального сырья им. И.В. Тананаева — обособленное подразделение федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Кольский научный центр» Российской академии наук, 184209, г. Апатиты, ул. Академгородок, д. 26 а; e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru

ORCID: 0000-0002-5406-5569 SPIN-код: 8540-8055

#### **About authors:**

*Yartseva Maria Aleksandrovna* — PhD student, leading engineer, Laboratory of introduction and acclimatization of plants, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences, 18a Akademgorodok microdistrict, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: 468975@mail.ru

ORCID: 0000-0001-7560-6339 SPIN-code: 9820-0196

*Kremenetskaya Irina Petrovna* — Senior Researcher, Tananaev Institute of Chemistry — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: i.kremenetskaia@ksc.ru

ORCID: 0000-0003-3531-8273 SPIN-code: 7227-0180

*Ivanova Lubov Andreevna* — Chief Researcher, Laboratory of Decorative Floriculture and Landscaping, Polar-Alpine Botanical Garden-Institute — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of Russian Academy of Sciences; Leading Researcher, Institute for Problems of Industrial Ecology of the North, Federal Research Center, Kola Science Center of the Russian Academy of Sciences, 18a Akademgorodok microdistrict, Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: ivanova\_la@inbox.ru

ORCID: 0000-0002-7994-5431 SPIN-code: 5752-3648

*Slukovskaya Marina Vyacheslavovna* — Senior Researcher, Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic region, Federal Research Centre, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 14 Fersmana st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; Tananaev Institute of Chemistry — Subdivision of the Federal Research Centre, Kola Science Centre of the Russian Academy of Sciences, 26a Akademgorodok st., Apatity, Murmansk region, 184209, Russian Federation; e-mail: m.slukovskaya@ksc.ru

ORCID: 0000-0002-5406-5569 SPIN-code: 8540-8055