

УДК 581.1

К ВОПРОСУ О ВЛИЯНИИ ШУНГИТОВ НА РОСТ И РАЗВИТИЕ РАСТЕНИЙ

Т. Г. Шibaева^{1*}, Е. Г. Шерудило¹, А. В. Первунина²,
С. Д. Кириллюк³, А. Ф. Титов¹

¹ Институт биологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910),
*shibaeva@krc.karelia.ru

² Институт геологии КарНЦ РАН, ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
(ул. Пушкинская, 11, Петрозаводск, Республика Карелия, Россия, 185910)

³ ООО «Фонд развития шунгитовых технологий» (наб. Гюллинга, 11, помещ. 6-н,
Петрозаводск, Республика Карелия, 185005)

Изучено влияние шунгитовых пород (ШП) Турастамозерского (1, 5, 25, 100 %), Нигозерского (1, 5, 10, 25, 100 %) и Зажогинского (1, 5, 100 %) месторождений в составе субстрата для выращивания на рост и развитие пшеницы (*Triticum aestivum* L.) и ячменя (*Hordeum vulgare* L.). В качестве контрольного субстрата для выращивания растений использовали кварцевый песок. Растения выращивали в камерах искусственного климата при температуре 23 или 15 °С, ФАР 200 мкмоль/(м² с) и поливе полным или 25%-м питательным раствором. Солевой стресс обеспечивали поливом 1,68% раствором NaCl в течение 3 суток. Условия периодической засухи имитировали путем полива растений раз в 2-3 дня. Результаты экспериментов показали, что при добавлении ШП в субстрат рост и развитие растений зависят не только от количества ШП в субстрате, но и от типа (месторождения) ШП. Отмечено положительное влияние турастамозерской ШП в концентрациях от 1 до 25 % на фотосинтетическую активность и накопление биомассы растений. ШП Нигозерского месторождения в концентрации выше 5 % тормозила рост и развитие из-за высокой кислотности субстрата. Влияние зажогинской ШП на эти процессы в концентрациях от 1 до 5 % было незначительным. Использование ШП в качестве 100% субстрата показало, что только турастамозерская ШП пригодна для выращивания растений. В субстратах из нигозерской и зажогинской ШП семена не проросли вообще. В условиях дефицита минерального питания растения пшеницы в субстрате с добавлением 1 и 5 % турастамозерской ШП имели большую биомассу, чем в контроле. В условиях периодической засухи внесение 1 и 5 % ШП всех трех месторождений приводило к увеличению корневой системы ячменя, однако биомасса растения была выше контрольной только при использовании 1 % турастамозерской ШП. Не выявлено положительного воздействия ШП на устойчивость растений к солевому и низкотемпературному стрессу. Опираясь на собственные результаты и данные литературы, проанализировали возможные причины прямого и косвенного влияния ШП на рост и развитие растений. Сделан вывод, что практическое использование ШП требует большой осторожности и дальнейшего изучения, так как без понимания механизмов их воздействия на растения нельзя обеспечить их эффективное применение с целью управления

ростом, развитием и формированием продуктивности. Очевидно также и то, что обобщающий термин «шунгит» неприменим в физиологии растений и растениеводстве, поскольку ШП из разных месторождений и в смеси с другими веществами в составе удобрений могут оказывать на растения очень разные, вплоть до противоположных, эффекты.

Ключевые слова: шунгитовые породы; минеральное питание; рост растений; пшеница; ячмень

Для цитирования: Шибаета Т. Г., Шерудило Е. Г., Первунина А. В., Кирилюк С. Д., Титов А. Ф. К вопросу о влиянии шунгитов на рост и развитие растений // Труды Карельского научного центра РАН. 2022. № 7. С. 13–27. doi: 10.17076/eb1641

Финансирование. Работа выполнена по договору НИР по теме «Оценка возможности использования шунгитов Нигозерского и Турастамозерского месторождений в качестве субстратов для выращивания растений и/или кремниевых удобрений» (заказчик – ООО «Надвоицкий завод ТДМ») с использованием научного оборудования Центра коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Карельский научный центр Российской академии наук» и при финансовой поддержке из средств федерального бюджета на выполнение государственного задания КарНЦ РАН (№ FMEN-2022-0004).

T. G. Shibaeva^{1*}, E. G. Sherudilo¹, A. V. Pervunina², S. D. Kirilyuk³, A. F. Titov¹. ON THE EFFECT OF SHUNGITES ON PLANT GROWTH AND DEVELOPMENT

¹ Institute of Biology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences

(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia), *shibaeva@krc.karelia.ru

² Institute of Geology, Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences

(11 Pushkinskaya St., 185910 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

³ OOO Fund for Shungite Technology Development (11 Nab. Gyllinga, room 6-n, 185005 Petrozavodsk, Karelia, Russia)

We studied the effects of shungite rocks (ShR) from Turastamozero (1, 5, 25, 100 %), Nigozero (1, 5, 10, 25, 100 %) and Zazhogino (1, 5, 100 %) deposits added to the substrate on the growth and development of wheat (*Triticum aestivum* L.) and barley (*Hordeum vulgare* L.) plants. Silica sand was used as the control cultivation substrate. Plants were grown in growth chambers at a temperature of 23 or 15 °C, PAR 200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ and irrigated with a complete or 25 % nutrient solution. Salt stress was created by irrigation with 1.68% NaCl solution for 3 days. Periodic drought conditions were simulated by watering the plants at 2–3 day intervals. The results of the experiments show that plant growth and development is affected not only by the concentration of ShR in the substrate but also by the type (deposit location) of the ShR. We observed a positive effect of Turastamozero ShR at 1 and 25 % concentrations on the photosynthetic activity and plant biomass gain. ShR from the Nigozero deposit at concentrations above 5 % inhibited plant growth and development due to high acidity of the substrate. The effects of Zazhogino ShR on these processes at 1 and 5 % concentrations were insignificant. The use of ShR as 100% substrate showed that only ShR from the Turastamozero deposit was suitable for plant cultivation. Seeds in the substrates 100 % made up of ShR from Nigozero and Zazhogino did not germinate. Where mineral nutrition was in deficit, wheat plants in the substrate with 1 and 5 % Turastamozero ShR had a greater biomass compared to the control plants. Under periodic drought stress, the application of 1 and 5 % ShR from all the three deposits led to an increase in the root biomass of barley, but the plant biomass was higher than in the control only when 1% Turastamozero ShR was used. No positive effect of ShR on plant tolerance of the salt- and chilling stress was found. Based on our own results and data from the literature, we analyzed the hypothetical reasons for the direct and indirect effects of ShR on plant growth and development. It is concluded that the practical use of ShR requires great care and further study, since without understanding the mechanisms of their effects on plants it is impossible to ensure their efficacy in controlling growth, development and productivity. It is also obvious that the general term “shungite” is not applicable in plant physiology and crop science as ShR from different deposits and mixed with other substrates in the fertilizing compositions can have very different, even opposing effects on plants.

Keywords: shungite rocks; mineral nutrition; plant growth; wheat; barley

For citation: Shibaeva T. G., Sherudilo E. G., Pervunina A. V., Kirilyuk S. D., Titov A. F. On the effect of shungites on plant growth and development. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2022. No. 7. P. 13–27. doi: 10.17076/eb1641

Funding. The study was carried out under research contract “Feasibility study of the applicability of shungite from Nigozero and Turastamozero deposits as plant cultivation substrates and/or silica-based fertilizers” (customer – LLC Nadvoitskiy Zavod TDM) using equipment of the Core Facility of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences and with financial support from the federal budget allocated under state assignment to KarRC RAS (# FMEN-2022-0004).

Введение

Термином «шунгит» обозначают шунгитовые породы (ШП), содержащие любую концентрацию шунгитового вещества. Шунгитовое вещество (синоним – углеродистое вещество) – это аморфное неграфитизированное органическое вещество ($C_{орг}$), состоящее из углерода со следами N, O, S и H [Melezhik et al., 1999]. ШП представляет собой природный композит, содержащий равномерное распределение высокодисперсных кристаллических силикатных частиц (от 1 до 10 мкм) в аморфной углеродной матрице. Шунгитовое вещество встречается в рассеянном и в концентрированном виде в слоисто-осадочных и вулканогенных породах, а также в жилах и пленках. Известные месторождения и значимые проявления шунгитовых пород (ШП) расположены в пределах Онежской палеопротерозойской структуры (Карельский кратон, ЮВ часть Фенноскандинавского щита) [Онежская..., 2011].

В геологической литературе шунгитовыми породами принято называть кремнистые (лидиты), карбонатные (известняки, доломиты), глинистые (алевролиты) и вулканогенно-осадочные (туфопесчаники, туфоалевролиты) породы с содержанием $C_{орг}$ от > 1 до 80 % [Органическое..., 1994]. Некоторые авторы предлагают делить ШП на пять групп по содержанию свободного углерода: I – > 80 %; II – 35–80 %; III – 20–35 %; IV – 10–20 %; V – < 10 % [Борисов, 1956]. Другие, применяя генетический подход, разделяют их на четыре группы в зависимости от типа органического вещества (ОВ): 1 – первично-осадочное ОВ ($C_{орг}$ 0,1–15 %) – сапропелитовые породы; 2 – миграционное ОВ ($C_{орг}$ 0,5–15 %) – битумолитовые породы; 3 – смешанное первично-осадочное и миграционное ОВ ($C_{орг}$ 0,5–80%) – сапробитумолитовые породы; 4 – переотложенное ОВ ($C_{орг}$ 0,5–5 %) – терригенные породы с шунгитовым веществом [Филиппов, 2002]. В 3-ю группу входят высокоуглеродистые породы

Шунгского и Зажогинского месторождений, в 4-ю группу – низкоуглеродистые породы Нигозерского и Турастамозерского месторождений.

Таким образом, ШП весьма разнообразны по форме проявлений, времени формирования, генезису и вещественному составу зольной части, изотопному составу, агрегатному и структурному состоянию шунгитового углерода. Минеральный состав ШП варьирует в широком диапазоне изменений количества углерода. С этим связано и разнообразие внешнего облика шунгитовых и шунгитосодержащих пород.

Разноплановые исследования ШП показали, что они обладают сорбционными, бактерицидными, каталитическими, восстановительными свойствами, способностью экранировать радио- и электромагнитное излучение, а также биологической активностью [Калинин и др., 2008; Ignatov, Mosin, 2014]. Вполне понятно, что наличие столь разных и важных свойств очень быстро привлекло к шунгитам внимание ученых и специалистов различного профиля, а также обычных людей. Появилось и нашло широкое распространение мнение, что вещество, обладающее таким набором уникальных свойств, должно оказывать положительное воздействие на живые организмы, включая человека и животных, используемых в хозяйственных целях. Что касается влияния ШП на растения, то в рекламных брошюрах шунгитосодержащих удобрений указываются их многочисленные преимущества как комплексных удобрений с полным набором макро- и микроэлементов, которые обеспечивают увеличение урожая различных сельскохозяйственных культур на 40–70 %. Однако в научной литературе на этот счет имеются лишь единичные работы [Тойкка, Кекконен, 1946; Тойкка и др., 1969; Волкова, Будыкина, 1977; Котова, 2006; Ikkonen et al., 2021], в отношении которых возникает немало методических вопросов, что не позволяет считать выводы, сделанные авторами этих работ,

бесспорными и предполагает необходимость проведения дальнейших исследований.

Исходя из вышеизложенного, цель нашего исследования заключалась в оценке влияния ШП Нигозерского (низкоуглеродистая, $C_{\text{орг}} < 1\%$), Турастамозерского (низкоуглеродистая, $C_{\text{орг}} = 0,5-2,5\%$) и Зажогинского (высокоуглеродистая, $C_{\text{орг}} > 25\%$) месторождений в составе субстрата для выращивания на рост и развитие растений.

Материалы и методы

Объектами исследования в работе служили кремнефильные растения пшеница озимая (*Triticum aestivum* L.) с. Московская 39 и ячмень обыкновенный (*Hordeum vulgare* L.) с. Нур. Опыты проводили в камерах искусственного климата Vötsch (Германия), Snijders Micro Clima (Snijders Labs, Нидерланды) при температуре воздуха 23 °С, ФАР 200 мкмоль/(м² с), фотопериоде 16 ч и влажности воздуха 60 %. Семена высевали в сосуды (250 мл) с субстратом при плотности посева 7 растений на сосуд и поливе питательным раствором (в мг/л: 226 N; 55 P; 370 K; 180 Ca; 40 Mg; 45 S; 17 Na; 52 Cl; 2,5 Fe; 0,6 Mn; 0,35 B; 0,3 Zn; 0,15 Cu и 0,05 Mo; рН 6,2–6,4).

В качестве субстратов для выращивания растений использовали кварцевый песок (контроль), ШП Турастамозерского (1, 5, 25, 100 %), Нигозерского (1, 5, 10, 25, 100 %) и Зажогинского (1, 5, 100 %) месторождений.

Зажогинское месторождение (Медвежьегорский район РК) сложено высокоуглеродистыми ШП, в составе которых – свободный углерод ($C_{\text{орг}} \sim 35\%$) в форме шунгитового вещества и SiO_2 (~ 50 %) в виде кварца (рис. 1); 3–5,5 % веса породы приходится на Al_2O_3 (входит в состав серицита и альбита); 1,5–2,5 % – на Fe_2O_3 (входит в состав хлорита, пирита, пирротина); по 1–2 % составляют S, CO_2 , K_2O , CaO, MgO. Содержание фосфора меняется от 0,01 до 0,1 %, углекислоты содержится менее 0,1 %. Наиболее высокие концентрации имеет цинк – 0,04 %. Форма нахождения основной части малых элементов – сульфиды (пирит, сфалерит, пирротин).

Месторождения низкоуглеродистых ШП Нигозерское и Турастамозерское расположены в Кондопожском районе РК. Обособления шунгитового вещества в породах наблюдаются в виде тонких прослоев, содержание $C_{\text{орг}}$ колеблется от 0,5 до 4 %. Главные породообразующие минералы – хлорит (36–65 %), альбит (10–40 %), серицит (~ 10 %), кварц (до 5 %) (рис. 2); второстепенные и акцессорные минералы – карбонат, лимонит, апатит, титанит, ру-

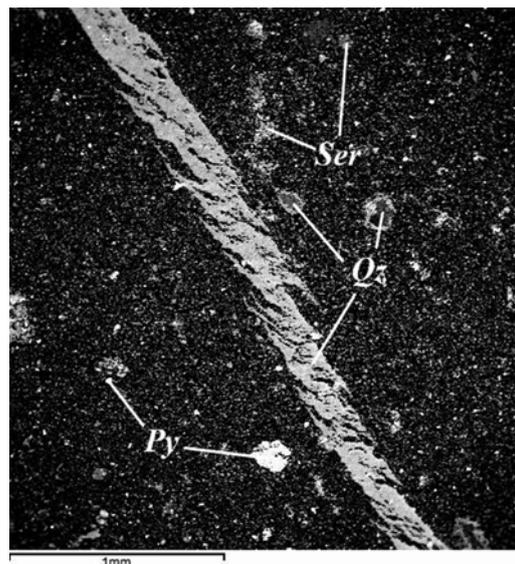


Рис. 1. Высокоуглеродистая ШП с массивной текстурой и прожилковым выделением кварца. В кварц-углерод-серицитовой пористой массе вмещающей породы наблюдаются округлые включения пирита и кварца с пиритовой оторочкой. Зажогинское месторождение. Полированный шлиф.

Qz – кварц, темное – углерод, Ser – серицит, Py – пирротин

Fig. 1. High-carbon shungite rock with massive structure and vein of quartz. Orbiculate pyrite particles and quartz with pyrite border are detected within quartz-carbon-sericite porous matrix of the main rock. Zazhogino deposit. Polished section. BSE.

Qz – quartz, dark color – carbon, Ser – sericite, Py – pyrrhotite

тил, циркон; рудные – сульфиды Cu и Fe, окислы Fe, V, Cu [Мясникова, Первунина, 2019]. В целом по минеральному и химическому составу породы Нигозерского и Турастамозерского месторождений аналогичны.

Средний химический состав двух разновидностей ШП, отличающихся по содержанию углерода, приведен в таблице 1. Образцы ШП проанализированы методом силикатного анализа. Микроэлементный состав образцов измельченных ШП (табл. 2) получен методом масс-спектрометрии с использованием квадрупольного масс-спектрометра X-Series 2 (Thermo Fisher Scientific, США) по методике [Светов и др., 2015] в аналитическом центре Института геологии КарНЦ РАН.

Помимо оптимальных условий часть растений выращивали в условиях абиотических стрессов в следующих субстратах: кварцевый песок (контроль), ШП 1 и 5 % Турастамозерского, Нигозерского и Зажогинского место-

рождений. Дефицит минерального питания создавался путем полива растений 25% питательным раствором. Солевой стресс обеспечивался поливом 1,68% раствором NaCl в течение 3 суток. Низкотемпературному воздействию растения подвергали, выращивая их

при температуре 15 °С. Условия периодической засухи имитировали путем полива растений раз в 2–3 дня, то есть после полного высыхания субстрата.

Все измерения растений проводили на 7-е сутки. Определяли высоту растений, длину

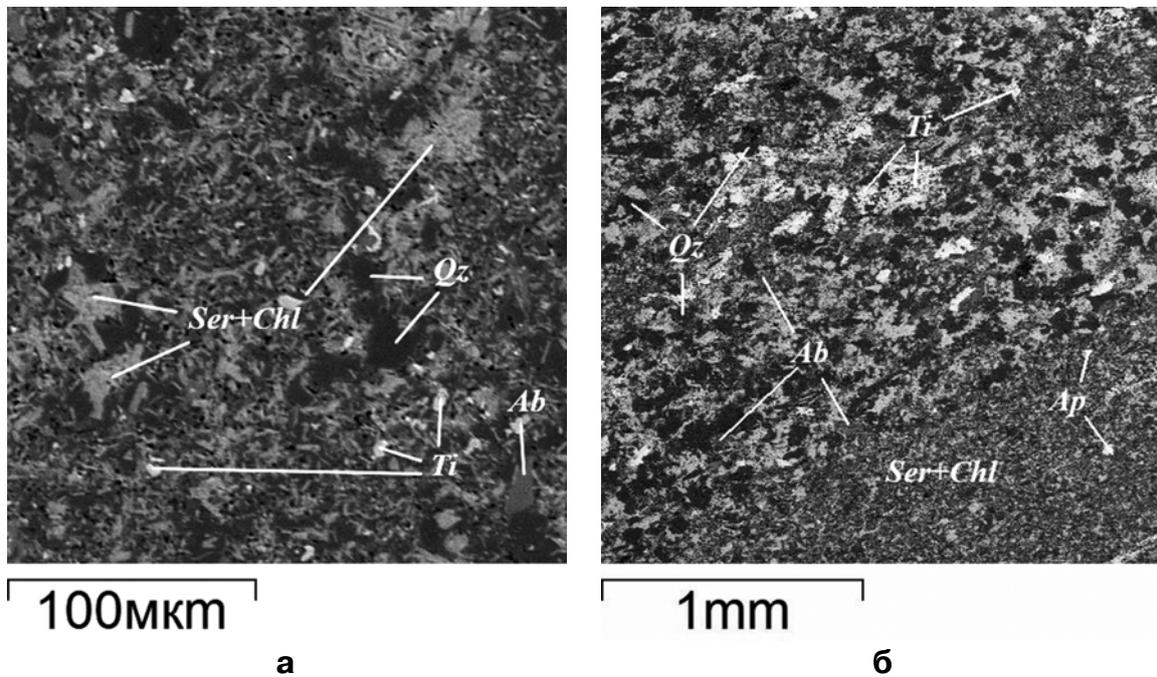


Рис. 2. Низкоуглеродистая ШП с массивной (а) и слоистой (б) текстурой. Полированный шлиф.

а – в кварц-серицит-альбит-хлоритовой основной массе отмечаются мелкие включения титанита. Нигозерское месторождение; б – в кварц-альбит-серицит-хлоритовой основной массе отмечаются гнездовые включения титанита и зерна апатита. Турастамозерское месторождение.

Ab – альбит, Ser – серицит, Chl – хлорит, Qz – кварц, Ti – титанит, Ap – апатит

Fig. 2. Low-carbon shungite rock with massive (a) and bedded (b) structures. Polished section. BSE.

а – fine grains of titanite are distinguished within quartz-sericite-albite-chlorite matrix. Nigozero deposit; б – aggregates of titanite and grains of apatite are distinguished within quartz-albite-sericite-chlorite matrix. Turastamozero deposit.

Ab – albite, Ser – sericite, Chl – chlorite, Qz – quartz, Ti – titanite, Ap – apatite

Таблица 1. Средний химический состав разновидностей ШП, вес. %

Table 1. Average chemical composition of different types of shungite rocks, wt %

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	П.п.п.	P ₂ O ₅	Сумма Total
Высокоуглеродистые породы Захогинского месторождения High-carbon rocks of the Zazhogino deposit	53,89	0,25	3,98	2,22	0,72	0,25	0,15	1,24	36,93	0,089	99,72
Низкоуглеродистые породы Нигозерского месторождения Low-carbon rocks of the Nigozero deposit	49,66	1,96	16,12	17,05	2,92	2,64	2,51	1,19	4,83	He onp. ND	98,88

Примечание. П.п.п. – потери при прокаливании.

Note. П.п.п. – lost on ignition.

листьев, сырой вес побегов и корней, сухой вес побегов и корней после их высушивания при температуре 105 °С. Рассчитывали отношение сухой массы листьев к их площади (LMA, от leaf mass per area). Содержание фотосинтетических пигментов (хлорофиллов *a* и *b*) определяли с помощью измерителя уровня хлорофилла SPAD 502 Plus (Konica Minolta, Япония). Измерения параметров флуоресценции хлорофилла проводили с использованием флуориметра с импульсно-модулированным освещением MINI-PAM (Walz, Германия). Определяли потенциальный квантовый выход фотохимической

активности ФС II (Fv/Fm) после 20-минутной темновой адаптации листьев [Maxwell, Johnson, 2000].

В работе представлены средние значения по двум независимым опытам (с использованием 6–10 биологических повторностей в каждом варианте отдельного опыта в зависимости от изучаемого показателя) и их стандартные ошибки. Аналитическая повторность трехкратная. Статистическую обработку результатов исследования проводили с использованием дисперсионного анализа в MS Excel. Достоверными считали различия при уровне значимости $p < 0,05$.

Таблица 2. Содержание микроэлементов (в ppm) в образцах крошки ШП из разных месторождений
Table 2. The content of microelements (in ppm) in crushed shungites from different deposits

Элементы Elements	Месторождение / Deposit		
	Нигозерское Nigozero	Турастамозерское Turastamozero	Зажогинское Zazhogino
Необходимые Essential			
Cu	82,8	208,5	43,8
Mn	85,1	1103,0	91,0
Mo	8,5	0,1	6,8
Zn	164,9	234,4	74,2
Условно необходимые Conditionally essential			
Co	7,9	46,3	4,3
Li	9,1	68,9	7,8
Ультрамикроэлементы Ultramicroelements			
V	181,5	257,0	151,6
Cd	1,2	0,4	< PO
Ni	145,4	79,9	89,7
Rb	24,6	47,4	17,2
Cs	0,6	1,2	0,5
Se	5,5	< PO	< PO
Cr	48,1	127,2	44,7
Токсичные Toxic			
Ag	0,5	0,2	0,1
Pb	26,2	4,6	14,9
As	21,3	< PO	< PO
Sb	2,2	0,4	1,2
Be	1,0	1,3	< PO
Ba	394,8	204,6	285,8
Ce	19,8	37,1	13,9
Tl	3,4	< PO	< PO
U	9,5	0,6	8,4

Примечание. < PO – ниже предела обнаружения.

Note. < PO – below the limit of detection.

Результаты и обсуждение

Результаты экспериментов показали, что влияние содержания ШП в субстрате для выращивания растений на их рост и развитие зависело от количества ШП в субстрате. Кроме того, ответная реакция растений пшеницы и ячменя была неодинаковой при внесении в субстрат ШП из трех разных месторождений. ШП Турастамозерского месторождения в концентрации 1, 5 и 25 % увеличила сухую биомассу растений пшеницы (в результате увеличения биомассы побегов и корней) (табл. 3). При этом у ячменя биомасса растений не изменялась при использовании этой ШП в концентрации 1 % (табл. 4; рис. 3). При использовании ШП Нигозерского месторождения в концентрации 1 % накопление биомассы растений пшеницы не менялось, а биомасса корней у ячменя увеличивалась. Использование более высоких концентраций ШП (5, 10 и 25 %) приводило к значительному снижению биомассы побегов и корней пшеницы и ячменя (табл. 3, 4; рис. 4).

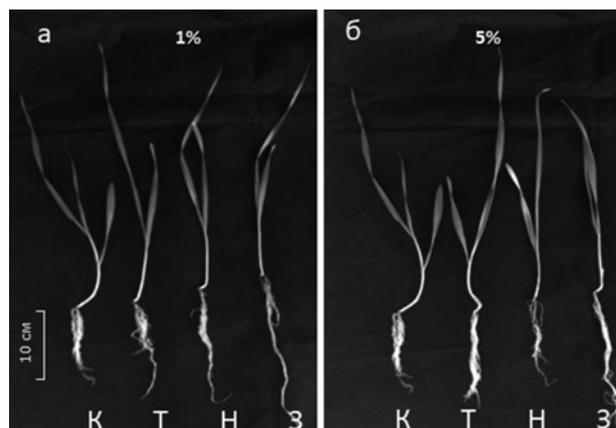


Рис. 3. Растения *Hordeum vulgare*, выращенные на субстратах, содержащих 1 % (а) или 5 % (б) ШП из разных месторождений:

К – контроль (кварцевый песок), Т – Турастамозеро, Н – Нигозеро, З – Захогино

Fig. 3. *Hordeum vulgare* plants grown on substrates containing 1 % (a) or 5 % (b) shungites from different deposits:

К – control (quartz sand), Т – Turastamozero deposit, Н – Nigozero deposit, З – Zazhogino deposit

Таблица 3. Физиолого-биохимические показатели растений *Triticum aestivum*, выращенных на субстратах с разным содержанием ШП из разных месторождений

Table 3. Physiological and biochemical indices of *Triticum aestivum* plants grown on substrates with different concentration of shungites from different deposits

Показатель Index	Контроль Control	Месторождение / Deposit						
		Турастамозерское Turastamozero			Нигозерское Nigozero			Захогино Zazhogino
		1 %	5 %	25 %	1 %	5 %	25 %	
Сухая масса побегов, мг Shoot dry mass, mg	66,1 ± 4,1 ^b	74,2 ± 4,3 ^a	75,0 ± 4,9 ^a	75,8 ± 5,1 ^a	66,2 ± 4,1 ^b	61,2 ± 3,9 ^c	-	67,1 ± 4,3 ^b
Сухая масса корней, мг Root dry mass, mg	18,8 ± 2,0 ^c	24,0 ± 1,5 ^b	24,5 ± 1,6 ^b	32,8 ± 2,6 ^a	18,3 ± 1,4 ^c	15,8 ± 1,4 ^d	-	26,0 ± 2,5 ^b
Сухая масса растения, мг Plant dry mass, mg	84,9 ± 4,4 ^c	98,1 ± 4,6 ^b	99,5 ± 4,6 ^{ab}	108,6 ± 5,7 ^a	84,6 ± 4,0 ^c	77,0 ± 3,7 ^d	-	93,1 ± 7,5 ^{bc}
LMA, мг/см ² Leaf mass per area, mg/cm ²	2,3 ± 0,1 ^b	2,2 ± 0,1 ^b	2,4 ± 0,1 ^{ab}	2,6 ± 0,1 ^a	2,0 ± 0,1 ^c	2,0 ± 0,1 ^c	-	2,5 ± 0,1 ^{ab}
Содержание хлорофилла, у.е. SPAD Chlorophyll content, SPADunits	38,6 ± 0,4 ^c	39,9 ± 0,7 ^{bc}	40,6 ± 0,6 ^b	40,7 ± 1,2 ^b	42,0 ± 1,0 ^b	36,5 ± 0,8 ^d	-	45,1 ± 0,7 ^a
Fv/Fm	0,811 ± 0,02 ^a	0,811 ± 0,02 ^a	0,816 ± 0,02 ^a	0,810 ± 0,01 ^a	0,814 ± 0,02 ^a	0,812 ± 0,03 ^a	-	0,810 ± 0,01 ^a
pH	7,2	6,8	6,6	6,4	6,3	5,0	4,2	5,6

Примечание. Здесь и далее разные буквы указывают на достоверность различий средних значений при $p < 0,05$. Прочерк – данные не определены, т. к. рост растений был полностью подавлен.

Note. Here and below different letters for each plant species indicate significant differences between the mean values at $p < 0.05$. Dash – not determined data as plant growth was inhibited.

Таблица 4. Физиолого-биохимические показатели растений *Hordeum vulgare*, выращенных на субстратах с разным содержанием ШП из разных месторождений

Table 4. Physiological and biochemical indices of *Hordeum vulgare* plants grown on substrates with different concentration of shungites from different deposits

Показатель Index	Контроль Control	Месторождение / Deposit						
		Турастамозерское Turastamozero		Нигозерское Nigozero			Зажогинское Zazhogino	
		1 %	5 %	1 %	5 %	10 %	1 %	5 %
Сухая масса побегов, мг Shoot dry mass, mg	42,2 ± 1,6 ^b	39,5 ± 2,6 ^b	46,1 ± 2,6 ^a	43,4 ± 3,5 ^{ab}	40,1 ± 2,5 ^b	15,1 ± 0,5 ^d	39,6 ± 2,8 ^b	30,0 ± 2,1 ^c
Сухая масса корней, мг Root dry mass, mg	13,6 ± 0,8 ^{bs}	13,6 ± 0,6 ^b	15,9 ± 1,5 ^a	16,3 ± 1,9 ^a	7,9 ± 0,4 ^c	8,1 ± 1,3 ^c	14,5 ± 1,2 ^b	17,2 ± 1,8 ^a
Сухая масса растения, мг Plant dry mass, mg	55,8 ± 2,0 ^b	53,1 ± 2,4 ^b	62,0 ± 3,8 ^a	59,7 ± 4,4 ^a	48,0 ± 2,7 ^c	23,2 ± 1,3 ^d	54,1 ± 2,9 ^b	47,3 ± 3,6 ^c
LMA, мг/см ² Leaf mass per area, mg/cm ²	2,1 ± 0,1 ^c	2,4 ± 0,1 ^b	2,3 ± 0,1 ^b	2,3 ± 0,1 ^b	2,4 ± 0,1 ^b	3,5 ± 0,1 ^a	2,1 ± 0,1 ^c	2,3 ± 0,2 ^b
Содержание хлорофилла, у.е. SPAD Chlorophyll content, SPADunits	41,8 ± 0,4 ^a	41,9 ± 0,8 ^a	43,6 ± 0,5 ^a	39,8 ± 1,3 ^a	16,9 ± 1,9 ^b	15,0 ± 1,9 ^b	40,7 ± 0,8 ^a	38,7 ± 0,8 ^a
Fv/Fm	0,806 ± 0,001 ^a	0,809 ± 0,002 ^a	0,808 ± 0,004 ^a	0,808 ± 0,004 ^a	0,790 ± 0,004 ^b	0,786 ± 0,001 ^b	0,809 ± 0,002 ^a	0,808 ± 0,001 ^a
pH	7,2	6,8	6,4	6,4	4,8	4,4	6,3	5,6

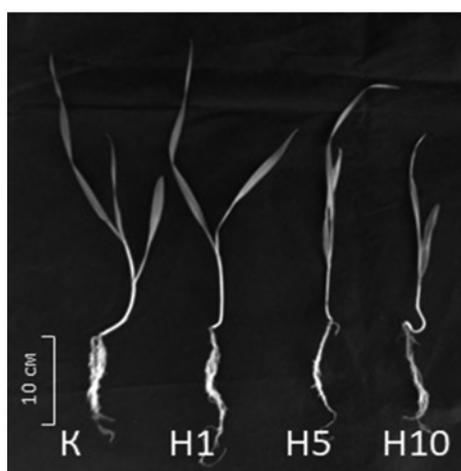


Рис. 4. Растения *Hordeum vulgare*, выращенные на субстратах, содержащих нигозерскую ШП:

К – контроль (кварцевый песок), H1 – Нигозеро, 1 %; H5 – Нигозеро, 5 %; H10 – Нигозеро 10 %

Fig. 4. *Hordeum vulgare* plants grown on substrates containing shungites from the Nigozero deposit:

K – control (quartz sand), H1 – 1 % of shungite, H5 – 5 % of shungite, H10 – 10 % of shungite

Добавление в субстрат ШП из Нигозера в концентрации 25 % полностью тормозило рост и развитие растений (рис. 5). Зажогинская ШП в концентрации 5 % стимулировала рост корней, но накопление биомассы побегов и целого растения было ниже, чем в контроле, у пшеницы и ячменя (табл. 3, 4; рис. 3). В тех случаях, когда наблюдалось торможение роста, отмечалось и замедление развития, которое оценивали по количеству листьев (данные не представлены).

Величина отношения сухой массы листа к его площади (LMA) считается одним из ключевых параметров, связанных с ростом растений, и во многом определяет фотосинтетические способности растений [Poorter et al., 2009]. LMA у пшеницы увеличивалась в ответ на 25% турастамозерскую ШП и 5% зажогинскую, а нигозерская ШП снижала значения LMA относительно контроля при концентрациях 1 и 5 % (табл. 3). У ячменя же все применяемые концентрации трех (за исключением зажогинской в концентрации 1 %) приводили к увеличению значений LMA (табл. 4). Меньшая биомасса, синтезируемая в расчете на единицу поверхности листа, косвенно указывает на меньшую эффективность процессов фотосинтеза.



Рис. 5. Растения *Triticum aestivum*, выращенные на субстратах, содержащих 25 % ШП из разных месторождений:

T25 – Турастамозеро; H25 – Нигозеро

Fig. 5. *Triticum aestivum* plants grown on substrates containing 25 % shungites from different deposits:

T25 – Turastamozero, H25 – Nigozero

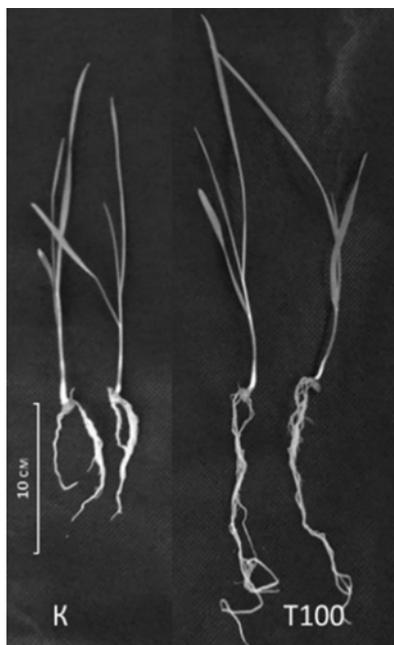


Рис. 6. Растения *Triticum aestivum*, выращенные на кварцевом песке (К – контроль) или на турастамозерской ШП (Т, 100 %)

Fig. 6. *Triticum aestivum* plants grown on quartz sand (K – control) or Turastamozero shungite rocks (T, 100 %)

Содержание хлорофилла увеличивалось у пшеницы во всех вариантах опыта, кроме варианта, где использовалась нигозерская ШП в концентрации 5 % и выше (табл. 3). У этих растений наблюдался сильно выраженный хлороз, подтвержденный более низким содержанием хлорофилла. В отличие от пшеницы у растений ячменя не было отмечено повышения содержания хлорофилла в ответ на внесение ШП в субстрат, но при этом наблюдалось, как и у пшеницы, снижение содержания хлорофилла при использовании нигозерской ШП в концентрации 5 % (табл. 4).

Потенциальный квантовый выход фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) является одной из основных характеристик функционального состояния ФС II. Снижение показателя F_v/F_m отождествляют с повреждением комплексов ФС II в результате стресса. Снижение фотохимической активности ФС II (F_v/F_m) наблюдалось только у ячменя в вариантах с нигозерской ШП в концентрации 5 % и выше (табл. 4). Однако надо заметить, что снижение не достигало критического уровня (ниже 0,79) [Bolhär-Nordenkamp et al., 1989], что свидетельствует о высокой эффективности использования энергии в фотохимических процессах и отсутствии стрессового воздействия на фотосинтетический аппарат растений. Хотя, учитывая относительно небольшую продолжительность эксперимента (7 сут), нельзя исключить дальнейшего снижения значений F_v/F_m ниже критического уровня в вариантах, где отмечена тенденция к снижению.

Использование ШП в качестве 100% субстрата показало, что только турастамозерская ШП пригодна для выращивания растений. Всхожесть семян в субстратах из нигозерской и заюгинской ШП составила 0 %. Растения, выращенные на турастамозерской ШП, превосходили контрольные растения (выращенные на кварцевом песке) по биомассе побегов и корней на 35 %, имели более высокие значения LMA и содержания хлорофилла (на 25 и 33 % выше соответственно) (рис. 6).

Помимо выращивания растений в оптимальных условиях среды на субстратах с разным содержанием ШП из трех месторождений аналогичные опыты проведены в условиях, создающих стрессовые воздействия на растения. В результате значимого повышения устойчивости пшеницы и ячменя к солевому и низкотемпературному стрессу при внесении ШП трех месторождений в субстрат для выращивания растений (данные не приводятся) не выявлено. В случае дефицита минерального питания биомасса побегов растений пшеницы,

выращенных в субстратах, содержащих 1 и 5 % турастамозерской и нигозерской ШП, была несколько выше, чем у контрольных растений, однако биомасса побегов была выше контроля только у растений, выращенных в субстрате с 1 и 5 % турастамозерской ШП (табл. 5). У растений ячменя в условиях дефицита минерального питания добавление ШП в субстрат не оказало положительного эффекта (данные не приводятся). В условиях периодической засухи добавление ШП всех трех месторождений в субстрат привело к увеличению биомассы корневой системы растений ячменя, однако увеличение биомассы растения по отношению к контролю отмечено только при использовании 1 % турастамозерской ШП (табл. 6). У растений пшеницы в аналогичных условиях положительного эффекта при внесении ШП в субстрат не выявлено (данные не приводятся).

Объяснить полученные результаты тем, что низкоуглеродные и высокоуглеродные ШП по-

разному влияют на рост растений, невозможно, так как турастамозерская и нигозерская ШП, будучи низкоуглеродными, вызывали разные реакции у растений. Объяснить результаты исключительно влиянием pH среды, созданной при добавлении ШП в субстрат, тоже нельзя, так как нигозерская и зажогинская ШП, создавая схожий pH среды, отличались по своим эффектам на рост растений. Выявленные различия в реакции растений пшеницы и ячменя на внесение ШП в субстрат можно объяснить только наличием видовой специфичности.

Физиолого-биохимический анализ растений, проведенный в данном исследовании, не позволяет говорить с определенностью о механизмах, благодаря которым растения, выращенные с использованием ШП, приобретали некоторые преимущества по сравнению с контрольными или уступали им. С учетом того, что ШП добавляли в кварцевый песок, который является инертным субстратом, не обеспечи-

Таблица 5. Сухая масса растений *Triticum aestivum*, выращенных на субстратах с разным содержанием ШП из разных месторождений в условиях дефицита минерального питания (полив 25% питательным раствором)

Table 5. Dry mass of *Triticum aestivum* plants grown on substrates with different concentration of shungites from different deposits under deficit of mineral nutrition (plants were supplied with 25% nutrient solution)

Показатель Index	Контроль Control	Месторождение / Deposit					
		Турастамозерское Turastamozero		Нигозерское Nigozero		Зажогинское Zazhogino	
		1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %
Сухая масса побегов, мг Shoot dry mass, mg	51,5 ± 1,6 ^c	67,4 ± 4,7 ^a	55,4 ± 1,9 ^b	71,5 ± 1,1 ^a	56,0 ± 1,6 ^b	53,1 ± 1,7 ^{bc}	50,9 ± 1,5 ^c
Сухая масса корней, мг Root dry mass, mg	33,1 ± 1,0 ^a	32,4 ± 0,8 ^a	26,7 ± 1,5 ^c	32,3 ± 1,2 ^a	30,4 ± 1,8 ^b	31,0 ± 2,0 ^b	27,3 ± 0,9 ^c
Сухая масса растения, мг Plant dry mass, mg	84,6 ± 2,3 ^b	100,5 ± 5,3 ^a	80,9 ± 2,1 ^{bc}	103,9 ± 1,3 ^a	84,5 ± 2,0 ^b	84,1 ± 2,1 ^b	78,2 ± 1,7 ^c

Таблица 6. Сухая масса растений *Hordeum vulgare*, выращенных на субстратах с разным содержанием ШП из разных месторождений в условиях периодической засухи

Table 6. Dry mass of *Hordeum vulgare* plants grown on substrates with different concentration of shungites from different deposits and treated by periodic drought

Показатель Index	Контроль Control	Месторождение / Deposit					
		Турастамозерское Turastamozero		Нигозерское Nigozero		Зажогинское Zazhogino	
		1 %	5 %	1 %	5 %	1 %	5 %
Сухая масса побегов, мг Shoot dry mass, mg	50,2 ± 2,4 ^a	50,5 ± 2,0 ^a	41,1 ± 2,8 ^b	38,7 ± 2,5 ^b	34,3 ± 2,3 ^{bc}	37,1 ± 2,7 ^b	28,5 ± 1,8 ^c
Сухая масса корней, мг Root dry mass, mg	17,4 ± 0,7 ^c	23,6 ± 0,8 ^b	28,4 ± 3,7 ^a	27,0 ± 1,2 ^a	22,9 ± 0,9 ^b	31,0 ± 2,0 ^a	28,6 ± 3,0 ^a
Сухая масса растения, мг Plant dry mass, mg	67,6 ± 2,5 ^b	74,1 ± 2,5 ^a	69,5 ± 7,2 ^b	65,7 ± 3,3 ^b	57,2 ± 2,8 ^c	68,1 ± 2,8 ^b	57,1 ± 3,2 ^c

вающим растения комплексом макро- и микро-элементов и не обладающим биологической активностью, можно предположить, что ШП Турастамозерского месторождения обеспечивали растениям дополнительное минеральное питание. ШП Нигозерского и Зажогинского месторождений оказывали в большинстве случаев негативное воздействие, вероятно, вследствие создания неблагоприятного для роста и развития растений рН субстрата.

На основании анализа литературы можно предположить, что ШП могут влиять на рост и развитие растений прямо и/или косвенно, оказывая при этом положительное или негативное воздействие в силу следующих причин:

– ШП могут улучшать минеральное питание растений, так как содержат в своем составе оксид кремния, оксид калия, оксид фосфора и ряд микроэлементов (Mg, Cu, Zn, Co, Mo и др.) [Тойкка, Кекконен, 1946; Пыжов и др., 2017];

– ШП структурируют почву, делая ее более рыхлой, и способствуют удержанию почвенной влаги [Котова, 2006; Пыжов и др., 2017];

– темные частицы шунгитового вещества с их высокой теплоемкостью аккумулируют тепло и улучшают тепловой режим почвы, что положительно сказывается на росте растений и способствует жизнедеятельности почвенных микроорганизмов [Пыжов и др., 2017]; использование ШП в качестве мульчирующего материала для ускорения снеготаяния позволяет раньше начать весенние работы в лесопитомниках и снижает заболеваемость сосновых культур болезнью «снежный шютте», которая провоцируется грибом *Phacidium infestans* Karst., развивающимся на иголках под снежным покровом [Крутов, 1977];

– внесение шунгит-доломитовых смесей в почву изменяет кислотные свойства торфяных кислых почв и подзолистых почв (известкует их) и снижает содержание нитратов в растениях [Волкова, Будыкина, 1977; Синькевич, 1981; Котова, 2006; Пыжов и др., 2017];

– внесение шунгитсодержащих удобрений (в частности, удобрения «ШунгиТерра» на основе турастамозерской ШП), предположительно, усиливает аммонификацию и нитрификацию в почве и оказывает влияние на процессы трансформации фосфора и калия в почве [Бирюкова, 2017];

– фунгицидные свойства ШП (вероятно, благодаря вышеупомянутым сорбционным качествам) обеспечивают более высокую устойчивость растений к грибковым заболеваниям [Котова, 2006];

– при взаимодействии дробленых ШП с водой образуются сильнокислые растворы с рН

около 3, что исключает их использование в растениеводстве в чистом виде.

То, что высокое содержание кремния дает возможность использовать удобрения с содержанием ШП в качестве кремниевых удобрений, как заявляют производители удобрения «ШунгиТерра» (ООО «ЮГ-СЕРВИС»), пока не доказано. Растениям кремний доступен только в виде монокремниевых кислот [Матыченков и др., 2002]. Кремнийсодержащие породы значительно отличаются в плане их эффективности применения в качестве кремниевых удобрений. Например, цеолит, диатомиты, аморфный кремний обеспечивают растения доступным кремнием, тогда как кварцевый песок при высоком содержании кремния абсолютно бесполезен для растений как источник кремния [Бочарникова и др., 2011]. Результатов работ по определению доступности кремния, содержащегося в ШП (содержания водорастворимого и кислоторастворимого кремния), в литературе нет, и вопрос эффективности ШП в качестве источника кремния для растений требует изучения. Данный вопрос актуален, так как, несмотря на большое количество кремния в почвах и растениях, и в целом в окружающей среде, до сих пор элемент остается вне поля зрения агрохимиков нашей страны [Куликова, 2013]. Вместе с тем широкая мировая практика накопила определенный опыт производства и использования удобрений и других препаратов, средств защиты растений, содержащих значительные количества кремния. Например, в Южной Корее рис удобряют метасиликатом кальция, в Японии – отходами тепловых станций, шелухой и соломой риса, металлургическими шлаками; в Германии ресурсы кремния пополняют доменными силикатно-кальциевыми шлаками; на острове Маврикий в почву заделывают измельченный порошок базальта, содержащий около 50 % SiO₂, в США – силикат кальция [Ермолаев, 1992].

Что касается применения шунгитсодержащих смесей в качестве агрокарбонатного сырья для известкования кислых почв, то следует заметить, что роль ШП в этих экспериментах не определена. Сами по себе ШП могут значительно подкислять субстрат (главным образом в результате образования серной кислоты из-за присутствия сульфидов в составе ШП), и степень изменения рН значительно варьирует в зависимости от месторождения ШП [Рожкова, Чаженина, 2013]. При этом при добавлении ШП в субстрат для выращивания растений ингибирующий эффект на рост растений определяется больше количеством ШП в субстрате, чем степенью ее измельчения [Икконен и др.,

2018]. Проводятся эксперименты для поиска оптимальных соотношений ШП и карбонатных веществ, например, доломитов или апатитов, для нейтрализации кислотности шунгитов. Например, показано, что Ковдорский апатит обладает в 8 раз большей эффективностью в нейтрализации кислотности зажогинского шунгита по сравнению с апатитом из Апатитов [Филиппов, 2002].

Наконец, остается неизученным и еще один важный аспект возможности применения ШП в растениеводстве. Известно, что ШП характеризуются повышенным содержанием ряда токсичных и потенциально токсичных элементов. Исследования экологических последствий разработки месторождений ШП показали, что, разрушаясь на поверхности под действием физико-химических и биогенных факторов, ШП являются источником поступления тяжелых металлов в почву и природные воды [Рожкова, Чаженгина, 2013; Чаженгина и др., 2019]. Анализ микроэлементного состава крошки ШП трех месторождений в нашем исследовании показал, что они содержат большой набор токсичных элементов в значительных количествах (табл. 2). В частности, содержание таких необходимых и условно необходимых (не для всех видов) для растений элементов, как Cu, Zn и Co, во всех образцах превосходит многократно не только ПДК для сельхозугодий, но и фоновые значения содержания элементов в дерново-подзолистых почвах (табл. 2). В турастамозерской ШП намного выше фоновое содержание Mn, а в нигозерской и зажогинской – содержание Mo. Из числа ультрамикроэлементов превышение фоновых значений отмечается по содержанию Cd, V и Ni, а содержание последнего намного выше, чем ПДК. Кроме того, во всех образцах ШП в разных количествах присутствуют такие биологически токсичные элементы, как Ag, Pb, As, Sb, Be, Ba, Se, Tl и U, причем содержание некоторых из них превосходит фоновое содержание этих элементов в почвах. Безусловно, вопрос о том, могут ли ШП быть источником тяжелых металлов или других токсических веществ, потенциально опасных для здоровья человека, требует изучения и однозначного ответа прежде, чем могут выдаваться рекомендации о применении тех или иных ШП самостоятельно или в составе сложных удобрений для использования в растениеводстве.

Имеется также предположение, что сильные антисептические свойства шунгита негативно отражаются на развитии клубеньковых бактерий, что делает невозможным применение ШП при выращивании бобовых растений [Тимейко и др., 2017].

Таким образом, результаты наших исследований и анализ литературы говорят о том, что практическое использование ШП требует определенной осторожности и дальнейшего изучения, т. к., не понимая механизмов их влияния на живые организмы, и в частности на растения, нельзя обеспечить их эффективное применение с целью управления ростом, развитием и формированием продуктивности. Очевидно также и то, что обобщающий термин «шунгит» неприменим в физиологии растений и растениеводстве, так как ШП разных месторождений и в смеси с другими веществами в составе удобрений могут оказывать на растения очень разные, вплоть до противоположных, эффекты. Вполне возможно, что спектр косвенных эффектов ШП, опосредованных изменением под их влиянием почвенных свойств, весьма широк, и это может дополнительно усложнять прогноз результатов от применения ШП в тех или иных условиях и, разумеется, требует специальных исследований в конкретных полевых условиях.

Литература

- Бирюкова О. А. О влиянии удобрений «Шунги-Терра» на физико-химические свойства чернозема обыкновенного // Актуальные агросистемы. 2017. № 6. С. 36–40.
- Борисов П. А. Карельские шунгиты. Петрозаводск: Карелия, 1956. 92 с.
- Бочарникова Е. А., Матыченков В. В., Матыченков И. В. Кремниевые удобрения и мелиоранты: история изучения, теория и практика применения // Агрехимия. 2011. № 7. С. 84–96.
- Волкова Р. И., Будыкина Н. П. Шунгитсодержащие карбонатные породы как сырье для известкования кислых почв // Минеральное сырье Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 179–188.
- Ермолаев А. А. Кремний и устойчивость земледелия. Воронеж: Центр.-Чернозем. кн. изд-во, 1992. 216 с.
- Икконен Е. Н., Сидорова В. А., Шibaева Т. Г., Юркевич М. Г. Оценка физиологического отклика *Allium cepa* L. на содержание шунгита в почве // Механизмы устойчивости растений и микроорганизмов к неблагоприятным условиям среды: Сб. мат-лов Годичного собрания Общества физиологов растений России, Всерос. науч. конф. с междунар. участием и школы молодых ученых (Иркутск, 10–15 июля 2018 г.). Иркутск, 2018. Часть I. С. 389–391. doi: 10.31255/978-5-94797-319-8-389-391
- Калинин Ю. К., Калинин А. И., Скоробогатов Г. А. Шунгиты Карелии – для новых стройматериалов, в химическом синтезе, газоочистке, водоподготовке и медицине. СПб.: УНЦХ СПбГУ, ВВМ, 2008. 219 с.
- Котова З. П. Шунгитсодержащие удобрения // Агрехимический вестник. 2006. № 6. С. 31–32.
- Крутов В. И. Использование шунгитовой мульчи для ускорения снеготаяния в лесных питомниках и на

вырубках // Минеральное сырье Карелии. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1977. С. 175–179.

Куликова А. Х. Кремний и высококремнистые породы в системе удобрения сельскохозяйственных культур. Ульяновск: Изд-во УГСХА им. П. А. Столыпина, 2013. 176 с.

Матыченков В. В., Бочарникова Е. А., Аммосова Я. М. Влияние кремниевых удобрений на растения и почву // Агрохимия. 2002. № 2. С. 86–93.

Мясникова О. В., Первунина А. В. Перспективы комплексного использования низкоуглеродистых шунгитосодержащих пород Карелии // Горный журнал. 2019. № 3. С. 78–82. doi: 10.17580/gzh.2019.03.15

Органическое вещество шунгитоносных пород Карелии (генезис, эволюция, методы изучения) / Отв. ред. М. М. Филиппов. Петрозаводск: Карел. науч. центр РАН, 1994. 207 с.

Онежская палеопротерозойская структура (геология, тектоника, глубинное строение и минерагения) / Отв. ред. Л. В. Глушанин, Н. В. Шаров, В. В. Щипцов. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2011. 431 с.

Пыжов В. С., Удовенко А. И., Каменев Р. А. Применение удобрения «Шунгитерра» в растениеводстве // Инновации в технологиях возделывания сельскохозяйственных культур: Мат-лы всерос. науч.-практ. конф. (пос. Персиановский, 09 февраля 2017 г.). Персиановский: ДонГАУ, 2017. С. 45–50.

Рожкова В. С., Чаженгина С. Ю. Влияние окисления сульфидов шунгитовых пород на содержание тяжелых металлов в почве и карьерных водах // Экологическая геология: теория, практика и региональные проблемы: Мат-лы третьей науч.-практ. конф. (Воронеж, 20–22 ноября 2013 г.). Воронеж: Цифровая полиграфия, 2013. С. 258–261.

Синькевич Е. И. Эффективность шунгитосодержащего доломита Кяппесельгского месторождения как известкового материала // Продуктивность торфяных почв под луговыми агроценозами. Петрозаводск: Карел. фил. АН СССР, 1981. С. 17–18.

Светов С. А., Степанова А. В., Чаженгина С. Ю., Светова Е. Н., Михайлова А. И., Рыбникова З. П., Парамонов А. С., Утицина В. Л., Колодей В. С., Эхова М. В. Прецизионный (ICP-MS, LA-ICP-MS) анализ состава горных пород и минералов: методика и оценка точности результатов на примере раннедокембрийских мафитовых комплексов // Труды Карельского научного центра РАН. 2015. № 7. С. 54–73. doi: 10.17076/geo140

Тимейко Л. В., Кузнецова Л. А., Голубева О. А. К вопросу использования шунгитов в сельскохозяйственном производстве // Черноземы Центральной России: генезис, эволюция и проблемы рационального использования. Воронеж, 2017. С. 233–237.

Тойкка М. А., Кекконен А. П. Шунгит как удобрение // Ученые записки Карело-Финского государственного университета. 1946. Т. 1. С. 214–268.

Тойкка М. А., Левкина Т. И., Перевозчикова Е. М. Содержание микроэлементов в почвах Карелии и применение микроудобрений. Петрозаводск: Карелия, 1969. 60 с.

Филиппов М. М. Шунгитоносные породы Онежской структуры. Петрозаводск: КарНЦ РАН, 2002. 280 с.

Чаженгина С. Ю., Рожкова В. С., Кочнева И. В. Моделирование процессов абиогенного выветривания углеродистого вещества палеопротерозойских шунгитовых пород Онежской структуры (Карелия) // Труды Карельского научного центра РАН. 2019. № 2. С. 67–79. doi: 10.17076/geo827

Bolhår-Nordenkamp H. R., Long S. P., Baker N. R., Oquist G., Schreiber U., Lechner E. G. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review 113 of current instrumentation // *Funct. Ecol.* 1989. Vol. 3. P. 497–514. doi: 10.2307/2389624

Ignatov I., Mosin O. The structure and composition of carbonaceous fullerene containing mineral shungite and microporous crystalline aluminosilicate mineral zeolite. Mathematical model of interaction of shungite and zeolite with water molecules // *Advances in Physics Theories and Applications.* 2014. Vol. 28. P. 10–21. doi: 10.13187/ejnr.2014.1.30

Ikkonen E., Chazhengina S., Bakhmet O., Sidorova V. Effect of shungite application on the temperature sensitivity of *Allium cepa* respiration under two soil water regimes // *Agronomy.* 2021. Vol. 11. Art. 1302. doi: 10.3390/agronomy11071302

Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide // *J. Exp. Bot.* 2000. Vol. 51. P. 659–668. doi: 10.1093/jexbot/51.345.659

Melezhik V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old metamorphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry // *Earth Sci. Rev.* 1999. Vol. 47. P. 1–40. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00027-6

Poorter H., Niinemets U., Poorter L., Wright I. J., Villar R. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis // *New Phytol.* 2009. Vol. 182. P. 565–588. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x

References

Biryukova O. A. On the effect of the ShungiTerra fertilizers on physical and chemical properties of ordinary chernozem. *Aktual'nye agrosistemy = Current Agrosystems.* 2017;6:36–40. (In Russ.)

Borisov P. A. Karelian shungites. Petrozavodsk: Karelia; 1956. 92 p. (In Russ.)

Bocharnikova E. A., Matychenkov V. V., Matychenkov I. V. Silicon fertilizers and ameliorants: The history of study, theory and practice of application. *Agrokhimia = Agrochemistry.* 2011;7:84–96. (In Russ.)

Bolhår-Nordenkamp H. R., Long S. P., Baker N. R., Oquist G., Schreiber U., Lechner E. G. Chlorophyll fluorescence as a probe of the photosynthetic competence of leaves in the field: A review 113 of current instrumentation. *Funct. Ecol.* 1989;3:497–514. doi: 10.2307/2389624

Chazhengina S. Yu., Rozhkova V. S., Kochneva I. V. Modeling the chemical weathering effect on the shungite carbon from Paleoproterozoic shungite rocks of the Onega structure (Karelia). *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS.* 2019;2:67–79. doi: 10.17076/geo827 (In Russ.)

Ermolaev A. A. Silicon and farming sustainability. Voronezh: Tsentr.-Chernozem. kn. izd-vo; 1992. 216 p. (In Russ.)

Filippov M. M. (ed.). Organic matter of shungite-bearing rocks in Karelia (genesis, evolution, and study methods). Petrozavodsk: KarRC RAS; 1994. 207 p. (In Russ.)

Filippov M. M. Shungite-bearing rocks of the Onega structure. Petrozavodsk: KarRC RAS; 2002. 280 p. (In Russ.)

Glushanin L. V., Sharov N. V., Shchiptsov V. V. (ed.). Palaeoproterozoic Onega structure (geology, tectonics, deep structure, and minerageny). Petrozavodsk: KarRC RAS; 2011. 431 p. (In Russ.)

Ignatov I., Mosin O. The structure and composition of carbonaceous fullerene containing mineral shungite and microporous crystalline aluminosilicate mineral zeolite. Mathematical model of interaction of shungite and zeolite with water molecules. *Advances in Physics Theories and Applications*. 2014;28:10–21. doi: 10.13187/ejnr.2014.1.30

Ikkonen E., Chazhengina S., Bakhmet O., Sidorova V. Effect of shungite application on the temperature sensitivity of *Allium cepa* respiration under two soil water regimes. *Agronomy*. 2021;11:1302. doi: 10.3390/agronomy11071302

Ikkonen E. N., Sidorova V. A., Shibaeva T. G., Yurkevich M. G. Evaluation of the physiological response of *Allium cepa* L. on shungite in the soil. *Mekhanizmy ustoychivosti rastenii i mikroorganizmov k neblagopriyatnym usloviyam sredy: Sb. mat-lov Godichnogo sobraniya Obshchestva fiziologov rastenii Rossii, Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem i shkoly molodykh uchennykh (Irkutsk, 10–15 iyulya 2018 g.) = Mechanisms of plants and microorganisms resistance to adverse environmental conditions: Proceedings of the Annual Meeting of the Society of Plant Physiologists of Russia, All-Russ. scientific conf. with int. part. and the school of young scientists (Irkutsk, July 10–15, 2018)*. Irkutsk; 2018. Pt. I. P. 389–391. doi: 10.31255/978-5-94797-319-8-389-391 (In Russ.)

Kalinin Yu. K., Kalinin A. I., Skorobogatov G. A. Shungites of Karelia – for new building materials, in chemical synthesis, gas cleaning, water treatment, and medicine. St. Petersburg: UNTsKh SPbGU, VVM; 2008. 219 p. (In Russ.)

Kotova Z. P. Shungite-bearing fertilizers. *Agrokhimicheskiy vestnik = Agrochemical Herald*. 2006;6:31–32. (In Russ.)

Krutov V. I. The use of shungite mulch to accelerate snowmelt in forest nurseries and glades. *Mineral'noe syr'e Karelii = Mineral Raw Materials of Karelia*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1977. P. 175–179. (In Russ.)

Kulikova A. Kh. Silicon and high-silicon rocks in the crop fertilization system. Ul'yanovsk: Izd-vo UGSKhA im. P. A. Stolypina; 2013. 176 p. (In Russ.)

Matychenkov V. V., Bocharnikova E. A., Ammosova Ya. M. The impact of silicon fertilizers on plants and soils. *Agrokhimia = Agrochemistry*. 2002;2:86–93. (In Russ.)

Maxwell K., Johnson G. N. Chlorophyll fluorescence – a practical guide. *J. Exp. Bot.* 2000;51:659–668. doi: 10.1093/jexbot/51.345.659

Melezhih V. A., Fallick A. E., Filippov M. M., Larsen O. Karelian shungite – an indication of 2.0-Ga-old meta-

morphosed oil-shale and generation of petroleum: geology, lithology and geochemistry. *Earth Sci. Rev.* 1999;47:1–40. doi: 10.1016/S0012-8252(99)00027-6

Myasnikova O. V., Pervunina A. V. Integrated use prospects for low-carbon shungite-bearing rocks in Karelia. *Gornyi Zhurnal*. 2019;3:78–82. doi: 10.17580/gzh.2019.03.15 (In Russ.)

Poorter H., Niinemets U., Poorter L., Wright I. J., Villar R. Causes and consequences of variation in leaf mass per area (LMA): A meta-analysis. *New Phytol.* 2009;182:565–588. doi: 10.1111/j.1469-8137.2009.02830.x

Pyzhov V. S., Udovenko A. I., Kamenev R. A. Application of the ShungiTerra fertilizer in crop production. *Innovatsii v tekhnologiyakh vozdeyvaniya sel'skokhozyaistvennykh kul'tur: Mat-ly vseros. nauch.-prakt. konf. (pos. Persianovskii, 09 fevralya 2017 g.) = Innovations in crop cultivation technologies: Proceedings of the All-Russ. scientific-practical. conf. (settlement of Persianovskii, Feb. 09, 2017)*. Persianovskii: DonGAU; 2017. P. 45–50. (In Russ.)

Rozhkova V. S., Chazhengina S. Yu. The impact of oxidation of shungite rocks sulfides on the content of heavy metals in soil and quarry waters. *Ekologicheskaya geologiya: teoriya, praktika i regional'nye problemy: Mat-ly tret'ei nauch.-prakt. konf. (Voronezh, 20–22 noyabrya 2013 g.) = Ecological geology: Theory, practice and regional problems. Proceedings of the 3rd scientific and practical. conf. (Voronezh, Nov. 20–22, 2013)*. Voronezh: Tsifrovaya poligrafiya; 2013. P. 258–261. (In Russ.)

Sin'kevich E. I. Efficiency of shungite-bearing dolomite from the Kyappeselga deposit as a calcareous material. *Produktivnost' torfyanykh pochv pod lugovymi agrotsenozami = Productivity of peat soils under meadow agrocenoses*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1981. P. 17–18. (In Russ.)

Svetov S. A., Stepanova A. V., Chazhengina S. Yu., Svetova E. N., Mikhailova A. I., Rybnikova Z. P., Paramonov A. S., Utitsina V. L., Kolodei V. S., Ekhova M. V. Precision geochemical (ICP-MS, LA-ICP-MS) analysis of rock and mineral composition: The method and accuracy estimation in the case study of the Early Precambrian mafic complexes. *Trudy Karel'skogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2015;7:54–73. doi: 10.17076/geo140 (In Russ.)

Timeiko L. V., Kuznetsova L. A., Golubeva O. A. On the use of shungites in agricultural production. *Chernozemy Tsentral'noi Rossii: genezis, evolyutsiya i problemy ratsional'nogo ispol'zovaniya = Chernozems of Central Russia: Genesis, evolution, and problems of rational use*. Voronezh; 2017. P. 233–237. (In Russ.)

Toikka M. A., Kekkonen A. P. Shungite as a fertilizer. *Uchenye zapiski Karelo-Finskogo gosudarstvennogo universiteta = Proceedings of the Karelian-Finnish State University*. 1946;1:214–268. (In Russ.)

Toikka M. A., Levkina T. I., Perevozchikova E. M. The content of trace substances in the soils of Karelia and the use of microfertilizers. Petrozavodsk: Karelia; 1969. 60 p. (In Russ.)

Volkova R. I., Budykina N. P. Shungite-bearing carbonate rocks as a raw material for liming acid soils. *Mineral'noe syr'e Karelii = Mineral Raw Materials of Karelia*. Petrozavodsk: Karel. fil. AN SSSR; 1977. P. 179–188. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 12.07.2022; принята к публикации / accepted: 11.10.2022.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Шибяева Татьяна Геннадиевна

д-р биол. наук, ведущий научный сотрудник

e-mail: shibaeva@krc.karelia.ru

Шерудило Елена Георгиевна

канд. биол. наук, старший научный сотрудник

e-mail: sherudil@krc.karelia.ru

Первунина Аэлита Валериевна

канд. геол.-мин. наук, старший научный сотрудник

e-mail: aelita@krc.karelia.ru

Кирилук Сергей Дмитриевич

заместитель директора по науке

e-mail: kir.sd@mail.ru

Титов Александр Федорович

чл.-корр. РАН, д-р биол. наук, профессор, руководитель
лаборатории экологической физиологии растений

e-mail: titov@krc.karelia.ru

CONTRIBUTORS:

Shibaeva, Tatyana

Dr. Sci. (Biol.), Leading Researcher

Sherudilo, Elena

Cand. Sci. (Biol.), Senior Researcher

Pervunina, Aelita

Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Senior Researcher

Kirilyuk, Sergey

Deputy Director for Science

Titov, Alexander

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