

УДК 546.56:581.14:631.524.8: 631.417.2:632.122:633.358

## ВЛИЯНИЕ УЛЬТРАДИСПЕРСНОЙ ГУМИНОВОЙ СУСПЕНЗИИ САПРОПЕЛЯ НА РОСТ, ФОТОСИНТЕТИЧЕСКУЮ АКТИВНОСТЬ И НАКОПЛЕНИЕ МЕДИ ГОРОХОМ (*PISUM SATIVUM* L.)

© 2021 г. Академик РАН В. А. Румянцев<sup>1,\*</sup>, Я. В. Пухальский<sup>1</sup>, С. И. Лоскутов<sup>1</sup>, А. С. Митюков<sup>1</sup>, Ю. В. Хомяков<sup>2</sup>, Г. Г. Панова<sup>2</sup>

Поступило 08.08.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принято к публикации 09.08.2021 г.

В модельных опытах, на примере различных коммерческих высокопродуктивных сортов гороха посевного (Софья, Альфа, Триумф), культивируемых в дерново-подзолистой почве, показано изменение ростовых показателей растений при интродукции в среду токсичной концентрации ионов меди (165 мг/кг) и ультрадисперсной суспензии полигуматов сапропеля (УДГСС) (0.005%–50 ppm). Эксперименты проводили двукратно в четырехкратной повторности на каждый вариант в регулируемых условиях интенсивной светокультуры. Показано, что для всех сортов интродукция металла привела к снижению выхода урожая; на 57% для сортов Альфа и Софья, и на 45% для сорта Триумф. Причем у последнего, по соотношению ингибирования биомассы надземных/подземных органов, корневая система оказалась устойчивее к воздействию токсиканта. Средние показатели снижения биомассы корней составили лишь 29%, тогда как для двух других сортов они составляли 52–62% от контроля. При загрязнении субстрата сорт Триумф отличался в два раза меньшими значениями по аккумуляции меди в своей биомассе, чем два других, и что по степени толерантности делает его скорее фитоисключателем для данного металла. В дополнение, загрязнение почвы токсичной медью привело к увеличению содержания общего хлорофилла в листьях гороха Триумф на 15%, что, вероятно, также связано с активацией механизма неспецифической компенсаторной реакции адаптации сорта к стрессу. Интродукция в среду ультрадисперсной фракции гумато-сапропеля нивелировала токсичное действие меди по всем приведенным параметрам, в сторону контроля.

*Ключевые слова:* горох посевной, загрязнение, медь, сапропель, полигуматы, хлорофилл, светокультура

DOI: 10.31857/S268673972111013X

### ВВЕДЕНИЕ

Повышение урожайности и устойчивости культур, а также воспроизводство почвенного плодородия зависят от применения пестицидов и органо-минеральных удобрений, содержащих в своем составе различные биогенные макро- и микроэлементы, к числу которых относят и медь. Ежегодно с удобрениями в агроландшафты вносятся порядка 94 тыс. т меди [1]. Больше всего меди содержится в простом суперфосфате. В 20 тоннах навоза содержится порядка 40 г меди [2]. Также среди источников поступления меди в экосистемы можно выделить выбросы металлургических предприятий [3]. Таким образом, в ре-

зультате работы химической промышленности в педосферу ежегодно поступает около 155 тыс. т ионов меди.

В естественных условиях, при поступлении из почвы в растения, медь связывается с энзимами-оксидазами, участвующими в редокс-гомеостазе клеток. Почти вся ее доля в низких концентрациях прочно связана с различными белками [4]. В частности, медь входит в состав пластоцианина, голубого белка, осуществляющего перенос электронов между фотосистемами I и II в процессе фотосинтеза. Значительна роль меди и в азотном обмене растений. Также медь участвует в регулировании водного баланса. Поэтому при ее недостатке растения теряют тургор, и, несмотря на достаточное количество воды в почве, их листва поникает.

Вариабельность природного фона по валовому содержанию меди в разных типах почв составляет 2–30 мг/кг. Предельно допустимая концентрация (ПДК) составляет 50–55 мг/кг. Столь резкий пе-

<sup>1</sup> Институт озераведения Российской академии наук, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup> Агрофизический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: info@spcras.ru

реход обусловлен тем фактором, что ионы меди сильно связаны с высокоселективными обменными центрами твердой фазы почв, в том числе, с гумусовыми макромолекулами пахотного слоя (особенно с фульвокислотами), содержащими функциональные группы, способные к образованию не только ионных, но и ковалентных или донорно-акцепторных связей [5]. Так, дерново-подзолистая и черноземная почвы, согласно классическим моделям сорбции Ленгмюра и Фрейндлиха, характеризуются наибольшими показателями емкости катионного поглощения (ЕКО) и прочности связывания ионов  $\text{Cu}^{2+}$ .

При переизбытке накопления меди в почвах из эссенциального микроэлемента она становится токсичным поллютантом второго класса опасности – тяжелым металлом (ТМ) [6], обладающим высокой реакционной способностью по отношению к произрастающим на данной территории культурам. Период полужизни (выщелачивания) для данного токсиканта из почв составляет от 310 до 1500 лет.

Избыточная аккумуляция меди в растениях при транслокации из почвы приводит к нарушению многих метаболических реакций [7], что отражается в снижении биомассы и качестве сельскохозяйственной продукции, либо полной гибели культуры. При этом важно отметить, что диапазон концентраций меди, не оказывающих выраженного токсического воздействия, весьма узок для разных растений.

На подвижность меди в почвах и ее поступление в растения влияет величина кислотности (рН) среды. При повышении значений рН прочность связи меди с почвенными компонентами увеличивается.

В многочисленных работах отмечено, что внесение органических биоудобрений, в том числе гуматов сапропеля или донного ила в загрязненную почву, уменьшает миграционную подвижность токсикантов вследствие образования различных низкомолекулярных органоминеральных комплексов, обладающих низкой растворимостью и доступностью для растений [8, 9]. То есть данные соединения, помимо ростостимулирующей функции, связанной с оптимизацией и мобилизацией питательного режима у растений, за счет участия своих активных функциональных групп гуминовых кислот способны также оказывать и фитопротекторное действие.

Применение биодобавок на основе полигуматов можно использовать как триггер в регулировании выноса поллютантов за пределы экосистем или нормирования их содержания в растительной биомассе в пределах ПДК при возделывании культур, используемых на пищевые и кормовые цели на загрязненных территориях.

По мнению ряда авторов, в исследованиях, связанных с изучением воздействия поллютантов на растения, наиболее информативным показателем по чувствительности культур является их биомасса [10, 11].

Бобовые культуры более толерантны к воздействию  $\text{Cu}^{2+}$ , чем зерновые, но менее, чем пропашные. Дифференциальная устойчивость зернобобовых смесей к возрастающим дозам меди приведена в [12].

Характер распределения меди при транслокации в растения меняется в течение онтогенеза. Сведения о распределении ее по органам весьма противоречивы. Так, для представителя из семейства бобовых, сои характерен базипетальный тип накопления микроэлемента [13].

Целью настоящей работы было провести сравнительную оценку роста и развития различных сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.) в условиях загрязнения дерново-подзолистой почвы токсичными концентрациями меди и изучить фитопротекторный эффект на аккумуляцию токсиканта в различных частях растения при интродукции сапропелевых полигуматов.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В качестве объектов для исследований были выбраны коммерческие высокопродуктивные сорта гороха посевного: Софья, Альфа и Триумф. Перед посадкой семена стерилизовали 5.0% гипохлоридом натрия в течение 10 мин для элиминации их от всех возможных эндофитных патогенных бактерий и грибов. Тщательно промытые после стерилизации дистиллированной водой семена проращивали в чашках Петри на фильтровальной бумаге в темноте в течение 3 сут. Лабораторная всхожесть семян (энергия прорастания) составила – 84, 65 и 81% соответственно.

Растения культивировали в пластиковых сосудах, содержащих 2.0 кг залежной дерново-подзолистой почвы, просеянной через сито с диаметром ячеек 2 мм и доведенной до воздушно-сухого состояния. Агрохимическая характеристика почвы:  $\text{pH}_{(\text{KCl})}$  –  $4.46 \pm 0.01$ ;  $\text{pH}_{(\text{H}_2\text{O})}$  –  $5.20 \pm 0.01$ ; Нг (по Каппену) –  $2.07 \pm 0.01$  мг-экв/100 г; ЕКО  $7.30 \pm 0.70$  мг-экв/100; подвижный  $\text{P}_2\text{O}_5$  (по Кирсанову) –  $85.0 \pm 6.9$  мг/кг; подвижный  $\text{K}_2\text{O}$  (по Масловой) –  $95.1 \pm 1.3$  мг/кг; гумус (по Тюрину) –  $1.62\% \pm 0.03$ . Исходное содержание валовой формы меди в почве составляло 2.48 мг/кг, подвижной (нативной) – 0.06 мг/кг. Кислотность с помощью извешткования была доведена до нейтральной. Влажность субстрата в опыте поддерживалась весовым методом путем ежедневного полива на уровне 60% ППВ. Растения выращивали до фазы цветения (35–40 дней).

Перед посевом в почву вносили удобрения в виде питательного раствора солей из расчета конечного содержания их в почве (мг/кг):  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  – 15;  $\text{KNO}_3$  – 200;  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  – 200;  $\text{MgSO}_4$  – 35;  $\text{CaCl}_2$  – 25;  $\text{H}_3\text{BO}_3$  – 3;  $\text{MnSO}_4$  – 3;  $\text{ZnSO}_4$  – 3;  $\text{Na}_2\text{MoO}_4$  – 2.

Для моделирования загрязнения почвенной среды ионами меди использовали водные растворы сульфата ( $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ) в количестве 3ПДК по валовой форме или 55ПДК по нативной форме – 165 мг/кг. Концентрация была выбрана на основании литературных источников [14, 15].

Экологически чистый сапрпель был получен из месторождения деревни Ермолино Псковской области. Жидкая суспензия ультрадисперсной фракции гумато-сапрпеля (УДГСС) с частицами размера 86–89 нм получена в результате ультразвуковой кавитации гелиевой структуры на установке ПСБ-ГАЛС 18035-05 (частота 35 кГц, ультразвуковое давление 2.0 Вт/см<sup>2</sup>), обогащенной ионами калия, фосфора, натрия и микроэлементами [16]. Экстракт вносился разово при посадке под корень в дозе 50 ppm (0.005%). Данная концентрация была выбрана на основании другой работы с горохом [17]. Контролем служили варианты без добавления сульфата меди или УДГСС в почву.

Опыт закладывали двукратно в четырехкратной аналитической повторности. На каждый сосуд приходилось по 4 семени или 16 штук на вариант.

В первом опыте исследования проводили в модельном вегетационном опыте в регулируемых условиях на базе биополигона Агрофизического НИИ (Санкт-Петербург), во втором – на площадке экспериментальной лаборатории научно-производственного объединения ООО “БиоЭкоТех” (Санкт-Петербург) (рис. 1).

Нормируемые параметры микроклимата внутреннего пространства составляли: относительная влажность воздуха 60–65%, фотопериод (день/ночь) – 14/10 ч, температура (день/ночь) – 23/18°C и скорость воздушного потока (день/ночь) – 3.0/1.2 м/с. Для оценки влияния разного типа инсоляции на процесс фотоморфогенеза в первом опыте использовались четыре лампы ДНАЗ Reflux (Russia) по 400 Вт каждая. Облученность растений на занимаемой площади составила 80–85 Вт/м<sup>2</sup> в области фотосинтетической активной радиации (ФАР). При повторном эксперименте в качестве источника освещения были взяты девять современных светодиодных LED-светильников G-Ray V2 UV полного белого света (SpecLED, Ukraine) по 100 Вт. Оба данных фитосветильника могут использоваться в технологиях интенсивной светокультуры [18], однако кардинально отличаются друг от друга по энергоспектральному приходу ФАР. Дистанция подвеса светильников в обоих опытах до апикальной точки роста побега составляла 50 см. Замеры прихо-

дящего энергопотока света на рабочую площадь проводили с помощью люксметра (Voltcraft LX-1108, Germany) и спектрофотометра (OceanOptics STS-VIS, USA). Сверку при перерасчете люксов (Лк) в микромоли в секунду на квадратный метр полезной площади проводили согласно формуле для белого света. Графическое моделирование и светотехнические расчеты проводили с помощью программ SolidWorks 2014 и Dialux Evo 8.1.

Изменение содержания общего хлорофилла в листьях выполняли неинвазивным методом с использованием оптического счетчика SPAD 502 (“Minolta Camera Co, Ltd”, Япония), позволяющим проводить замеры без разрушения биологической ткани листьев, в том числе и дистанционно. В России исследования с использованием указанного прибора носят фрагментарный характер. Также общее содержание хлорофиллов в пересчете на мг/г определяли на спектрофотометрах ПЭ-5300В (Экоприбор, Россия) и СФ-2000 (ОКБ Спектр, Россия) в ацетоновой вытяжке (80%).

О влиянии поллютанта, с или без использования УДГСС, на растения судили по изменению морфометрических показателей (сухой биомассы надземных и подземных органов).

Анализ аккумуляции меди в корнях и стеблях проводили в аккредитованной на техническую компетентность и независимость Испытательной лаборатории Агрофизического НИИ Россельхозакадемии (Санкт-Петербург).

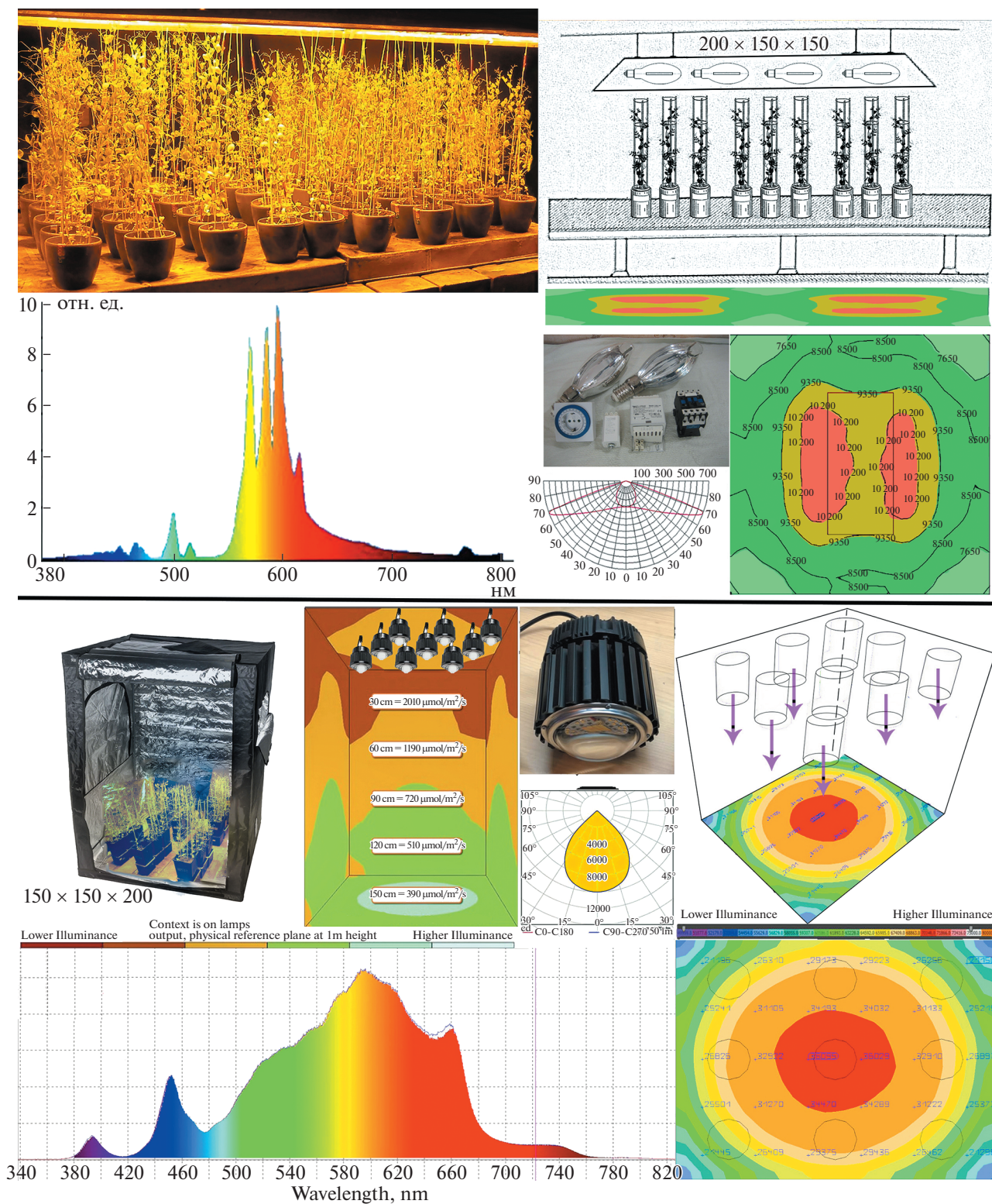
Результаты эксперимента обрабатывали в пакете программы Excel 2007 с расчетом уровней значимости  $p < 0.001$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Использование двух разных типов освещения в опытах при сохранении остальных показателей микроклимата позволило выявить одну закономерность. При культивировании растений под светодиодными лампами период цветения наступал раньше на 5 сут (35 дней). По остальным показателям на данной фазе вегетации статистически значимых отличий не обнаружено, что, вероятно, было связано с малым числом повторностей на каждый вариант.

При повышении концентрации меди в почве до 3ПДК общая сухая фитомасса всех сортов в среднем за вегетацию снизилась в 2 раза по отношению к контролю (рис. 2). Для сорта Триумф изменения по морфометрии не превышали 45% (отличия не достоверны), тогда как для двух других сортов они составили 57% ( $p < 0.001$ ). Использование УДГСС значительно повысило металлоустойчивость растений ( $p < 0.05$ ).

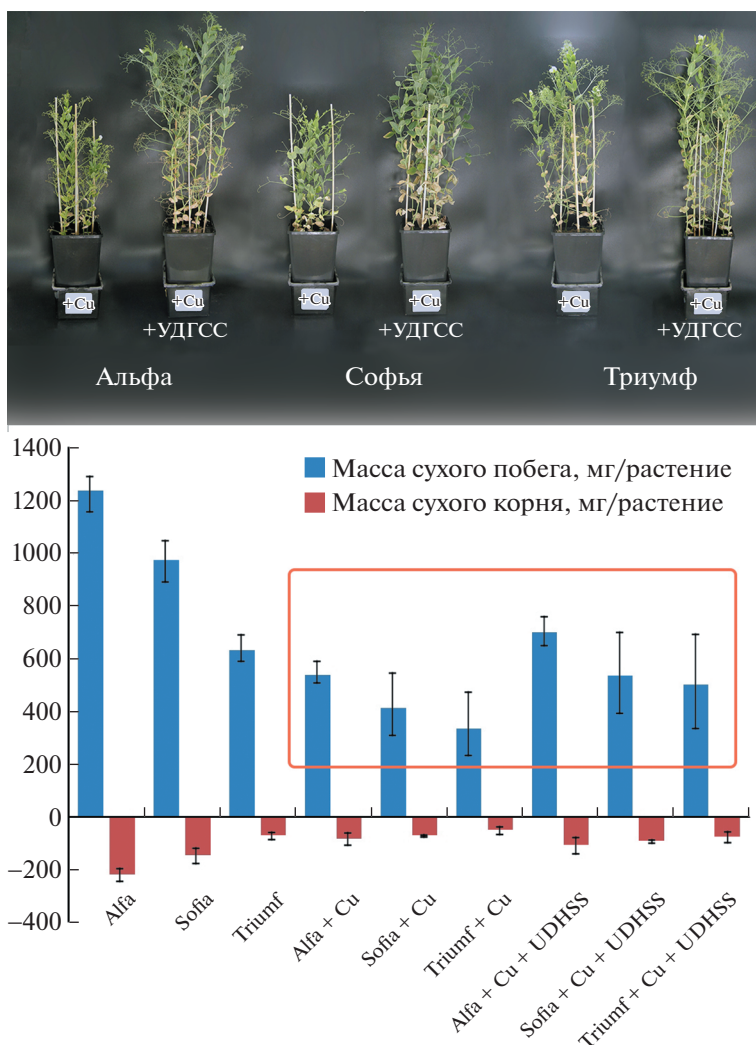
Анализ влияния Cu на фотосинтетические пигменты выявил накопление общего хлоро-



**Рис. 1.** Культивирования растений гороха посевного (*Pisum sativum* L.) в условиях заданных характеристик климата и полной светокультуры.

фила у сорта Триумф: увеличение его показателя в результате измерения с использованием SPAD 502 составило 16%, колориметрическим методом – 14%. Для двух других сортов отмечено

снижение значений содержания пигмента в листьях в среднем на 24–26% по значениям тестера SPAD и 40–52% – по значениям спектрофотометров (рис. 3).



**Рис. 2.** Масса различных сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.), выращенного на дерново-подзолистой супесчаной почве с внесением ионов меди в высокой концентрации, а также полигуматов сапропеля. Бары на диаграмме показывают ошибки средних значений по двум экспериментам.

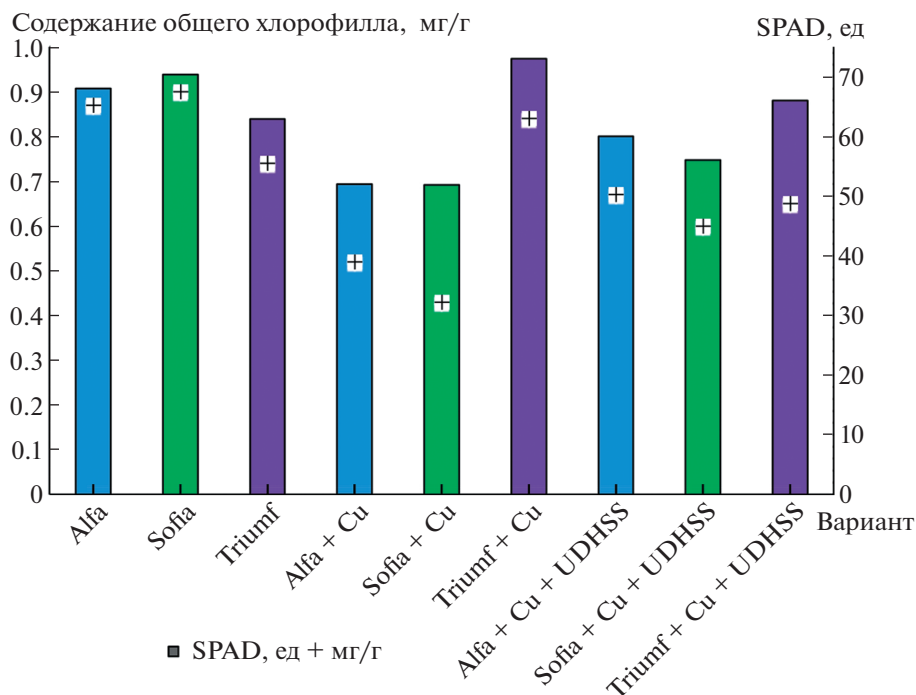
Полигуматы сапропеля, внесенные в почву в концентрации 50 ppm, значительно улучшили содержание общего хлорофилла у сортов Софья и Альфа, по фону сопоставимого с образцами в контроле.

Увеличение пула хлорофилла у сорта Триумф при внесении ионов токсичной меди в ассимилирующих органах можно связать с металл-индуцированным синтезом низкомолекулярных белков, связывающих избыток токсиканта в растениях и нивелируя тем самым негативное действие стресса. По-видимому, устойчивость Триумфа также может быть связана и с активацией накопления в растениях свободного пролина – полифункционального протекторного соединения, обладающего в том числе антиоксидантными свойствами.

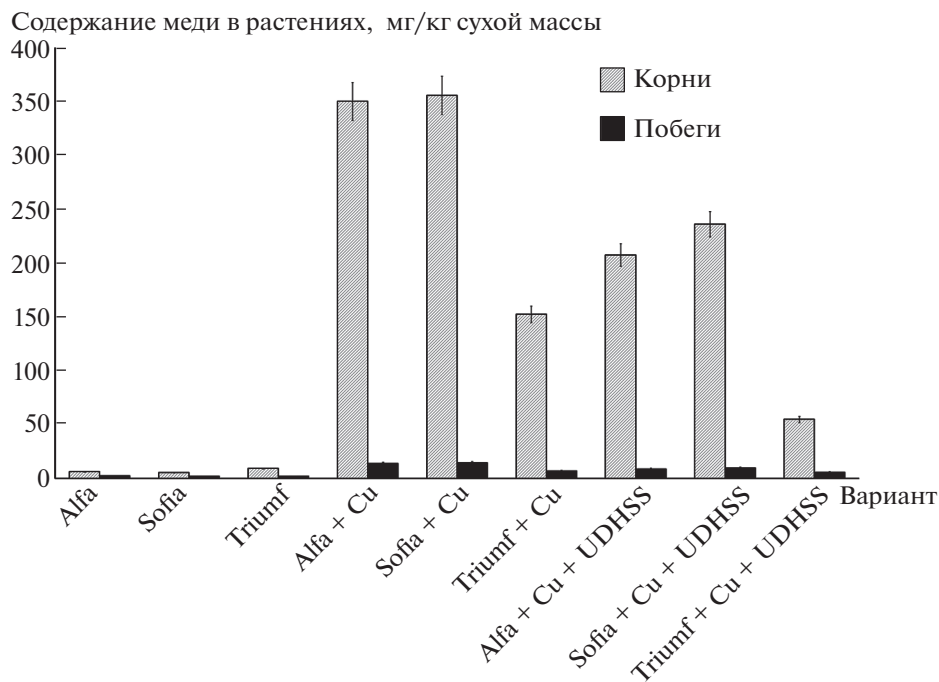
Как и ожидалось, корневая система, как основной буфер для поступления токсикантов в

растения [19], задерживала в себе наибольшее количество ионов меди при транслокации их в побеги. При этом, при одинаковом уровне загрязнения, характер закономерностей перехода токсиканта в фитомассу различался у разных сортов ( $p < 0.001$ ). Наименьшие значения по аккумуляции отмечены у сорта Триумф, что отражает его достаточно высокий элементостатический барьер, препятствующий накоплению поллютантов в надземных органах (рис. 4).

За счет электростатического взаимодействия между функциональными группами (карбоксильными, гидроксильными, карбонильными и др.), гуминовых кислот УДГСС и ионами меди происходило детоксицирующее воздействие, вероятнее всего сопряженное с образованием нерастворимых малоподвижных комплексов ГК-ТМ в ризосфере.



**Рис. 3.** Содержание хлорофилла в листьях коммерческих сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.), выращенных на загрязненной медью дерново-подзолистой почве и измеренных под конец эксперимента с помощью прибора SPAD 502 и колориметрическим методом на спектрофотометрах. Показаны средние значения по двум экспериментам.



**Рис. 4.** Распределение содержания меди по органам у различных сортов гороха посевного (*Pisum sativum* L.). Бары указывают ошибки средних по двум экспериментам для каждого варианта  $\pm 5.0\%$ .

Содержание меди в сухой биомассе побегов составляло лишь 7.13 мг/кг, тогда как для сортов Альфа и Софья при данной, относительно небольшой концентрации загрязнения субстрата,

накопление элемента достигало половины от максимально допустимого его содержания в кормах для сельскохозяйственных животных (30 мг/кг) [20]. Интродукция УДГСС снижала значения данного

показателя до 5.86 мг/кг, т.е. приближая его к стандарту.

Приведенные результаты позволяют сделать вывод о потенциальной возможности возделывания гороха Триумф на почвах, загрязненных медью. Несмотря на ингибирование показателей его биомассы почти вдвое, сорт отличается экологически более чистым выходом конечной продукции в сравнении с сортами Альфа и Софья.

Использование биопрепаратов, созданных на основе гуматов сапропеля, позволит еще более повысить физиолого-биохимических процессы устойчивости растительного организма к неблагоприятным факторам среды и регулирования механизма передвижения токсикантов в системе “почва–растение”.

В перспективе представляется возможным провести изучение реакции растительно-микробного симбиоза на основе гороха посевного сорта Триумф и нитрагинов на присутствие в почвах разного генезиса повышенных концентраций меди в широком диапазоне концентраций, а также различной градации интродукции гуминовых кислот.

#### ИСТОЧНИК ФИНАНСИРОВАНИЯ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН – СПб ФИЦ РАН по теме № 0154-2019-0002.

#### СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Работа не содержит исследований с использованием людей или животных в качестве объектов исследования.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гладышев В.П., Пьяных Г.М., Колесникова Е.В., Нуриахметова Н.Р.* Минеральные удобрения как источник загрязнения почв и сельскохозяйственной продукции тяжелыми металлами // Вестник Томского государственного педагогического университета. 2000. Т. 9 (25). С. 24–27.
2. *Потатуева Ю.А., Сидоренкова Н.К., Прищеп Е.Г.* Агроэкологическое значение примесей тяжелых металлов и токсичных элементов в удобрениях // Агрохимия. 2002. Т. 1. С. 85–95.
3. *Иванов В.С., Черкасова О.А.* Роль промышленных предприятий в формировании загрязнения почвенного покрова кобальтом, медью, свинцом // Вестник Витебского государственного медицинского университета. 2011. Т. 10 (3). С. 143–150.
4. *Burkhead J.L., Gogolin Reynolds K.A., Abdel-Ghany S.E., CoHu C.M., Pilon M.* // Copper homeostasis. *New Phytol.* 2009. V. 182 (4). P. 799–816.
5. *Круглов С.В., Анисимов В.С., Лаврентьева Г.В., Анисимова Л.Н.* Параметры селективной сорбции Со, Си, Zn и Cd дерново-подзолистой почвой и черноземом // Почвоведение. 2009. Т. 4. С. 419–428.
6. *Колесников С.И., Казеев К.Ш., Вальков В.Ф., Пономарева С.В.* Ранжирование химических элементов по их экологической опасности для почвы // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2010. Т. 1. С. 27–29.
7. *Демидчик В.В., Соколик А.И., Юрин В.М.* Токсичность избытка меди и толерантность к нему растений // Успехи современной биологии. 2001. Т. 121 (5). С. 511–525.
8. *Будаева А.Д., Золотов Е.В., Бодоев Н.В., Бальбурова Т.А.* Сорбция ионов тяжелых металлов гуматами аммония, натрия, калия // Фундаментальные исследования. 2005. № 9. С. 112–113.
9. *Kaschl A., Chen Y.* Interaction of Humic Substances with Trace Metals and Their Stimulatory Effects on Plant Growth / Use of Humic Substances to Remediate Polluted Environments from Theory to Practice. I.V. Perminova, K. Hatfield, N. Hertkorn (eds.). Dordrecht: Springer, 2002. V. 52. P. 83–115.
10. *Ульяненко Л.Н., Филипас А.С., Лой Н.Н., Степанчикова Н.С., Круглов С.В.* Влияние загрязнения кадмием дерново-подзолистой почвы на рост и развитие растений ячменя // Агрохимия. 2009. Т. 6. С. 56–60.
11. *Лой Н.Н., Губарева О.С., Степанчикова Н.С., Санжарова Н.И.* Влияние загрязнения дерново-подзолистой почвы кадмием на рост и развитие кормовых бобов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. Т. 5. С. 27–30.
12. *Степанюк В.В., Голенецкий С.П.* Влияние соединений меди на урожайность и элементный состав сельскохозяйственных культур // Агрохимия. 1991. Т. 8. С. 87–95.
13. *Бурдуковский М.Л., Голов В.И.* Накопление и вынос элементов питания и тяжелых металлов растением сои на почвах юга Дальнего Востока // Масличные культуры. Научно-технический бюллетень ВНИИМК. 2011. Т. 1 (146–147). С. 94–100.
14. *Гончарова Л.И., Цыгвинцев П.Н., Губарева О.С., Манин К.В., Чиж Т.В.* Действие меди на формирование зеленой массы и питательных качеств кормовых бобов // Доклады Российской академии сельскохозяйственных наук. 2012. Т. 1. С. 19–21.
15. *Гончарова Л.И., Манин К.В., Рачкова В.М.* Влияние загрязнения почв медью на фотосинтетическую активность и окислительно-восстановительный гомеостаз растений кормовых бобов // Агрохимия. 2011. Т. 6. С. 61–67.
16. *Румянцев В.А., Митюков А.С., Загребин А.О., Тонкопий В.Д., Крюков Л.Н.* Инновационная технология переработки сапропеля, уникальная эффективность и безопасность новой продукции // Общество. Среда. Развитие. 2016. Т. 3. С. 120–124.
17. *Khan A., Khan M.Z., Hussain F., Akhtar M.E., Gurtani A.R., Khan S.* Effect of Humic Acid on the Growth, Yield, Nutrient Composition, Photosynthetic Pigment and Total Sugar Contents of Peas (*Pisum sa-*

- tivum* l) // Journal of the Chemical Society of Pakistan. 2013. V. 35 (1). P. 206–211.
18. *Судаков В.Л., Хомяков Ю.В.* Интенсивная светокультура растений. СПб: Изд-во СПбПУ. 2018. 162 с.
19. *Зубкова В.М., Демин В.А.* Роль корней при поступлении тяжелых металлов в растения в условиях повышенной концентрации их в почве // Доклады академии сельскохозяйственных наук. 2004. Т. 1. С. 23–26.
20. Временный максимально-допустимый уровень МДУ содержания некоторых химических элементов и госсипола в кормах для сельскохозяйственных животных и кормовых добавках. М., 1987. 128 с.

## INFLUENCE OF ULTRADISPERSE HUMIC SAPROPEL SUSPENSION ON GROWTH, PHOTOSYNTHETIC ACTIVITY, AND COPPER ACCUMULATION IN PEAS (*PISUM SATIVUM* L.)

Academician of the RAS V. A. Rumyantsev<sup>a,#</sup>, Ya. V. Puhalsky<sup>a</sup>, S. I. Loskutov<sup>a</sup>,  
A. S. Mityukov<sup>a</sup>, Yu. V. Khomyakov<sup>b</sup>, and G. G. Panova<sup>b</sup>

<sup>a</sup> St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, Institute of Limnology of the Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>b</sup> Agrophysical Institute of the Russian Academy of Agricultural Sciences, St. Petersburg, Russian Federation

<sup>#</sup>E-mail: info@sprcras.ru

In model experiments, using the example of various commercial high-yielding varieties of sowing Peas (Sofya, Alfa, Triumph) cultivated in sod-podzolic soil, was shown the change in plant growth parameters, when a toxic concentration of copper ions (165 mg/kg) and an ultradisperse humic sapropel suspension were introduced into the environment. sapropel (UDHSS) (0.005%–50 ppm). The experiments were carried out two times in four repetitions for each variant under controlled conditions of intensive light culture. It is shown that for all varieties, the introduction of the metal to a decrease in the yield; by 57% for the varieties Alpha and Sofia, and by 45% for the Triumph variety. Moreover, in the latter, according to the ratio of inhibition of the biomass of aboveground/underground organs, the root system turned out to be more tolerant to the effects of the toxicant. The average indicators of root biomass reduction were only 29%, while for the other two varieties they were 52–62% of the control. When the substrate was contaminated, the Triumph variety was distinguished by two times lower values for the accumulation of copper in its biomass than the other two, and that, in terms of the degree of tolerance, makes it rather a phyto-exclusion for this metal. In addition, soil contamination with toxic copper led to an increase in the total chlorophyll content in the leaves of Triumph peas by 15%, which is probably also associated with the activation of the mechanism of nonspecific compensatory responses of the cultivar adaptation to stress. The introduction of the UDHSS into the medium neutralized the toxic effect of copper in all the above parameters, towards the control.

*Keywords:* *Pisum sativum*, pollution, copper, UDHSS, chlorophyll, photoculture