

Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур

Е. П. Артемьева^{1,2}, В. В. Валдайских^{1✉}, Т. А. Радченко¹, М. Ю. Карпухин³

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

³ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

✉ E-mail: v_vald@mail.ru

Аннотация. Цель – выделение из коллекционного фонда ботанического сада УрФУ однолетних и многолетних травянистых растений, перспективных для задач ускорения секвестрации атмосферного углерода, устойчивых к местным почвенно-климатическим условиям, и оценка их продуктивности. **Методы.** В статье представлены данные по продуктивности пяти видов травянистых растений: *Amaranthus caudatus* L., *Amaranthus cruentus* L., *Amaranthus hypochondriacus* L., *Polygonum weyrichii* F. Schmidt и *Echinops sphaerocephalus* L. Определены значения сырой и сухой надземной массы, а также содержание углерода. **Результаты.** Выявлено, что наиболее урожайным является *Polygonum weyrichii* F. Schmidt (горец Вейриха). Продуктивность трех исследованных видов амаранта обусловлена принадлежностью к группе растений с типом фотосинтеза C₄. Мордовник шароголовый – малоизученный вид, требующий дальнейшего изучения. Рекомендовано выращивание горца Вейриха на увлажненной территории. Амаранты, являясь засухоустойчивыми растениями, высокопродуктивны в любые годы, даже в годы со значением гидротермического коэффициента (ГТК) менее 1,0. В относительно неблагоприятных климатических условиях 2022 г. потенциальная карбоновая ферма на основе монокультуры горца Вейриха может связывать до 9,54 т/га углерода, в пересчете на углекислый газ – 34,98 CO₂/год на га, что значительно выше уровня секвестрации углекислоты большинства древесных культур. В лучших климатических условиях или при дополнительном поливе эти значения могут увеличиться в 1,5–2 раза. **Научная новизна.** Рассмотрены особенности выращивания исследованных культур не только в кормовых целях, но и с точки зрения депонирования атмосферного углерода и выращивания на потенциальных карбоновых фермах в условиях изменяющегося климата региона.

Ключевые слова: амарант, горец, мордовник, высокотравные растения, продуктивность, карбоновые фермы, секвестрация углекислоты.

Для цитирования: Артемьева Е. П., Валдайских В. В., Радченко Т. А., Карпухин М. Ю. Перспективы выращивания высокотравных растений в качестве углероддепонирующих культур // Аграрный вестник Урала. 2022. № 12 (227). С. 2–10. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10.

Дата поступления статьи: 15.11.2022, **дата рецензирования:** 25.11.2022, **дата принятия:** 30.11.2022.

Постановка проблемы (Introduction)

В рамках актуальной в настоящее время карбоновой тематики, связанной с необходимостью снижения темпов роста концентрации парниковых газов в приземном слое атмосферы, отмечен рост интереса к высокотравным растениям. Это обусловлено их высокой скоростью накопления биомассы и, как следствие, относительно быстрыми темпами секвестрации углекислоты этими растениями. Очевидно, что одну из главных ролей в секвестрации углерода играют древесные сообщества

с долговременным пулом углерода в древесине, но секвестрационная способность высокотравных травянистых культур ожидается сравнимой с таковой у древесных растений при условии решения задачи дальнейшего использования надземной биомассы. Высокотравные растения являются необходимым элементом для формирования устойчивых сообществ и должны рассматриваться как объект пристального внимания при создании карбоновых ферм.

Кроме показателей продуктивности, углерод-депонирующие функции растительной биомассы во многом связаны с качественным составом растительного сырья, прежде всего содержанием углерода и азота в биомассе.

В ботаническом саду Уральского федерального университета имени первого Президента России Б. Н. Ельцина (УрФУ) за последние 40 лет была сформирована коллекция высокотравных многолетних растений, насчитывающая 15 видов из различных семейств, большая часть из них – инорайонные виды, с которыми был проведен комплекс многолетних интродукционных мероприятий для введения их в культуру в условиях Среднего Урала [1]. Эти травянистые растения характеризуются большой надземной биомассой и продуктивным долголетием. Высокотравные растения имеют многофункциональное значение и могут быть использованы для различных целей: пищевых, кормовых, технических, лекарственных, для рекультивации промышленно загрязненных территорий, получения биотоплива, биоугля и пр. Изучение продуктивности и содержания углерода в тканях высокотравных растений позволяет оценить их секвестрационный потенциал. Вместе с тем важно знать о способности адаптации этих видов к условиям стресса.

Целью наших исследований было изучение показателей продуктивности однолетних и многолетних травянистых растений разных видов в условиях Среднего Урала.

В задачи входило:

- 1) измерение сырой и сухой надземной массы у двух видов однолетних и двух видов многолетних растений;
- 2) сравнение показателей продуктивности исследуемых видов с известными в литературе данными;
- 3) изучение концентрации углерода в биомассе растений;
- 4) на основе полученных данных выявление перспективных видов для дальнейшего подробного изучения.

Методология и методы исследования (Methods)

Работа была выполнена в ботаническом саду УрФУ, расположенном на 56°50' северной широты и 60°36' восточной долготы, 255 м высоты над уровнем моря. Растения выращивались в автоморфных условиях на хорошо дренируемых окультуренных дерново-слабоподзолистых среднесуглинистых почвах, сформированных на элювии-делювии гранитов. Почвы характеризуются относительно высоким содержанием гумуса в пахотном горизонте (5,8–7,9 %), близкой к нейтральной реакцией почвенного раствора (рН KCl от 6,0 до 6,5 с уменьшением до 4,3–4,7 в иллювиальных горизонтах), достаточно высокой обеспеченностью доступными

растениям формами калия (10,43–16,15 мг / 100 г почвы) и фосфора (19,83–21,19 мг / 100 г почвы) в пахотном горизонте.

Климатические условия характеризуются как умеренно-континентальные. По средним многолетним наблюдениям, ведущимся в ботаническом саду, период активной вегетации с температурой выше 10 °С длится около 130 дней, с температурой выше 15 °С (метеорологическое лето) в среднем составляет 77 дней.

Вегетационный период 2022 г. имел неравномерное распределение осадков, большая часть из которых выпала в начале вегетации, а также отличался температурами заметно ниже среднемноголетних в начале сезона и жаркой, засушливой погодой во второй половине вегетации. В мае и июне среднемесячные температуры были ниже среднемноголетних и составили 10,9 °С (отклонение –1,3) и 15,7 °С (отклонение –1,2). Осадков в мае выпало 73 мм (157 % от нормы), в июне – 85 мм (118 % от нормы). Во второй половине вегетационного сезона среднесуточная температура была выше нормы на 2,0–4,4 °С. Суммы осадков в июле и августе были ниже нормы и составили 11 % и 31 % от нормы соответственно. Сумма осадков в летние месяцы составила 120 мм. Недостаток влаги в почве повлиял на снижение урожайности исследованных нами высокотравных культур.

Для оценки погодных условий вегетационного периода рассчитывали гидротермический коэффициент (ГТК) по формуле Г. Т. Селянинова:

$$\text{ГТК} = \Sigma r \cdot 10 / \Sigma t,$$

где Σr – сумма осадков за период с температурами выше 10 °С (мм),

Σt – сумма среднесуточных активных температур (выше 10 °С) за вегетационный период (°С).

Этот критерий, характеризующий соотношение влаги и тепла, имеет свое оптимальное значение для каждой возделываемой культуры.

Объектами исследования были три однолетних вида амаранта из семейства *Amaranthaceae*: *Amaranthus caudatus* L. (амарант хвостатый), *A. cruentus* L. (амарант багряный) *Amaranthus hypochondriacus* L. (амарант печальный), а также два многолетних вида: горец Вейриха *Polygonum weyrichii* F. Schmidt (семейство *Polygonaceae*) и мордовник шароголовый *Echinops sphaerocephalus* L. (семейство *Asteraceae*) [2].

Семена амарантов высевали в третьей декаде мая 2022 г. во избежание повреждения всходов возвратными заморозками в первой декаде июня. Расстояние между рядами в коллекционном питомнике составляло 0,5–0,6 м. После появления всходов при необходимости проводили прореживание и прополку. Многолетние горец Вейриха и мордовник шароголовый постоянно произрастали на опытно-экспериментальных участках на протя-

жении более 20 лет благодаря естественному вегетативному размножению корневищами. С 1997 г. в ботаническом саду с ними ведется интродукционная работа, включающая в себя фенологические наблюдения, изучение роста и развития и химического состава надземной биомассы.

Измерение продуктивности и содержание углерода и азота проводили в начале сентября 2022 г. Взвешивание надземной части растений проводили на электронных весах Foodatlas BT-40C (погрешность 0,8 %). Определяли сырую массу отдельного растения (или побега) в 5–6 повторностях и сухую массу после высушивания при комнатной температуре в закрытом помещении. Так как растение горца Вейриха состоит из нескольких стеблей и сложно точно установить принадлежность отдельного стебля к растению из-за переплетенных корневищ, то мы в наших исследованиях измеряли массу отдельного стебля (побега). Также измеряли в трехкратной повторности надземную сырую массу с участков площадью 1–3 м² и пересчитывали на воздушно-сухую массу.

Для элементного анализа использовались образцы биомасс, размолотых до порошкообразного состояния. Содержание углерода в измельченных растительных образцах определяли в микронавесках 1,0–1,5 мг в двух (трех) параллельных измерениях на элементных анализаторах CHN PE 2400, с.П., (Perkin Elmer Instruments, США) и EA3000 EuroVector Instruments (Италия). Показатель точности (границы абсолютной погрешности) в пределах ± 0,30 %. Элементный анализ выполнен в Центре коллективного пользования «Спектроскопия и анализ органических соединений» группой элементного анализа Института органического синтеза УрО РАН. Статистическую обработку данных проводили в программах Excel и Statistica 13.

Результаты (Results)

В таблице 1 представлены результаты измерения урожайности надземной массы отдельных растений амаранта хвостатого, амаранта багряного, амаранта печального, мордовника шароголового и отдельных побегов горца Вейриха, а также содержание углерода в надземной части.

Измеренные в конце вегетационного сезона 2022 г. значения сырой и сухой массы надземной части исследуемых культур в пересчете на площадь представлены в таблице 2.

Амаранты являются однолетними травянистыми растениями с типом фотосинтеза C₄. Урожайность надземной зеленой массы у разных видов и сортов амаранта колеблется, некоторые сорта отличаются высокой урожайностью. В относительно неблагоприятном в климатическом отношении 2022 г. урожайность исследованных видов амарантов была невысокой и составила 23,7–31,8 т сырой массы на 1 га, или 6,0–6,7 т сухой массы на 1 га (таблица 1). При этом амаранты содержали большое количество воды – около 80 %. Известно, что стебель амаранта является резервуаром – накопителем воды [3]. Благодаря накопленной воде и регуляции водного режима с помощью устьичного аппарата растения амаранта достаточно гидростабильны.

Многолетние исследования продуктивности амаранта в ботаническом саду УрФУ показывают значительно большие показатели биомассы в благоприятные годы. Так, в 2021 г. они были на уровне значений продуктивности в других странах [4] и составили 44,1–57,3 т сырой массы на 1 га в условиях незагущенных посадок [5].

Вегетационный период амаранта до полного созревания семян составляет около 100–120 дней.

Таблица 1

Масса одного растения / побега исследуемых культур и содержание углерода

Культура	Сырая масса, г	Сухая масса, г	Содержание воды, %	Содержание углерода на сухую массу, %
<i>Amaranthus caudatus</i> L.	257,3 ± 156,9	52 ± 38,3	80,4 ± 2,8	34,38 ± 1,30
<i>Amaranthus cruentus</i> L.	252,0 ± 87,7	71 ± 24,9	71,9 ± 0,5	37,80 ± 0,43
<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	255,7 ± 50,9	54 ± 13,4	78,9 ± 1,8	39,63 ± 0,36
<i>Echinops sphaerocephalus</i> L.	188,3 ± 41,6	76 ± 15,9	59,5 ± 1,5	42,70 ± 1,03
<i>Polygonum weyrichii</i> F. Schmidt	313,7 ± 58,1	71 ± 17,0	77,6 ± 2,3	42,42 ± 0,56

Table 1

The weight of a plant / a shoot of the studied crops and carbon content

Crop	Wet weight, g	Dry weight, g	Water content, %	Carbon content from dry weight, %
<i>Amaranthus caudatus</i> L.	257.3 ± 156.9	52 ± 38.3	80.4 ± 2.8	34.38 ± 1.30
<i>Amaranthus cruentus</i> L.	252.0 ± 87.7	71 ± 24.9	71.9 ± 0.5	37.80 ± 0.43
<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	255.7 ± 50.9	54 ± 13.4	78.9 ± 1.8	39.63 ± 0.36
<i>Echinops sphaerocephalus</i> L.	188.3 ± 41.6	76 ± 15.9	59.5 ± 1.5	42.70 ± 1.03
<i>Polygonum weyrichii</i> F. Schmidt	313.7 ± 58.1	71 ± 17.0	77.6 ± 2.3	42.42 ± 0.56

Таблица 2
Продуктивность исследуемых культур

Культура	Сырая масса, т/га	Сухая масса, т/га	Углерод, т/га
<i>Amaranthus caudatus</i> L.	31,8 ± 5,0	6,2 ± 1,0	2,13
<i>Amaranthus cruentus</i> L.	23,7 ± 5,0	6,7 ± 1,4	2,53
<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	28,5 ± 4,9	6,0 ± 1,0	2,38
<i>Echinops sphaerocephalus</i> L.	55,1 ± 18,0	22,3 ± 7,3	9,52
<i>Polygonum weyrichii</i> F. Schmidt	100,3 ± 21,5	22,5 ± 4,8	9,54

Table 2
The yield of the studied crops

Crop	Fresh yield, t/ha	Dry yield, t/ha	Carbon, t/ha
<i>Amaranthus caudatus</i> L.	31.8 ± 5.0	6.2 ± 1.0	2.13
<i>Amaranthus cruentus</i> L.	23.7 ± 5.0	6.7 ± 1.4	2.53
<i>Amaranthus hypochondriacus</i> L.	28.5 ± 4.9	6.0 ± 1.0	2.38
<i>Echinops sphaerocephalus</i> L.	55.1 ± 18.0	22.3 ± 7.3	9.52
<i>Polygonum weyrichii</i> F. Schmidt	100.3 ± 21.5	22.5 ± 4.8	9.54

Амаранты требовательны к теплу и нетребовательны к увлажнению растениями [6]. Высокая продуктивность амаранта связана с тем, что в его листьях происходит особый тип фотосинтеза – C_4 [3], отличающийся от того, который идет в листьях растений нашего умеренного климата. В жарком тропическом климате при температуре 35–45 °C такие растения продолжают фотосинтезировать. Неоднократно была отмечена более высокая способность связывать углерод растениями C_4 (например, кукурузой и сорго) по сравнению с традиционными сельскохозяйственными культурами [7]. На основании анализа активности ферментов было показано, что способность к связыванию углерода у сельскохозяйственных культур C_4 намного выше, чем у растений C_3 , из-за более высокой активности фосфоенолпируваткарбоксилазы (ФЕП-карбоксилазы). Растения C_4 отличаются также иным анатомическим строением листа, позволяющим более эффективно производить обмен метаболитами. Эти и некоторые другие особенности растений C_4 позволяют им более эффективно продуцировать биомассу, прежде всего – в условиях недостатка влаги.

Ранее нами было выявлено усиление свойств C_4 амаранта, выращенного в условиях засухи, что, по нашим предположениям, может быть связано с увеличением реассимиляции CO_2 дыхательного происхождения [8]. Указанные особенности растений C_4 предопределяют повышенный интерес к ним в условиях климатических тенденций на Среднем Урале, в том числе в рамках карбоновой тематики.

Проведенные нами фенологические наблюдения показали [9], что основными лимитирующими факторами при развитии однолетних амарантов в умеренно континентальном климате являются

низкие летние температуры, избыточное увлажнение и короткое метеорологическое лето. Амарант является засухоустойчивым растением [8], [10]. Оптимальными для созревания семян амарантов считаются жаркие засушливые годы со значением ГТК менее единицы. Вегетационный период 2022 г. оказался менее благоприятным для роста и развития амарантов по сравнению с предыдущим годом [5]. В условиях ботанического сада УрФУ растения амаранта хвостатого в 2022 г. достигали средней высоты 100,5 ± 13,2 см, амаранта багряного – 124,0 ± 13,1 см, амаранта печального – 110,0 ± 7,2 см. Это значительно меньше многолетних измерений высоты разных видов амаранта в ботаническом саду. Общая листовая поверхность одного растения составила около 0,2 м² при средней площади листовой пластинки 73 см².

Ранее [5] были выявлены положительные корреляции биомассы амарантов с суммой среднесуточных температур выше 10 °C и суммой дневных максимумов. Корреляции с суммой минимальных суточных температур ($r = 0,5190$; $p = 0,019$) и значением ГТК значимы только на уровне достоверности $p < 0,05$. Корреляционные связи с суммой осадков за период вегетации амарантов статистически не значимы. Таким образом, для амарантов оптимальными являются годы с высокой температурой, к режиму увлажнения они менее требовательны.

Продуктивность исследуемых многолетних видов была стабильно высокой в годы с разными климатическими условиями. Так, например, в условиях засушливого лета 2021 г. урожайность горца Вейриха без дополнительного полива составила 152 т сырой массы на 1 га, или 36,7 т сухой массы на 1 га, что является хорошим показателем [5]. В более жаркий 2022 г. урожайность была меньше

и составила 100,3 т сырой массы на 1 га, или 22,5 т сухой массы на 1 га соответственно, что меньше среднего показателя массы за все годы наблюдений (рис. 1).

Очевидно, что высокая биомасса положительно связана с высотой растений, площадью листовой поверхности и долей листьев в биомассе. Наши наблюдения указывают, что горец отличался от других видов большей высотой (многолетние средние показатели $208,0 \pm 8,79$ см), характеризуется высокой ассимилирующей поверхностью листьев – доля листьев в биомассе составляет 30 %, площадь листовой поверхности – $5,6 \text{ м}^2$ на особь, или $41,6 \text{ м}^2$ на 1 м^2 поверхности.

Важно отметить, что стабильно высокую урожайность горец Вейриха, будучи многолетним растением, дает лишь спустя годы после посадки: в немногочисленных литературных источниках [11], [12] показано, что урожайность зеленой массы горца в первый год может составлять около 30 т/га, в последующие достигая значения 80 т/га и выше. Это многолетнее зимостойкое травянистое растение отличается ранним началом вегетации и

быстрым ростом. В условиях ботанического сада УрФУ начало отрастания побегов горца вейриха приходится уже на вторую декаду мая. Окончание вегетации горца, как правило, вынужденное, после осенних заморозков. Семена вызревают редко, но недостаточность семенного размножения компенсируется вегетативным. Зеленая масса богата протеином, витаминами, минеральными веществами.

Средняя сырая масса одного растения мордовника шароголового в конце вегетационного сезона 2022 г. составила $188,3 \pm 41,6$ г, что меньше массы побега горца, но при этом его воздушно-сухая масса была выше. Содержание воды в надземной массе мордовника составило всего 59,5 % в 2022 г.: это наименьшие показатели влажности из всех исследуемых нами травянистых растений. В сравнении с горцем Вейриха мордовник шароголовый характеризовался более низкой продуктивностью сырой надземной массы, однако по сухой фитомассе виды не отличались. Это можно объяснить низкой обводненностью тканей мордовника – 60 %. Высота мордовника была сопоставима с высотой горца Вейриха и составила 209 ± 16 см.

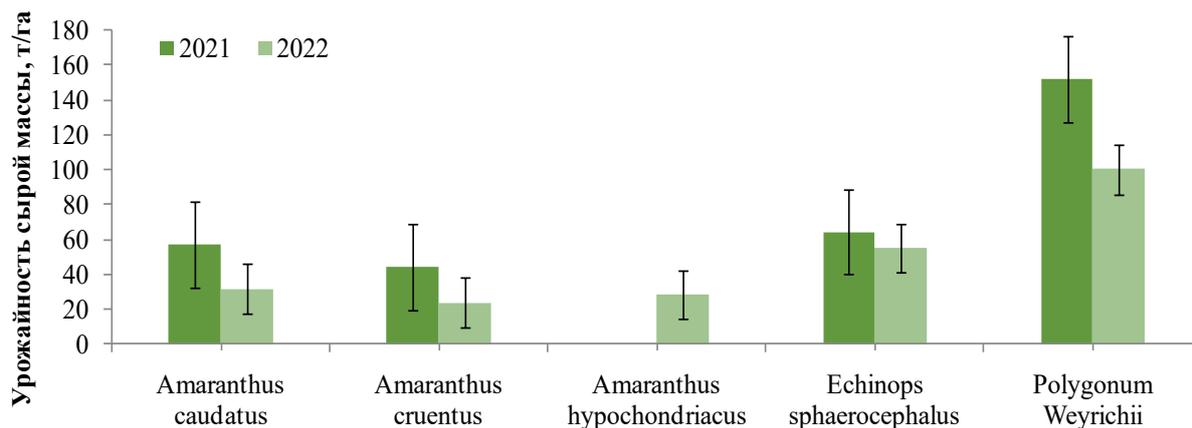


Рис. 1. Урожайность исследуемых культур в 2021–2022 гг.
Примечание: измерение урожайности *A. hypochondriacus* в 2021 г. не проводилось

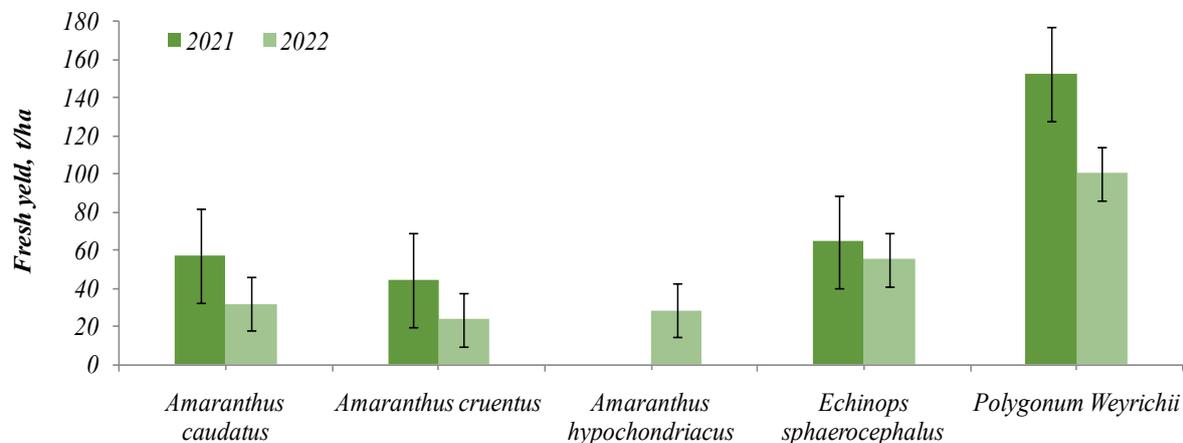


Fig 1. Fresh yield of the studied crops in 2021–2022.
Note: a yield measurement of *A. hypochondriacus* was not performed in 2021

Все исследуемые виды сильно различались по содержанию углерода в фитомассе: наименьшие значения обнаружены у амарантов, а самые высокие – у мордовника и горца. Отличительной чертой биомассы горца было достаточно высокое содержание углерода – 42,42 % наряду с высокой обводненностью тканей – 78 %. Судя по этим показателям, основную часть растения составляли механические, проводящие, покровные и обводненные ткани, что, как правило, отрицательно связано с интенсивностью фотосинтеза. Это объясняет достаточно низкую сухую биомассу. Такой набор признаков у горца может характеризовать его как вид, наиболее чувствительный к недостатку влаги. Показано, что для прорастания семян горца Вейриха требуется 60–70 % воды от массы сухого семени [11]. Ранее нами были выявлены положительные корреляции продуктивности с суммой осадков и значением ГТК и отрицательные с суммой положительных температур [5].

Мордовник шароголовый и горец Вейриха практически не отличались по содержанию углерода в надземной массе (таблица 1), что может быть связано с низкой долей фотосинтетических тканей. Это может являться причиной низкой скорости фотосинтеза, что ограничивает скорость роста. В то же время преобладание нефотосинтетических тканей и низкая обводненность тканей мордовника шароголового могут характеризовать этот вид как более устойчивый к дефициту влаги.

Обсуждение и выводы (Discussion and Conclusion)

Таким образом, сопоставление урожайности разных видов высокотравных растений в условиях интродукции в ботаническом саду УрФУ позволило нам выделить горец Вейриха, отличающийся высокой кормовой продуктивностью. Введение его в культуру может быть высокоэффективным, особенно в условиях повышенного увлажнения. По биохимическому составу и питательности горец Вейриха не уступает многим традиционным сельскохозяйственным культурам. При этом он отличается высокой урожайностью, низкой себестоимостью выращивания, в естественных условиях растет на различных почвах.

Особенно актуальным представляется его использование в качестве углероддепонирующей культуры. Согласно нашим исследованиям, даже в относительно неблагоприятных погодных условиях 2022 г. потенциальная карбоновая ферма на основе монокультуры горца Вейриха может

связывать 9,54 т/га углерода, что в пересчете на углекислый газ составляет 34,98 т CO₂/год на 1 га (в условиях 2021 г. эти значения составили 15,6 т/га углерода, или 57,2 т CO₂/год на 1 га) – это значительно выше уровня секвестрации углекислоты большинства древесных культур при тех же условиях. Естественно, для целей секвестрации атмосферного углерода должно быть предусмотрено дальнейшее использование полученной зеленой массы. В некоторых странах уже ведутся разработки по использованию горца Вейриха для получения биотоплива [13].

Известно, что видовое разнообразие положительно сказывается на связывании углерода в сельскохозяйственных угодьях [14]. В некоторых странах уже разрабатываются проекты адаптивной посадки зеленых насаждений с целью более его более эффективного депонирования, в том числе в сочетании с древесными культурами [15].

При формировании устойчивых экосистем посев и высадка травянистых растений является первым шагом, обеспечивающим формирование гумусового слоя почвы и дальнейшее успешное произрастание деревьев и кустарников. Высокотравные растения, устойчивые к биотическим и абиотическим факторам окружающей среды, играют роль пионерных видов и способствуют устойчивости экосистем.

Предлагаемые многолетние и однолетние высокотравные культуры могут быть взаимодополняемы и взаимозаменяемы в условиях все более неустойчивого континентального климата, характеризующегося сменой влажных и сухих, холодных и теплых вегетационных периодов. Такие растения получают конкурентные преимущества при изменении климата и увеличении концентрации углекислого газа в приземном слое атмосферы [16]. Они могут быть использованы как в агрофитоценозах, так и при рекультивации нарушенных территорий. Для ускорения связывания атмосферного углерода и его депонирования в надземной массе представляется перспективным введение в травосмеси однолетних растений с типом фотосинтеза C₄.

Благодарности (Acknowledgements)

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, тема Государственного задания FEUZ-2021-0014.

Библиографический список

1. Okoneshnikova T. F., Stephanovich G. S., Valdayskikh V. V., Rymar V. P., Mikhlishchev R. V., Paltusova M. V. Introduction of new plant species for the practical uses in the Middle Urals // AIP Conference Proceedings. Ekaterinburg, 2022. Vol. 2390. Iss. 1. Article number 030068. DOI: 10.1063/5.0069400.
2. WFO (2022): World Flora Online [e-resource]. URL: <http://www.worldfloraonline.org> (date of reference: 05.11.2022).

3. Гасимова Г. А., Дегтярева И. А. Эколого-физиологические особенности фитомассы амаранта при интродукции в Республике Татарстан // Ученые записки Казанской государственной академии ветеринарной медицины им. Н. Э. Баумана. 2020. Т. 241. № 1. С. 58–61. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-241-1-58-61.
4. Paredes-López O. Amaranth biology, chemistry, and technology [e-resource]. CRC Press, 2018. 223 p. URL: <http://www.tandfebooks.com/doi/book/10.1201/9781351069601>. DOI: 10.1201/9781351069601 (date of reference: 05.11.2022).
5. Valdayskikh V. V., Artemyeva E. P., Karpukhin M. Yu., Mikhailishchev R. V. Comparative yield of large-herb plants when grown in the Middle Urals [e-resource] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2021. 11 (214). Pp. 2–7. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-214-11-2-7.
6. Dmitrieva O., Ivanov S. Comparative study of amaranth species (*Amaranthus* ssp.) in the temperate continental climate of Russian Federation // Acta agriculturae Slovenica. 2020. No. 115/1. Pp. 15–24. DOI: 10.14720/aas.2020.115.1.1281.
7. Li T. X., Zhang F., Jiao Y. Y., Zhang M. J., Chang Y. H., Matomela N. Study on carbon sequestration capacity of typical crops in Northern China // Journal of Plant Biology. 2019. No. 62 (3). Pp. 195–202. DOI: 10.1007/s12374-018-0401-3.
8. Valdayskikh V. V., Voronin P. Yu., Artemyeva E. P., Rymar V. P. Amaranth responses to experimental soil drought // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2063. Article number 030023. DOI: 10.1063/1.5087331.
9. Artemyeva E. P., Valdayskikh V. V., Radchenko T. A., Belyaeva P. A. *Amaranthus* phenology during its introduction in the Middle Urals // AIP Conference Proceedings. 2019. Vol. 2063. Article number 030002. DOI: 10.1063/1.5087310.
10. Assad R., Reshi Z. A., Jan S., Rashid I. Biology of Amaranths // Botanical Review. 2017. No. 83 (4). Pp. 382–436. DOI: 10.1007/s12229-017-9194-1.
11. Ефремов В. В. Продуктивность горца Вейриха в полевом кормопроизводстве // Актуальные вопросы совершенствования технологии производства и переработки продукции сельского хозяйства. 2018. № 20. С. 30–32.
12. Chupina M. P., Stepanov A. F. Assessment of photosynthetic productivity of new perennial forage crops in forest-steppe conditions of Western Siberia // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 624. Article number 012121. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012121.
13. Kurhak V. H., Tkachenko M. A., Asanishvili N. M., Moisiienko V. V., Holodna A. V., Tkachenko A. M., Slyusar S. M., Ptashnik M. M., Kolomiets L. P., Tsybmal Ya. S., Oksymets O. L., Kulyk R. M., Panchyshyn V. Z., Stotska S. V., Sladkovska T. A. Energy productivity of uncommon herbs for solid fuel manufacturing // Ukrainian Journal of Ecology. 2021. No. 11 (1). Pp. 299–305. DOI: 10.15421/2021_45.
14. Wang C., Tang Y. J., Li X. N., Zhang W. W., Zhao C. Q., Li C. Negative impacts of plant diversity loss on carbon sequestration exacerbate over time in grasslands // Environmental Research Letters. 2020. No. 15 (10). Article number 104055. DOI: 10.1088/1748-9326/abaf88.
15. Wang Y. N., Chang Q., Li X. Y. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing // Urban Forestry & Urban Greening. 2021. Vol. 64. Article number 127291. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127291.
16. Korres N. E., Dayan F. Effects of climate change on crops and weeds: The need for climate-smart adaptation paradigm // Outlooks on Pest Management. 2020. Vol. 31 (5). Pp. 210–215. DOI: 10.1564/v31_oct_04.

Об авторах:

Елена Петровна Артемьева^{1, 2}, кандидат биологических наук, ведущий инженер ботанического сада¹, доцент кафедры «Естественнонаучные дисциплины»², ORCID 0000-0003-0937-460X, AuthorID 262616; +7 912 226-19-80, epartemyeva@urfu.ru

Виктор Владимирович Валдайских¹, кандидат биологических наук, директор ботанического сада, ORCID 0000-0001-9440-8522, AuthorID 142640; +7 912 277-07-22, v_vald@mail.ru

Татьяна Александровна Радченко¹, кандидат биологических наук, директор департамента наук о Земле и космосе, ORCID 0000-0003-4135-2902, AuthorID 148570; +7 953 044-25-62, tatiana.radchenko@urfu.ru

Михаил Юрьевич Карпукhin³, кандидат сельскохозяйственных наук, проректор по научной работе и инновациям, ORCID 0000-0002-8009-9121, AuthorID 339196; +7 912 253-04-13, mkarpukhin@yandex.ru

¹ Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

² Уральский государственный университет путей сообщения, Екатеринбург, Россия

³ Уральский государственный аграрный университет, Екатеринбург, Россия

The prospects of growing large-herb plants as carbon-depositing crops

E. P. Artemyeva^{1,2}, V. V. Valdayskikh¹✉, T. A. Radchenko¹, M. Yu. Karpukhin³

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

³Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia

✉E-mail: v_vald@mail.ru

Abstract. The purpose of the research is to study of yield some annual and perennial plant species which were grown in the botanical garden of the Ural Federal University. Plant species with high productivity, resistant to local soil and climatic conditions and promising for carbon sequestration have been identified. **Methods.** The article presents data of fresh and dry yield, carbon content of five species *Amaranthus caudatus* L., *Amaranthus cruentus* L., *Amaranthus hypochondriacus* L., *Polygonum weyrichii* F. Schmidt, *Echinops sphaerocephalus* L. The yield of these crops was measured in the conditions of the Middle Urals. **Results.** The plants *P. weyrichii* had the highest yield. The yield of three amaranth species was due to the C₄ photosynthesis. Amaranths, being drought-resistant plants, are highly productive even in years with a hydrothermal coefficient value of less than 1.0. The plants *E. sphaerocephalus* is a poorly studied species that requires further study. They can be also used to deposit atmospheric carbon and grow on potential carbon farms in the changing climate of the region. In not very favorable climatic conditions in 2022, a potential carbon farm based on the monoculture of the plants *P. weyrichii* can bind up to 9.54 t/ha of carbon, in terms of carbon dioxide – 34.98 CO₂/year per 1 ha. It is significantly higher than the level of sequestration of carbon dioxide of most trees. These values can increase by 1.5–2 times in the best climatic conditions or with additional watering. **The scientific novelty** lies in the fact that these plants can be used not only for fodder purposes, but also for atmospheric carbon deposition in the changing climate of region.

Keywords: amaranth, *Echinops sphaerocephalus*, *Polygonum weyrichii*, large-herb plants, yield, carbon farms, carbon sequestration.

For citation: Artemyeva E. P., Valdayskikh V. V., Radchenko T. A., Karpukhin M. Yu. Perspektivy vyrashchivaniya vysokotravnnykh rasteniy v kachestve ugleroddeponiruyushchikh kul'tur [The prospects of growing large-herb plants as carbon-depositing crops] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2022. No. 12 (227). Pp. 2–10. DOI: 10.32417/1997-4868-2022-227-12-2-10. (In Russian.)

Date of paper submission: 15.11.2022, **date of review:** 25.11.2022, **date of acceptance:** 30.11.2022.

References

1. Okoneshnikova T. F., Stepanovich G. S., Valdayskikh V. V., Rymar V. P., Mikhailishchev R. V., Paltusova M. V. Introduction of new plant species for the practical uses in the Middle Urals // AIP Conference Proceedings. Ekaterinburg, 2022. Vol. 2390. Iss. 1. Article number 030068. DOI: 10.1063/5.0069400.
2. WFO (2022): World Flora Online [e-resource]. URL: <http://www.worldfloraonline.org> (date of reference: 05.11.2022).
3. Gasimova G. A., Degtyareva I. A. Ekologo-fiziologicheskie osobennosti fitomassy amaranta pri introduktsii v Respublike Tatarstan [Ecological and physiological properties of amaranth phytomass during introduction in the Republic of Tatarstan] // Academic notes of Kazan State Academy of Veterinary Medicine named after N. Bauman. 2020. No. 241 (1). Pp. 58–61. DOI: 10.31588/2413-4201-1883-241-1-58-61. (In Russian.)
4. Paredes-López O. Amaranth biology, chemistry, and technology [e-resource]. CRC Press, 2018. 223 p. URL: <http://www.tandfebooks.com/doi/book/10.1201/9781351069601>. DOI: 10.1201/9781351069601 (date of reference: 05.11.2022).
5. Valdayskikh V. V., Artemyeva E. P., Karpukhin M. Yu., Mikhailishchev R. V. Comparative yield of large-herb plants when grown in the Middle Urals [e-resource] // Agrarian Bulletin of the Urals. 2021. 11 (214). Pp. 2–7. DOI: 10.32417/1997-4868-2021-214-11-2-7.
6. Dmitrieva O., Ivanov S. Comparative study of amaranth species (*Amaranthus* ssp.) in the temperate continental climate of Russian Federation // Acta agriculturae Slovenica. 2020. No. 115/1. Pp. 15–24. DOI: 10.14720/aas.2020.115.1.1281.

7. Li T. X., Zhang F., Jiao Y. Y., Zhang M. J., Chang Y. H., Matomela N. Study on carbon sequestration capacity of typical crops in Northern China // *Journal of Plant Biology*. 2019. No. 62 (3). Pp. 195–202. DOI: 10.1007/s12374-018-0401-3.
8. Valdayskikh V. V., Voronin P. Yu., Artemyeva E. P., Rymar V. P. Amaranth responses to experimental soil drought // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2063. Article number 030023. DOI: 10.1063/1.5087331.
9. Artemyeva E. P., Valdayskikh V. V., Radchenko T. A., Belyaeva P. A. *Amaranthus* phenology during its introduction in the Middle Urals // *AIP Conference Proceedings*. 2019. Vol. 2063. Article number 030002. DOI: 10.1063/1.5087310.
10. Assad R., Reshi Z. A., Jan S., Rashid I. Biology of Amaranths // *Botanical Review*. 2017. No. 83 (4). Pp. 382–436. DOI: 10.1007/s12229-017-9194-1.
11. Efremov V. V. Produktivnost' gortsa Veyrikha v polevom kormoproizvodstve [Productivity of the Polygonum weyrichii in field forage production] // *Aktual'nyye voprosy sovershenstvovaniya tekhnologii proizvodstva i pererabotki produktsii sel'skogo khozyaystva*. 2018. No. 20. Pp. 30–32. (In Russian.)
12. Chupina M. P., Stepanov A. F. Assessment of photosynthetic productivity of new perennial forage crops in forest-steppe conditions of Western Siberia // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol. 624. Article number 012121. DOI: 10.1088/1755-1315/624/1/012121.
13. Kurhak V. H., Tkachenko M. A., Asanishvili N. M., Moisiienko V. V., Holodna A. V., Tkachenko A. M., Slyusar S. M., Ptashnik M. M., Kolomiets L. P., Tymbal Ya. S., Oksymets O. L., Kulyk R. M., Panchyshyn V. Z., Stotska S. V., Sladkovska T. A. Energy productivity of uncommon herbs for solid fuel manufacturing // *Ukrainian Journal of Ecology*. 2021. No. 11 (1). Pp. 299–305. DOI: 10.15421/2021_45.
14. Wang C., Tang Y. J., Li X. N., Zhang W. W., Zhao C. Q., Li C. Negative impacts of plant diversity loss on carbon sequestration exacerbate over time in grasslands // *Environmental Research Letters*. 2020. No. 15 (10). Article number 104055. DOI: 10.1088/1748-9326/abaf88.
15. Wang Y. N., Chang Q., Li X. Y. Promoting sustainable carbon sequestration of plants in urban greenspace by planting design: A case study in parks of Beijing // *Urban Forestry & Urban Greening*. 2021. Vol. 64. Article number 127291. DOI: 10.1016/j.ufug.2021.127291.
16. Korres N. E., Dayan F. Effects of climate change on crops and weeds: The need for climate-smart adaptation paradigm // *Outlooks on Pest Management*. 2020. Vol. 31 (5). Pp. 210–215. DOI: 10.1564/v31_oct_04.

Authors' information:

Elena P. Artemyeva^{1,2}, candidate of biological sciences, lead engineer of the botanical garden¹, associate professor of Natural Sciences Department², ORCID 0000-0003-0937-460X, AuthorID 262616; +7 912 226-19-80, epartemyeva@urfu.ru

Viktor V. Valdayskikh¹, candidate of biological sciences, director of the botanical garden, ORCID 0000-0001-9440-8522, AuthorID 142640; +7 912 277-07-22, v_vald@mail.ru

Tatyana A. Radchenko¹, candidate of biological sciences, director of department of earth and space sciences, ORCID 0000-0003-4135-2902, AuthorID 148570; +7 953 044-25-62, tatiana.radchenko@urfu.ru

Mikhail Yu. Karpukhin³, candidate of agricultural sciences, vice rector for scientific work and innovations, ORCID 0000-0002-8009-9121, AuthorID 339196; +7 912 253-04-13, mkarpuhin@yandex.ru

¹Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

²Ural State University of Railway Transport, Ekaterinburg, Russia

³Ural State Agrarian University, Ekaterinburg, Russia