

ФОТОСИНТЕТИЧЕСКАЯ ПРОДУКТИВНОСТЬ ИСКУССТВЕННО СОЗДАННЫХ ФИТОЦЕНОЗОВ С ПРИМЕНЕНИЕМ ОСАДКА СТОЧНЫХ ВОД

Н.Ю. Шмакова, Л.А. Иванова, О.В. Ермолаева,

*Полярно-альпийский ботанический сад-институт им. Н.А. Аврорина КНЦ РАН (ПАБСИ КНЦ РАН),
Кировск, Россия;*

А.В. Лусис,

Общество с ограниченной ответственностью «Эвобласт», Москва, Россия

Аннотация: Представлены результаты исследований по применению осадка сточных вод (ОСВ) в качестве нетрадиционного химического мелиоранта для формирования противозерозионного растительного покрова на песчаных карьерах техногенного происхождения. Изучено два варианта нанесения ОСВ на поверхность техногрунта: фрагментарно слоем 2-3 см; со сплошным слоем 5-10 см. В опытных вариантах с ОСВ показатели биологической продуктивности на 4-й год жизнедеятельности по сравнению с контрольным были больше: высота растений — в 3,5-4,5 раза; запасы надземной фитомассы — в 29 и 56 раз. Показано, что ОСВ длительной выдержки, прошедший процессы гумификации и выщелачивания, может рассматриваться как перспективный и дешевый мелиорант, пригодный для повышения плодородия песчаного техногрунта и создания на них высокопродуктивных устойчивых фитоценозов. Для оценки степени влияния ОСВ на состояние искусственно созданных фитоценозов выбрали доминирующий вид многолетних злаков овсяницу красную (*Festuca rubra* L.). Эффективность работы фотосинтетического аппарата (ФА) этого вида оценивали по таким информативным показателям, как содержание пигментов пластид, интенсивность фотосинтеза, хлорофилльный индекс. Выяснено, что наибольшие абсолютные показатели надземной фитомассы и содержания хлорофиллов характерны для растений в опытном варианте со сплошным нанесением ОСВ. Однако, расчетные показатели эффективности работы ФА показали, что продуктивность работы единицы хлорофилла выше в варианте с фрагментарным нанесением ОСВ. Максимальные значения показателей работы ФА овсяницы красной в опытных вариантах отмечены в первой половине вегетации, в конце сезона из-за сильной загущенности покрова и изменения светового режима, отметили резкое снижение интенсивности работы ассимилирующих органов. Таким образом, состояние искусственно созданных устойчивых фитоценозов на основе оценки фотосинтетической продуктивности подтверждает наибольшую перспективность использования фрагментарного внесения ОСВ при проведении восстановительных мероприятий.

Ключевые слова: осадок сточных вод, песчаный карьер, мелиорант, фотосинтетическая продуктивность, пигменты пластид, фотосинтез, хлорофилльный индекс, *Festuca rubra* L.

PHOTOSYNTHETIC PRODUCTIVITY OF ARTIFICIALLY CREATED PHYTOCOENOSIS USING SEWAGE SLUDGE

N.Ju. Shmakova, L.A. Ivanova, O.V. Ermolaeva,

N.A. Avrorin Polar Alpine Botanical Garden Institute, Kirovsk, Russia;

A.V. Lusic,

Environment and Security (SHES) specialist limited liability company «Evoblast», Moscow, Russia

Abstract: The results of studies on the use of sewage sludge (SS) as an unconventional chemical meliorant for the formation of anti-erosion vegetation cover on sand pits of technogenic origin are presented. Two variants of applying SS on the surface of the technogruut were studied: 1 — fragmentally with a layer of 2-3 cm, 2 — with a continuous layer of 5-10 cm. In experimental variants with SS, the indicators of biological productivity for the 4th year of life were greater than in the control: plant height — by 3,5-4,5 times; reserves of above-ground phytomass — by 29 and 56 times. It is shown that long-term SS, which has undergone the processes of humification and leaching, is a promising and inexpensive meliorant suitable for increasing the fertility of sandy industrial soil and creating highly productive stable phytocenoses on them. *Festuca rubra* L. (the dominant species of perennial grasses) was chosen to assess the degree of SS influence on the state of artificially created phytocenoses. The efficiency of the photosynthetic apparatus (FA) of this species was estimated by the following informative indicators: the content of plastid pigments, the intensity of photosynthesis, and the chlorophyll index. It was revealed that the highest absolute indicators of aboveground phytomass and chlorophyll content are typical for plants in the experimen-

tal variant with continuous application of SS. However, the calculated indicators of the efficiency of the FA showed that the productivity of the chlorophyll unit is higher in the experimental variant with fragmentary application of SS. The maximum values of the FA performance indicators of *Festuca rubra* in the experimental variants were noted in the first half of the growing season. At the end of the season, due to the strong thickening of the cover and changes in the light regime, a sharp decrease in the photosynthetic activity of assimilating organs was noted.

Thus, the state of artificially created stable phytocenoses, based on the estimate of photosynthetic productivity, confirms the most promising use of fragmentary application of SS during restoration activities.

Keywords: sewage sludge, sand pit, meliorant, photosynthetic productivity, plastid pigments, photosynthesis, chlorophyll index, *Festuca rubra* L.

Активная эксплуатация месторождений полезных ископаемых в Мурманской области способствовала формированию на ее территории большого количества карьерных выработок и крупнейших техногенных массивов класса хвостовых отвалов с пылящими песчаными техногрунтами. Все они причислены к малопродуктивным угодьям, требующим проведения восстановительных биорекультивационных мероприятий. При формировании растительного покрова на песчаном грунте одним из определяющих факторов является питательный режим его поверхностного слоя. Бесструктурность такого субстрата, низкая водоудерживающая способность, отсутствие в нем органического вещества биогенного происхождения (гумуса) и низкая обеспеченность питательными веществами — причины неизбежности ежегодных инвестиций в дорогостоящие минеральные удобрения [1]. Положительную роль в решении проблемы низкого NPK-статуса песчаных грунтов, создания на них устойчивого растительного покрова может сыграть использование осадка сточных вод (ОСВ) местного предприятия водопроводно-канализационного хозяйства (ВКХ) «Апатитыводоканал» [2-4]. Благодаря наличию в коммунальных стоках органического вещества, легкодоступного для микробиоты, а также лабильности азота, фосфора и калия [2, 5], обуславливающих их быструю ассимиляцию растениями, применение такого мелиоранта (ОСВ) способно повысить питательный статус малопродуктивных грунтов и при этом сэкономить на использовании минеральных удобрений до 600-1000 рублей на 1 га [6-8]. Рекультивационные работы с использованием ОСВ — один из рациональных путей решения проблемы улучшения качества техногрунтов для создания искусственных фитоценозов и одновременной утилизации этих отходов. Это особенно актуально в настоящее время, когда на поля вносится в среднем менее 2 т/га органических удобрений и повсеместно отмечается отрицательный баланс по органическому веществу почвы [7, 8]. Осадки сточных вод следует использовать только для удобрения растений непродуктивного назначения (газоны, цветники, питомники и др.). В Арктической зоне России изучение влияния продуктов переработки коммунальных стоков на рост и развитие искусственно создаваемых пылеподавляющих фитоценозов без традиционного землевания актуально и может сыграть положительную роль в решении проблемы их низкой продуктивности.

Цель исследования: оценка состояния искусственно созданных фитоценозов на песчаных карьерах с применением осадков сточных вод регионального ВКХ АО «Апатитыводоканал» по параметрам фотосинтетического аппарата доминантного вида-рекультиванта (*Festuca rubra*).

Объекты и методы исследования

Исследования выполнены в период с 07.10.2017 по 20.08.2021 г. в Мурманской области (Кольский полуостров) на локальной нарушенной территории — песчаном карьере АО «Апатитыводоканал» по добыче строительных материалов, глубина которого варьирует от 3 до 5 м. Экспериментальный участок на песчаном карьере представлял собой пологий (уклон 30°) склон северо-западной экспозиции площадью 200 м², свободный от растительности, с предварительно проведенным на нем выполаживанием, террасированием и планировкой поверхности. Землевание и внесение минеральных удобрений на данном участке не проводилось.

Отходы регионального предприятия водопроводно-канализационного хозяйства АО «Апатитыводоканал» (ОСВ), примененные в качестве мелиоранта для повышения биогенности грунта, представляют собой увлажненную пластилинообразную массу черно-коричневого цвета с резким специфическим запахом. Основным способом обработки ОСВ на очистных сооружениях является подсушка и выдержка на иловых площадках на естественном основании в течение трех и более лет. По данным АО «Апатитыводоканал» контрольный образец ОСВ относится к отходу V класса опасности и полностью соответствует требованиям ГОСТ Р 54534-2011, предъявляемым к ОСВ при его использовании в качестве почвогрунтов для биологической рекультивации [5].

Схема полевого опыта включала 3 варианта, каждый выполнялся в 6 повторностях. На модельном участке было заложено 18 экспериментальных делянок, каждая размером 1×1 м, расположенных через 0,5 м друг от друга. Варианты полевого опыта: К — контрольный (без использования ОСВ с посевом семян по поверхности грунта); 1опытный вариант — ОСВ нанесен фрагментарно слоем высотой 2-3 см с посевом семян по поверхности грунта под слой ОСВ; 2 опытный вариант — ОСВ нанесен сплошным слоем высотой 5-10 см с посевом семян поверх слоя ОСВ.

Посевной фитоценоз формировался с помощью подзимнего способа прямого посева травосмеси, разработанной на основании биологических характеристик видов многолетних травянистых растений. Она включала 3 вида злаков — овсяницу красную (*Festuca rubra* L.), волоснец песчаный (*Leymus arenarius* Hochst.), пырей ползучий (*Elymus repens* (L.) Gould), и 2 вида бобовых растений — люпин многолистный (*Lupinus polyphyllus* Lindl.), копеечник альпийский (*Hedysarum alpinum* L.), взятые в соотношении 5:1:1:0.1:0.1 (по объему). Норма высева семян составляла 27,5 г/м².

Влияние мелиоранта на качество создаваемых фитоценозов оценивалось по высоте растений в травостое (см), проек-

тивному покрытию (%) на делянках, в конце вегетационного сезона по мощности дернины (см), плотности травостоя (количество побегов на 1 м²) и запасу надземной фитомассы (г сухой массы на 1 м²). Измерения биометрических показателей проводили одновременно во всех повторностях, не менее 10 замеров высоты растений в каждой из них.

В качестве информативных показателей эффективности работы фотосинтетического аппарата при воздействии ОСВ на рост и продуктивность растений использовали содержание пигментов пластид и интенсивность фотосинтеза. Концентрацию пигментов пластид определяли на спектрофотометре UV-1800 (Shimadzu, Япония) в спиртовой вытяжке по оптической плотности в максимумах поглощения при длинах волн 665 и 649 нм для хлорофиллов *a* и *b*, при 470 нм для каротиноидов [9]. Интенсивность фотосинтеза определяли в открытой системе с помощью инфракрасного газоанализатора LI-COR-850 (LI-COR, США). Пробы листьев овсяницы красной отбирали в 3-кратной биологической и 2-кратной лабораторной повторностях в каждом варианте опыта. Содержание абсолютно сухого вещества в листьях определяли высушиванием при 105°C.

Изучение физиологических показателей проведено на овсянице красной, как доминирующем виде искусственно созданных фитоценозов. Овсяница красная (*Festuca rubra* L.) — широко распространенный многолетний низовой злак озимого типа является хорошим пастбищным растением. Встречается в разнообразных климатических и почвенных условиях на заливных низинных суходольных лугах в разреженных лесах до верхнего горного пояса европейской части. Может использоваться в посевах, как в Заполярье, так и в лесной и лесостепной зонах. Овсяница красная стоит на первом месте по способности к задержанию и восстановлению структуры почвы; считается лучшей культурой для проведения биологической рекультивации отвалов и фитомелиорации других техногенных земель без нанесения почвенного слоя при обязательном повышении плодородия субстрата [10].

Статистическая обработка данных проведена с использованием стандартных пакетов программы Microsoft Excel. Для оценки достоверности различий использовали *t*-критерий Стьюдента. Статистически значимыми считали различия при $p < 0,05$, высокий уровень значимости различий — при $p < 0,001$.

Результаты и обсуждение

Продуктивность искусственно созданных фитоценозов.

Появление первых всходов посеянных растений в эксперименте было зафиксировано во всех трех вариантах одновременно сразу после схода снежного покрова в мае 2018 г. Стимулирующее действие ОСВ на прорастание семян заметно по качественным и густым всходам, которые получены именно на опытных делянках. Однако прорастание семян происходило в большей степени по трещинам, где дольше задерживалась влага. В конце первого вегетационного сезона на всех площадках сформировались примитивные фитоценозы с разным проективным покрытием: на делянках со сплошным нанесением ОСВ и верховым посевом травосмеси (вариант 2) оно составило 100%, при фрагментарном нанесении (вариант 1) — 87%, на контрольных — разреженный травостой (не более 15%). На контрольных площадках растения находились только в фазе вегетации, высота овся-

ницы красной составила в среднем 8,1 см; листья имели желто-красный оттенок, что свидетельствует о недостатке элементов питания, прежде всего азота и фосфора. В опытных вариантах наблюдали густой, хорошо развитый травостой ярко-зеленого цвета, растения находились в фазах вегетации и цветения, высота особей была в 3,5–4,5 раза больше, чем в контроле.

В конце трехлетнего эксперимента на опытных площадках с применением ОСВ были сформированы сообщества растений, обладающих интенсивным ростом и развитием, листья и стебли имели ярко зеленый цвет и блестящую поверхность. Высота растений на них в 6 раз превосходила образцы на контрольных площадках. Высокое проективное покрытие (100 %) и плотность травостоя (в 1,7–4,4 раза больше контроля) в вариантах с применением ОСВ обусловили и существенное для северо-запада РФ накопление биомассы [11]. Надземная фитомасса овсяницы красной в контроле не превышала 100,7±3,2 г/м² (1 т/га), а на опытных делянках она была больше в 29 и 56 раз.

Общее число видов на искусственно созданном фитоценозе (с учетом входящих в основной посевной состав) в 2020 году увеличилось до 21, у семи из них наблюдался полный цикл развития. Это дает возможность считать искусственно созданное растительное сообщество как экологически устойчивое, имеющее перспективы к самостоятельному существованию.

В конце четвертого сезона исследований (2021 г.) различия между опытными площадками и контролем сохранились: высота растений овсяницы красной в контроле была ниже, чем в опытных вариантах в 3,5 и 4,8 раза (вариант 2). Запасы надземной фитомассы в августе 2021 года на опытных площадках были в 8–14 раз больше, чем в контроле (табл. 1).

Если принять в среднем продолжительность вегетационного периода 80 дней (от отрастания до укоса зеленой массы), то наибольший среднесуточный прирост фитомассы оказался в варианте со сплошным покрытием делянок ОСВ, что в 14 раз эффективнее, чем на контрольных площадках (табл. 1).

Таблица 1 / Table 1

Морфологические характеристики *Festuca rubra* в искусственно созданных фитоценозах на четвертый сезон вегетации / Morphological characteristics of *Festuca rubra* in artificially created phytocenoses for the fourth growing season.

Показатель / Indices	Вариант / Variant		
	Контроль / Control	1	2
Высота растений, см / Plant height, cm	16,20±0,50	56,33±1,40	77,50±1,50
Надземная фитомасса, г/м ² / Aboveground phytomass, g/m ²	203,0±56,0	1674,5±230,5	2877,5±235,5
Среднесуточный прирост фитомассы, г сухой массы/м ² сут. / Average daily growth of phytomass, g dry weight/m ² day	2,5	20,9	36,0

Примечание. 1 - вариант с фрагментарным нанесением ОСВ, 2 - вариант с нанесением ОСВ сплошным слоем.
Note. 1 - Variant with fragmentary application of sewage sludge, 2 - variant with application of sewage sludge in a continuous layer.

Таким образом, показано, что ОСВ способствует интенсивному росту растений, улучшению качества посевных фитоценозов, может сыграть положительную роль в решении проблемы низкой продуктивности песчаных техногрунтов, независимо от способов нанесения.

Фотосинтетическая активность и содержание пигментов пластид

Одним из наиболее важных показателей, дающих представление об особенностях протекания процесса фотосинтеза в посевах и потенциальных возможностях продуктивности растений, является эффективность работы фотосинтетического аппарата. Представление о развитии фотосинтетического аппарата дают данные о содержании пигментов пластид, которые используют как показатель потенциальных возможностей фотосинтетического аппарата [12].

На четвертый сезон жизнедеятельности созданных фитоценозов оценили влияние ОСВ на показатели работы фотосинтетического аппарата овсяницы красной, как доминирующего вида искусственных фитоценозов, созданных на песчаных техногрунтах. Первое, что обращает на себя внимание, это содержание сухого вещества в ассимилирующих органах. Максимальная оводненность листьев (68-75%) отмечена в варианте 2 с большим количеством влагоудерживающего компонента (ОСВ), в контроле содержание воды в листьях составило не более 60% (табл. 2).

Суммарное содержание хлорофиллов в листьях овсяницы красной в начале вегетации в контроле составило 3,3 мг/г сухой массы. В ассимилирующих органах овсяницы на опытных площадках содержание зеленых пигментов было выше: при фрагментарном покрытии мелиорантом в 1,2 раза, при сплошном нанесении (вариант 2) в 1,8 раза (табл. 2). Различия между вариантами опыта оказались достоверны при $p < 0,05$. Количество каротиноидов достоверно отличалось от контроля только в варианте 2 (больше в 1,2 раза). От уровня обеспеченности растений минеральным питанием, особенно азотным зависит формирование фотосинтетического аппарата и регулирование процессов хлорофиллообразования.

Недостаток азота сильно снижает концентрацию хлорофилла в ассимиляционной ткани, особенно в фазу вегетативного роста [13]. Азотные удобрения являются одним из основных факторов повышения урожайности семян многолетних трав. Для овсяницы красной лимитирующим фактором является именно весеннее поступление азота [10].

Показано, что при однократном внесении ОСВ накопление азота в надземной массе злаков сеяных фитоценозов сопоставимо с применением высоких доз минеральных комплексных удобрений для повышения питательной ценности кормов [5, 14]. Полученные данные опытного варианта 2 подтверждают эти закономерности. Кроме того, отметили, что под действием азота в пуле хлорофиллов происходит большее накопление хлорофилла *b* и снижение величины соотношения хлорофиллов. Усиление синтеза хлорофилла *b* способствует увеличению светопоглощающей функции ассимилирующих органов. Так, если в контроле соотношение *a/b* составляет 3,3, то при сплошном варианте с ОСВ – 2,9, фрагментарном – 3,1 (табл. 2).

В конце июля вклад листьев злаковых культур, в общий пигментный фонд, начиная с фазы колошения снижается [15]. В связи с этим отмечено снижение концентрации зеленых пигментов в контроле и варианте 1, но различия между ними оказались недостоверны. Максимальное накопление всех фотосинтетических пигментов (6,69 мг/г сухой массы хлорофиллы, 0,95 мг/г сухой массы каротиноиды) получено только во втором варианте, что на 11-17 % больше, чем в предыдущем сроке наблюдений и в 3 раза больше контроля (табл. 2). Очевидно, что высокая обеспеченность азотом в этом варианте опыта позволила поддержать высокий уровень биосинтеза хлорофилла.

В конце вегетационного сезона возможно уже пожелтение листьев, которое сопровождается уменьшением содержания фотосинтетических пигментов во всех вариантах эксперимента. На площадках варианта 2 при высокой плотности травостоя, которая в 2,5-4 раза превышает показатели первого варианта и контроля, отмечено полегание и за-

Таблица 2 / Table 2

Содержание и соотношение фотосинтетических пигментов в листьях *Festuca rubra* в искусственно созданных фитоценозах / Content and ratio of photosynthetic pigments in *Festuca rubra* leaves in artificially created phytocenoses.

Вариант опыта / Experience variant		% сухого вещества / % dry matter	Сумма пигментов, мг/г сухой массы / The pigments content, mg/g of dry weight		<i>a/b</i>	Хл. / Кар. / Chl. / Car.	ХИ, кг/га / Chlorophyll index, kg/ha
			Chl.	Car.			
30.06.21	К	41	3,29±0,14	0,66±0,02	3,3	5,0	
	1	31	3,81±0,10*	0,63±0,02	3,1	6,0	
	2	26	6,04±0,24*	0,81±0,03**	2,9	7,5	
29.07.21	К	44	2,15±0,09	0,55±0,01	3,4	3,9	
	1	37	2,05±0,04	0,40±0,01**	3,1	5,1	
	2	25	6,69±0,08**	0,95±0,02**	2,9	7,0	
19.08.21	К	43	1,75±0,07	0,43±0,01	3,4	4,1	4
	1	35	2,05±0,09*	0,40±0,02	3,0	5,1	34
	2	32	3,65±0,10**	0,58±0,02**	2,9	6,3	105

Примечание. Приведены средние значения со стандартной ошибкой. Хл. – сумма хлорофиллов *a* и *b*. Кар. – каротиноиды. Достоверность различий между контролем и вариантами опыта: * при $p < 0,05$; ** при $p < 0,001$ / Note. The average values with a standard error are given. Chl. - the sum of chlorophylls *a* and *b*. Car. - carotenoids. Reliability of differences between control and experimental variants:

* at $p < 0,05$; ** at $p < 0,001$

кручивание особей, что очень сильно нарушает условия светового и водного режимов. Поэтому здесь зафиксировали резкое снижение количества фотосинтетических пигментов: на 45 % хлорофиллов и 40 % каротиноидов. В контрольных площадках уменьшение количества зеленых пигментов составило не более 17 % относительно июльских значений, тогда как в варианте 1 количество пигментов не изменилось.

В целом, следует отметить, что изменения в содержании фотосинтетических пигментов в листьях овсяницы красной в опытных вариантах с применением ОСВ на протяжении всего сезона вегетации в большей степени связаны с долей участия хлорофилла *b* и каротиноидов. Наибольший диапазон изменений отмечен в июле в варианте 2, где осадок вносили сплошным слоем. Увеличение биомассы в опытных вариантах привело к загущению растительного покрова и соответственно, к затенению особей и к повышению содержания хлорофиллов, особенно хлорофилла *b*. Увеличение содержания хлорофиллов при загущении посевов связано с активизацией метаболических процессов в системе биосинтеза хлорофилла и адаптацией к условиям освещения [13]. Повышенное содержание хлорофилла *b* является защитной функцией пигмента, оказывающего экранирующее действие на фотосинтетически активный хлорофилл *a* [16].

Соотношение хлорофиллов и каротиноидов один из важных показателей состояния ассимиляционного аппарата, зависит от экологических факторов и в условиях Севера имеет высокое значение [13]. Эта характеристика может указывать на большую или меньшую лабильность пигментного комплекса в конкретных условиях существования. Величина соотношения хлорофиллы/каротиноиды в нашем эксперименте показывает, что в контроле этот показатель находится в диапазоне, характерном для большинства таксономических групп растений (4-5), а в опытных вариантах увеличен до 6,3-7,5, что свидетельствует об уменьшении доли желтых пигментов в пигментном комплексе овсяницы красной.

На основе данных о концентрации хлорофиллов можно рассчитать хлорофилльный индекс (ХИ), как произведение содержания хлорофилла во всех фотосинтезирующих органах на их сухую массу на единицу площади фитоценоза. В среднем за год с помощью энергии, поглощенной 1 кг хлорофилла любой растительной ассоциации, связывается 145 углерода [17], что позволяет рассматривать ХИ в качестве показателя продуктивности и стока углерода за вегетационный период. Величина ХИ в условиях подзоны средней тайги европейского Северо-Востока у однолетних с/х культур составляла 15,8-21,0 кг/га, у многолетних 12,9-21,0 кг/га. Наибольший хлорофилльный индекс для однолетних растений отмечен у овса, у многолетних трав - у клевера красного. Большинство культурных растений образуют фитоценозы с ХИ 30-40 кг/га [13]. В пределах величин ХИ 6-24 кг/га установлена прямолинейная зависимость между ХИ и аккумуляцией углерода [18]. Содержание углерода в надземной фитомассе растений в среднем составляет 40 %. Поэтому аккумуляция углерода в биомассе однолетних культур за вегетацию составила 2,3-4,3, у многолетних 1,7-2,7 т С/га [13].

Если рассматривать искусственно созданные фитоценозы с максимальным проективным покрытием овсяницы

красной (вариант 1 и 2), то хлорофилльный индекс для них в конце вегетации будет равен 34-105 кг/га (табл. 2), что превышает величину в контроле в 8,5-26 раз. По нашим данным депонирование углерода в фитомассе овсяницы красной за вегетационный период 2021 года составило в контроле 0,8 т С/га, в опытном варианте с фрагментарным внесением ОСВ — 6,7 т С/га, при сплошном нанесении — 11,5 т С/га, что в 2,5-4 раза больше, чем для многолетних культур европейского Северо-Востока [13].

Однако, расчет продуктивности хлорофилла (количество углерода, аккумулированное в результате фотосинтеза, в расчете на 1 кг хлорофилла за вегетацию) показал, что наибольшая эффективность работы единицы хлорофилла отмечена в контроле (222 кг С), в варианте 1 величина сопоставима (197 кг С), а во втором варианте в 2 раза меньше (110 кг С), несмотря на более высокие абсолютные показатели фитомассы и содержания хлорофиллов. Повышение содержания хлорофиллов в ассимилирующих органах на делянках с большим количеством ОСВ (вариант 2), особенно теневого компонента — хлорофилла *b*, при сильной загущенности фитоценоза и снижении освещенности является результатом улучшения светособирающих свойств фотосинтетического аппарата. Но эта ситуация не стала оптимальной стратегией адаптации этого вида, а привела к снижению эффективности работы единицы хлорофилла, так как при изменении светового режима значительная доля хлорофилла требовалась для улавливания кванта света. Кроме того, избыточное увлажнение, особенно в августе, (оводненность листьев 68-75% — табл. 2), из-за повышенной влагоемкости компонентов ОСВ, также вызвало изменения в пигментном фонде.

Определение интенсивности фотосинтеза листьями овсяницы красной (при оптимальных условиях температуры и освещенности — 12-17°C, 20-30 клк) выявило наличие достоверных отличий между вариантами контроля и опытов с применением ОСВ. В июне наибольшие скорости фотосинтеза (11,81 мг CO₂/г сухой массы ч.) получены в варианте 2, что выше почти в 3 раза показателей в контроле и в 2 раза в варианте 1. В середине вегетационного сезона отметили незначительное изменение скорости газообмена (не более 5%) на всех делянках, независимо от применения мелиорантов. В конце вегетационного периода в контроле интенсивность фотосинтеза увеличилась на 15%, тогда как в опытных вариантах выявлено достоверное снижение интенсивности фотосинтеза в 2,5-10 раз (рис. 1). Отметили, что на контрольных делянках происходит плавное увеличение фотосинтетической активности ассимилирующих органов в течение всего сезона вегетации, с максимумом в конце августа. В опытных вариантах с мелиорантом картина деятельности фотосинтетического аппарата (ФА) несколько иная. Наибольшая скорость процессов ассимиляции углекислоты отмечается в начале и середине лета, когда еще не происходит сильного загущения в посевах и изменения освещенности. В конце вегетации, которая в условиях Крайнего Севера приходится на конец августа, отметили резкое снижение фотосинтетической активности, особенно при сплошном нанесении ОСВ. Эффективность работы ФА можно оценить, рассчитав ассимиляционное число, которое показывает сколько CO₂ фиксируется единицей хлорофилла в час. Видно, что, несмотря на высокие показатели содержания хлорофиллов

и скорости фотосинтеза в начале и середине вегетации при большом количестве внесенного ОСВ, эффективность работы ФА сильно уменьшается в августе — почти в 6 раз (рис. 1). Это говорит об ингибировании ФА избытком минерального питания и изменением светового режима. Таким образом, применение ОСВ с одной стороны, увеличивает фотосинтетическую продуктивность овсяницы красной по сравнению с контролем. С другой стороны, для оптимальной работы ФА овсяницы важно учитывать дозы вносимого нетрадиционного удобрения, поскольку избыток минерального питания сначала способен вызвать резкий всплеск роста надземной фитомассы, но в дальнейшем происходит снижение продуктивности и ингибирование работы ФА.

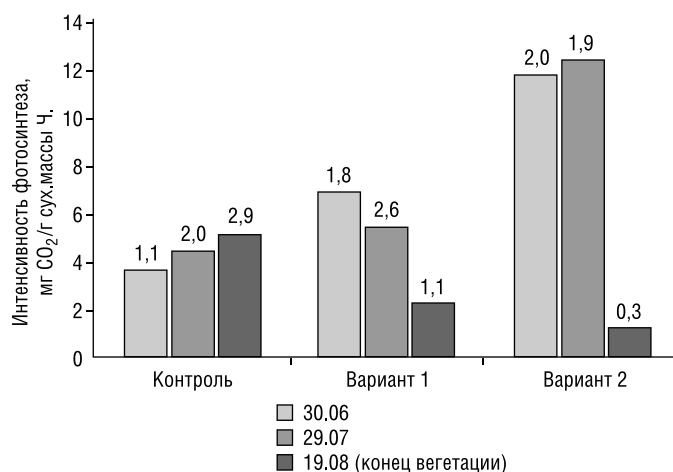


Рис. 1. Фотосинтетическая активность *Festuca rubra* в искусственно созданных фитоценозах с применением ОСВ. К - контроль, вариант 1 - фрагментарное нанесение ОСВ, вариант 2 - нанесение ОСВ сплошным слоем. Сверху над столбцами обозначено ассимиляционное число (эффективность работы хлорофилла, мг $\text{CO}_2/\text{г}$ хлорофилла час) /

Fig. 1. Photosynthetic activity of *Festuca rubra* in artificially created phytocenoses with using of sewage sludge (SS). K - control, variant 1 - fragmentary application of SS, variant 2 - application of SS in a continuous layer. Above the columns, the assimilation number is indicated (the efficiency of chlorophyll, mg CO_2/g chlorophyll hour).

Заключение

В результате эксперимента выявили, что нетрадиционные удобрения (ОСВ) оказали стимулирующий эффект на показатели продуктивности, способствовали улучшению качества искусственно создаваемых посевных фитоценозов, что может способствовать частичному решению таких важных экологических проблем, как рациональное применение ОСВ региональных ВКХ для восстановления объектов накопленного экологического ущерба и улучшения окружающей среды на Крайнем Севере. Использование

широкодоступного и дешевого влагоемкого компонента ОСВ, являющегося дополнительным источником питательных веществ, будет способствовать удешевлению и повышению эффективности технологии фиторемедиации за счет снижения расходов на приобретение и внесение минеральных удобрений.

Информативные показатели работы фотосинтетического аппарата свидетельствуют об эффективном воздействии ОСВ на продуктивность искусственно созданных фитоценозов на песчаных грунтах. Наибольшая эффективность работы ассимилирующих органов в опытных вариантах отмечена в первой половине вегетации. Повышенная влагоудерживающая способность мелиоранта увеличивает оводненность тканей, что может отрицательно влиять на интенсивность фотосинтеза, потому что при полном насыщении клеток мезофилла замыкающие устьичные клетки оказываются несколько сдавленными, и устьичные щели не могут открыться. Сущность вредного влияния на фотосинтез избытка воды в почве сводится к тому, что вода вытесняет из почвы воздух, а вместе с ним и кислород. В затопленной почве создаются полуанаэробные или анаэробные условия. Корни растений не могут в связи с этим поглощать воду в достаточных количествах. Вегетационный период 2021 года отличался обилием осадков (по нашим данным), количество которых превышало в 1,5 раза среднее многолетние нормы [19]. Вероятно, эти факторы и обусловили такие различия в продуктивности изученных вариантов опыта. Расчет продуктивности единицы хлорофилла показал, что наиболее оптимальные показатели работы фотосинтетического аппарата *Festuca rubra* характерны для варианта с фрагментарным внесением ОСВ.

Информативные показатели работы фотосинтетического аппарата доминантного вида овсяницы красной в созданном многолетнем противоэрозионном фитоценозе, свидетельствуют о том, что ОСВ длительной выдержки, в максимальной степени прошедший процессы гумификации и выщелачивания, можно рассматривать в качестве перспективного мелиоранта при проведении восстановительных мероприятий на песчаных техногрунтах в условиях Крайнего Севера, так как способен оказывать эффективное воздействие на продуктивность искусственно создаваемых растительных сообществ, особенно в первой половине вегетации.

Наиболее оптимальные показатели работы фотосинтетического аппарата характерны для способа с фрагментарным нанесением ОСВ на техногрунт, так как при сплошном нанесении данного мелиоранта, характеризующегося высокой влагоудерживающей способностью, в периоды с обилием осадков, существует опасность создания полуанаэробных или анаэробных условий, приводящих к увеличению оводненности тканей в растениях, снижению интенсивности фотосинтеза и их продуктивности. ■

ЛИТЕРАТУРА

1. Евдокимова Г.А., Переверзев В.Н., Зенкова И.В., Корнейкова М.В., Редькина В.В. Эволюция техногенных ландшафтов (на примере отходов апатитовой промышленности). Апатиты: Изд-во Кольского НЦ РАН, 2010. 146 с.
2. Копчик Г.Н., Смирнова И.Е., Копчик С.В., Захаренко А.И., Турбаевская В.В. Эффективность ремедиации почв техногенных пустошей вблизи комбината «Североникель» на Кольском полуострове. Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. 2015; (2):42-48.
3. Копчик Г.Н., Копчик С.В., Смирнова И.Е. Альтернативные технологии ремедиации техногенных пустошей в Кольской субарктике. Почвоведение. 2016; (11):1375-1391. <https://doi.org/10.7868/S0032180X16090082>

4. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A. C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008; 37(5):36-42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
5. Горбачева Т.Т., Лусис А.В., Иванова Л.А. Химическая мелиорация нефелиновых песков с применением осадка сточных вод регионально-го предприятия водопроводно-канализационного хозяйства. *Вестник МГТУ*. 2021; 24(1):88-96. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>
6. Мерзлая Г.Е. Использование органических отходов в сельском хозяйстве. *Журнал Российского химического общества им. Д.И. Менделеева*. 2005; XLIX(3):48-54.
7. Касатиков В., Фатеев В., Кагина О. Осадок сточных вод как удобрение: можно ли избежать нежелательных воздействий. Ежедневное аграрное обозрение. Опубликовано 26.07.2008. Электронный ресурс. Режим доступа: <http://agroobzor.ru/ahim/a-118.html>. Дата просмотра 10.12.2015.
8. Виноградов Д.В., Василева В.М., Макарова М.П., Кочуров Б.И., Лупова Е.И. Агроэкологическое действие осадка сточных вод и его смесей с цеолитом на агроценозы масличных культур. *Теоретическая и прикладная экология*. 2019; (3):127-133. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-127-133.
9. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983; 11(5):591-592.
10. Трухан О.В. Биологические особенности создания агрофитоценозов овсяницы красной (*Festuca rubra* L.). *Вестник ТГУ*. 2014; 19(5):1589-1592.
11. Вихман М.И., Кислых Е.Е., Лисенко Л.А. Урожайность и качество кормовых трав в зависимости от метеорологических факторов в условиях регулируемого плодородия почв. *Материалы 40-й Международной научной конференции «Агрохимические приемы повышения плодородия почв и продуктивности сельскохозяйственных культур в адаптивно-ландшафтных системах земледелия» ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова. М.: Изд-во ВНИИА; 2006. С. 127-129.*
12. Тарчевский И.А., Андрианова Ю.Е. Содержание пигментов как показатель мощности развития фотосинтетического аппарата у пшеницы. *Физиология растений*. 1980; 27(2):341-347.
13. Куренкова С.В. Пигментная система культурных растений в условиях подзоны средней тайги европейского Северо-Востока. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 114 с.
14. Bednarek W., Dresler S., & Tkaczuk P. Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers. *J. of Elementology*. 2015; 20(1):49-58. doi:10.5601/jelem.2014.19.2.633.
15. Физиология продуктивности райграса однолетнего. (Отв. ред. Головки Т.К.) Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1992. 126 с.
16. Литвин Ф.Ф., Звалинский В.И. К теории хроматической и нехроматической адаптации фотосинтеза. *Успехи современной биологии*. 1983; 95(3):339-357.
17. Воронин П.Ю., Ефимцев Е.И., Васильев А.А., Ватковский О.С., Мокроносов А.Т. Проектное содержание хлорофилла и биоразнообразие растительности основных ботанико-географических зон России. *Физиология растений*. 1995; 42(2):295-302.
18. Цельникер Ю.Л., Малкина И.С. Хлорофилльный индекс как показатель годичной аккумуляции углерода древостоями леса. *Физиология растений*. 1994; 41(2):325-330.
19. Семко А.П. Режим тепла и влаги для роста и развития дикорастущих и интродуцированных растений в центральной части Кольского полуострова. Апатиты: Изд-во КНЦ РАН, 1989. 30 с.
20. ГОСТ Р 54534-201. Ресурсосбережение. Осадки сточных вод. Требования при использовании для рекультивации нарушенных земель. Москва: Стандартинформ, 2019.

REFERENCES

1. Evdokimova G.A., Pereverzev V.N., Zenkova I.V., Kornejkova M.V., Red'kina V.V. (2010). *Evoluciya tekhnogennyh landshaftov (Na primere othodov apatitovoj promyshlennosti)*. Apatity: KNC RAN, 146 p.
2. Koptsik G.N., Smirnova I.E., Koptsik S.V., Zaharenko A.I., Turbaevskaya V.V. Efficiency of Remediation of Technogenic Barrens around the Severonikel Factory on the Kola Peninsula. *Moscow University Soil Science Bulletin*. 2015. Seriya Pochvovedenie. 2015; (2):42-48.
3. Koptsik G.N., Smirnova I.E. Alternative Technologies for Remediation of Technogenic Barren Lands in the Kola Subarctic. *Eurasian Soil Science*. 2016; (11):1375-1391.
4. Chen W., Wu L., Frankenberger W.T., Chang A. C. Soil enzyme activities of long term reclaimed wastewater-irrigated soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008; 37(5):36-42. <https://doi.org/10.2134/jeq2007.0315>
5. Gorbacheva T.T., Lusi A.V., Ivanova L.A. Chemical amelioration of nepheline sands using sewage sludge from a regional wastewater treatment plant. *Vestnik MGTU*. 2021; 24(1):88-96. <https://doi.org/10.21443/1560-9278-2021-24-1-88-96>
6. Merzlaya G.E. Ispol'zovanie organicheskikh othodov v sel'skom hozyajstve. *Zhurnal Rossijskogo himicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*. 2005; XLIX(3):48-54.
7. Kasatikov V., Fateev V., Kagina O. Osadok stochnyh vod kak udobrenie: mozjno li izbezhat' nezhelatel'nyh vozdeystvij. *Ezhednevnoe agrarnoe obozrenie*. Opublikovano 26.07.2008. Elektronnyj resurs. Rezhim dostupa: <http://agroobzor.ru/ahim/a-118.html>. Data prosmotra 10.12.2015.
8. Vinogradov D.V., Vasileva V.M., Makarova M.P., Kochurov B.I., Lupova E.I. Agroekologicheskoe dejstvie osadka stochnyh vod i ego smesey s ceolitom na agroceozy maslichnyh kul'tur. *Teoreticheskaya i prikladnaya ekologiya*. 2019; (3):127-133. doi: 10.25750/1995-4301-2019-3-127-133.
9. Lichtenthaler H.K., Wellburn A.R. Determination of total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents. *Biochem. Soc. Trans.* 1983. 1983; 11(5):591-592.
10. Truhan O.V. Biologicheskie osobennosti sozdaniya agrofitocenozov ovsyanyicy krasnoj (*Festuca rubra* L.). *Vestnik TGU*. 2014; 19(5):1589-1592.

11. Vihman M.I., Kislyh E.E., Liseenko L.A. Urozhaiznost' i kachestvo kormovyh trav v zavisimosti ot meteorologicheskikh faktorov v usloviyakh reguliruemogo plodorodiya pochv. Materialy 40-j Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii "Agrohimicheskie priyomy povysheniya plodorodiya pochv i produktivnosti sel'skohozyajstvennykh kul'tur v adaptivno-landshaftnykh sistemah zemledeliya" VNIIA im. D.N. Pryanishnikova. M.: Izd-vo VNIIA; 2006. P. 127-129.
12. Tarchevskij I.A., Andrianova Yu.E. Soderzhanie pigmentov kak pokazatel' moshchnosti razvitiya fotosinteticheskogo apparata u pshenicy. Fiziologiya rastenij. 1980; 27(2):341-347.127-129.
13. Kurenkova S.V. Pigmentnaya sistema kul'turnykh rastenij v usloviyakh podzony srednej tajgi evropejskogo Severo-Vostoka. Ekaterinburg: UrO RAN, 1998. 114 p.
14. Bednarek W., Dresler S., & Tkaczyk P. Nitrogen fractions in timothy grass (*Phleum pratense* L.) fertilized with different doses of mineral fertilizers. J. of Elementology. 2015; 20(1):49-58. doi:10.5601/jelem.2014.19.2.633.
15. Fiziologiya produktivnosti rajgrasa odnoletnego. (Otv. red. Golovko T.K.) Syktyvkar: Komi NC UrO RAN, 1992. 126 p.
16. Litvin F.F., Zvalinskij V.I. K teorii hromaticheskoy i nekhromaticheskoy adaptacii fotosinteza. Uspekhi sovremennoj biologii. 1983; 95(3):339-357.
17. Voronin P.Yu., Efimcev E.I., Vasil'ev A.A., Vatkovskij O.S., Mokronosov A.T. Proektivnoe sodержanie hlorofilla i bioraznoobrazie rastitel'nosti osnovnykh botaniko-geograficheskikh zon Rossii. Fiziologiya rastenij. 1995; 42(2):295-302.
18. Cel'niker Yu.L., Malkina I.S. Hlorofill'nyj indeks kak pokazatel' godichnoj akumul'yacii ugleroda drevostoyami lesa. Fiziologiya rastenij. 1994; 41(2):325-330.
19. Semko A.P. Rezhim tepla i vlagi dlya rosta i razvitiya dikorastushchih i introducirovannykh rastenij v central'noj chasti Kol'skogo poluostrova. Apatity: Izd-vo KNC RAN, 1989. 30 p.
20. GOST R 54534-201. Resursobezrezhenie. Osadki stochnykh vod. Trebovaniya pri ispol'zovanii dlya rekul'tivacii narushennykh zemel'. Moskva: Standartinform, 2019.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ



Шмакова Наталья Юрьевна:

доктор биологических наук,
главный научный сотрудник,
ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-
институт им. Н.А. Аврорина
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук».
г. Кировск, Россия,
E-mail: shmanatalya@yandex.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-8342-1764> / Scopus Author
ID 57191981695

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Shmakova Natalya Jurevna:

doctor of biological sciences,
chief researcher,
Aurorin Polar Alpine Botanical Garden Institute of
Federal research centre «Kola research centre of the
Russian Academy of Sciences».
Kirovsk, Murmansk region, Russia,
E-mail: shmanatalya@yandex.ru,
<http://orcid.org/0000-0001-8342-1764> / Scopus Author
ID 57191981695



Иванова Любовь Андреевна:

доктор биологических наук,
главный научный сотрудник,
ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-
институт им. Н.А. Аврорина
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук».
г. Кировск, Россия,
E-mail: ivanova_la@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0002-7994-5431>

Ivanova Lyubov Andreevna:

doctor of biological sciences,
chief researcher,
Aurorin Polar Alpine Botanical Garden Institute of
Federal research centre «Kola research centre of the
Russian Academy of Sciences».
Kirovsk, Murmansk region, Russia,
E-mail: ivanova_la@inbox.ru,
<http://orcid.org/0000-0002-7994-5431>



Ермолаева Ольга Владимировна:

кандидат биологических наук,
старший научный сотрудник,
ФГБУН Полярно-альпийский ботанический сад-
институт им. Н.А. Аврорина
Федерального исследовательского центра «Кольский
научный центр Российской академии наук».
г. Кировск, Россия,
E-mail: olia.ermolik@yandex.ru,
<http://orcid.org/0000-0002-6310-3846>

Ermolaeva Olga Vladimirovna:

candidate of biological sciences,
senior researcher,
Aurorin Polar Alpine Botanical Garden Institute of
Federal research centre «Kola research centre of the
Russian Academy of Sciences».
Kirovsk, Murmansk region, Russia,
E-mail: olia.ermolik@yandex.ru,
<http://orcid.org/0000-0002-6310-3846>



Лусис Аделина Вадимовна:
 специалист по охране окружающей среды
 и безопасности,
 Общество с ограниченной ответственностью
 «Эвобласт»,
 Москва, Россия,
 E-mail: adelina.lusis@evoblast.ru

Lusis Adelina Vadimovna:
 Environment and Security specialist limited liability
 company «Evoblast»,
 Moscow, Russia,
 E-mail: adelina.lusis@evoblast.ru

ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION: Авторы заявляют о равном вкладе каждого в работу над статьей / The authors declare the equal contribution of everyone to the work on the article.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ / CONFLICT OF INTEREST: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.



САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ



Информируем Вас

Санкт-Петербургский горный университет. Основан в 1773 году. Первое высшее техническое учебное заведение в России.
 Факультеты:

- ◆ Геологоразведочный факультет,
- ◆ Горный факультет,
- ◆ Механико-машиностроительный факультет,
- ◆ Нефтегазовый факультет,
- ◆ Строительный факультет,
- ◆ Факультет переработки минерального сырья,
- ◆ Факультет фундаментальных и гуманитарных дисциплин,
- ◆ Экономический факультет,
- ◆ Энергетический факультет,
- ◆ Факультет аспирантуры и докторантуры.

Для зачисления в Университет в 2022 году необходимо подать заявление о согласии на зачисление и оригинал документа об образовании 10 июля 2022 года.

Контакты : Санкт-Петербург, В.О., наб. Лейтенанта Шмидта, д. 45, Главный пост.
 Тел.: 800 550 14 34; (812) 328 8201; (812) 328 89 02 e-mail: priem@mgri.ru, <https://www.mgri.ru/commission/poryadok-postupleniya/>

WWW.N-GN.RU