

УЧАСТИЕ ПОЧВЕННЫХ МИКРОВОДОРОСЛЕЙ И ЦИАНОБАКТЕРИЙ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ СТЕПНОЙ ЗОНЫ В УТИЛИЗАЦИИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

И.А. Мальцева¹, *А.В. Яковийчук^{1,2}, Е.И. Мальцев², С.В. Черкашина¹,
Ю.Л. Бредихина¹, И.С. Дукова¹

¹Мелитопольский государственный университет, Россия, Мелитополь

²Институт физиологии растений имени К.А. Тимирязева РАН, Россия, Москва

e-mail: *alex.yakov1991@yandex.ru

В работе представлены данные о вкладе почвенных микроводорослей и цианобактерий лесных насаждений (Старо-Бердянский лес) степной зоны в утилизацию углекислого газа. В ходе исследования установлено, что видовой состав древесных пород и почвенные условия оказывают влияние на состав, численность, а также на секвестрационные характеристики микроводорослей и цианобактерий. Количество утилизированного углекислого газа представителями почвенных микроводорослей и цианобактерий имеет максимальные значения в верхнем пятисантиметровом слое почвы соснового и дубового насаждений. Биофиксация и общее количество утилизированного микроводорослями и цианобактериями углекислого газа выше в лиственном насаждении чем в хвойном.

Ключевые слова: Старо-Бердянский лес, биофиксация, продуктивность биомассы, время оборота биомассы, Cyanobacteria, Chlorophyta, Streptophyta, Heterokontophyta.

Введение

Лесные массивы в степной зоне занимают небольшие площади, но имеют очень важную средообразующую роль. Они оказывают влияние на климат, почвы, выполняют водоохранную, защитную и рекреационную функции, способствуют предупреждению пыльных бурь, уменьшению поверхностного стока воды, сохранению биологического разнообразия [1]. Многие лесные массивы в степной зоне созданы искусственно. Так, в 1846 году на левом берегу реки Молочной был заложен Старо-Бердянский лес площадью 996,6 га (Запорожская обл., Россия) (рис. 1). В месте его расположения хорошо выражены пойма, арена (вторая надпойменная терраса) и есть переход к третьей суглинистой террасе [2]. Лесорастительные условия характеризуются значительной пестротой. На пойменной террасе наряду с коротко-пойменными супесчаными сформированы суглинистые почвы с разными градами увлажнения – от свежих до мокрых, с засолением и без. Вторая терраса сложена сухими песками, нередко переходящими в супеси. На третьей террасе преобладают суглинки сухих, суховатых и свежих местообитаний, часто солонцеватые. Все насаждения Старо-Бердянского леса имеют искусственное происхождение, и большая их часть создана ограниченным количеством древесных пород с незначительным варьированием типов смешения. Преобладающими породами являются *Quercus robur* L., *Fraxinus excelsior* L., *Gleditsia triacanthos* L., *Robinia pseudoacacia* L., а также *Pinus sylvestris* L. и *P. pallasiana* D. Don.

Лесные экосистемы Старо-Бердянского леса вместе с другими лесными экосистемами региона обеспечивают поглощение и утилизацию атмосферного углерода, что важно с точки зрения достижения углеродной нейтральности как в региональном, так и в глобальном масштабе. Оценка поглотительной способности лесных экосистем и их роль в глобальном цикле углерода – одна из приоритетных современных научных и практических задач. В системе мониторинга потоков парниковых газов на территории России лесные экосистемы играют ключевую роль и исследуются в рамках функционирования различных карбоновых полигонов [3, 4]. Изучение секвестрационного потенциала лесных экосистем Старо-

Бердянского леса, произрастающих в условиях аридного степного климата, и оценка их роли в обеспечении баланса климатически активных газов еще не проводились.



Рисунок 1 – Географическое расположение Старо-Бердянского леса: а – масштаб 1 : 200 000; б – масштаб 1 : 50 000 (фото сделано с помощью онлайн-инструмента Google Maps)

Следует отметить, что углерод в лесных экосистемах депонируется не только в древесине, но и в значительных количествах хранится в почве и лесной подстилке [5]. Основное внимание при изучении почвенного углерода сосредоточено на его поступлении с опадом и скорости разложения. При этом участие фотосинтезирующих почвенных организмов, таких как микроводоросли и цианобактерии, в динамике почвенного углерода не оценивается.

Известно, что микроскопические водоросли и цианобактерии населяют различные водные, а также наземные экосистемы и являются эффективными фиксаторами углекислого газа. Они способны связывать в 10-15 раз больше углекислого газа, чем наземные растения [6]. Вклад природных сообществ микроводорослей и цианобактерий в поглощение углекислого газа наиболее изучен для водных экосистем [7, 8, 9]. Сообщалось, что почти 50 % всей первичной продукции создают эти фотосинтезирующие организмы [10]. Микроводоросли и цианобактерии обладают высокой скоростью роста, поэтому при микроскопических размерах их продукционные характеристики значительно превышают биомассу, измеренную в конкретный период времени. В наземных экосистемах продуктивность почвенных микроводорослей и цианобактерий по данным различных исследований, обобщенных в работе Р.Р. Кабирова и Л.А. Гайсиной [11], изменяется от 9,0 до 2586 кг·га⁻¹.

Эффективность фиксации углекислого газа микроводорослями и цианобактериями наземных местообитаний только начинает исследоваться, и работы в этом направлении пока единичны [12, 13, 14]. Так, при изучении водорослей, растущих на поверхности снега в Антарктике, был сделан вывод, что они создают $1,3 \times 10^3$ тонн сухой биомассы и фиксируют около 479 тонн углерода за сезон, исходя из средних значений содержания углерода (C) в их биомассе – 41,8 % [15]. При сопоставлении со скоростью дыхания экосистемы и активностью гетеротрофов снежного покрова A. Gray с соавторами (2020) сделали вывод о положительной чистой экосистемной продукции в течение летнего сезона. Взяв в основу данные, полученные различными авторами при изучении биоразнообразия микроводорослей и цианобактерий наземных экосистем, V.E.J. Jassey с соавторами (2022) рассчитали, что почвенные микроводоросли и цианобактерии могут поглощать 3,6 Пг C в год, что соответствует примерно

6 % чистой первичной продукции наземной растительности [16]. Таким образом, наземные микроводоросли и цианобактерии активно участвуют в поглощении углекислого газа, и оценка динамики углеродного баланса в почвах как на уровне отдельных наземных экосистем, так и в глобальном масштабе не может быть осуществлена без учета их функциональной активности.

Предыдущие исследования показали большое видовое разнообразие почвенных водорослей и цианобактерий в дубовых и сосновых насаждениях Старо-Бердянского леса [17]. Дубовые и сосновые насаждения составляют соответственно 36,0 % и 13,7 % лесных культур Старо-Бердянского леса согласно данным лесоустройства и являются одними из наиболее ценных и продуктивных в условиях степи, что обуславливает особый интерес к ним.

Целью данной работы было изучение секвестрационного потенциала почвенных микроводорослей и цианобактерий соснового и дубового насаждений Старо-Бердянского леса на основании данных об их биомассе и продуктивности.

Материалы и методы

Дубовое насаждение (кв. 16, площадь 1,9 га) расположено в пойме р. Молочная. Состав древостоя 8Д1Я1В. Сосновое насаждение (кв. 23, площадь 1,7 га) произрастает на второй песчаной террасе р. Молочная. Состав древостоя 10С. В каждом насаждении были заложены пробные площадки размером 500 м² на которых стохастично отобрали по 10 образцов почвы и лесной подстилки, каждый объемом около 25 см³. Почвенные образцы отбирались послойно, каждые 5 см до глубины 15 см в соответствии с методикой М.М. Голлербаха и Э.А. Штиной [18].

Для почв определялись следующие показатели: общее количество гумуса по методу И.В. Тюрина, рН водной вытяжки – потенциометрическим методом, гранулометрический состав – по методу Н.А. Качинского, полевую влажность – гравиметрическим методом [19, 20].

Количественный учет микроводорослей и цианобактерий проведен прямым методом [18]. Данные о количестве клеток и их размерных характеристиках были использованы для расчета биомассы микроводорослей и цианобактерий. Величину продуктивности устанавливали по статистически достоверным приростам биомассы на основании ежедневных измерений на протяжении 10 дней. При оценке поглощения углекислого газа учитывали, что 1 кг сухой биомассы микроводорослей и цианобактерий способен в среднем связывать 1,83 кг углекислого газа, а содержание воды в их биомассе составляет в среднем 82 % [21, 22, 23].

Для обеспечения достоверности полученных результатов все эксперименты проводились в трехкратной повторности.

Статистический анализ проводился с помощью Statistica ver. 12.0. Для построения графиков использовали программное обеспечение Microsoft Excel ver. 1903. Достоверность отличий рассчитывали, используя тест ANOVA. Достоверными считали разницу при $p \leq 0,05$.

Результаты и обсуждение

Дубовое насаждение расположено в пойме и характеризуется разреженным травостоем. Лесная подстилка имеет небольшую мощность – 1-2 см. Почва – суглинистая, лугово-черноземная. Содержание гумуса в исследованном горизонте – 8,17 %, рН водной вытяжки – 6,15, сумма солей (сухой остаток) – 0,416 %. Общая численность клеток водорослей и цианобактерий в почве и лесной подстилке составила 78,59 тыс. кл. г⁻¹ абсолютно сухой почвы и лесной подстилки, биомасса – 97,24 кг га⁻¹ (табл. 1).

В сосновом насаждении на второй песчаной террасе в подлеске отмечены *Juniperus virginiana* L., *Celtis occidentalis* L., травостой не сформирован, мощность лесной подстилки до 3-4 см. Почва супесчаная, дерново-боровая. Содержание гумуса – 2,79 %, рН водной вытяжки – 5,5, сумма солей (сухой остаток) – 0,096 %. Общая численность водорослей и цианобактерий

– 31,44 тыс. кл. г⁻¹ абсолютно сухой почвы и лесной подстилки, биомасса – 59,74 кг га⁻¹ (табл. 2).

Таблица 1 – Средние значения численности, биомассы и биофиксации углекислого газа микроводорослями и цианобактериями в дубовом насаждении Старо-Бердянского леса (M±SE, n=3)

Горизонт, см	Cyanobacteria	Chlorophyta, Streptophyta Heterokontophyta (Eustigmatophyceae, Xanthophyceae)	Heterokontophyta (Bacillariophyceae)	Всего	Cyanobacteria	Chlorophyta, Streptophyta Heterokontophyta (Eustigmatophyceae, Xanthophyceae)	Heterokontophyta (Bacillariophyceae)	Всего	Утилизованный CO ₂ , кг га ⁻¹
Подстилка	5,16±0,21	20,71±0,62 [#]	1,76±0,56 ^{#+}	27,63	0,67±0,03	24,81±0,74 [#]	0,21±0,07 ^{#+}	25,69	8,47
0-5 см	3,27±0,16 [*]	13,07±0,54 ^{**}	1,63±0,11 ^{#+}	17,97	1,17±0,06 [*]	27,32±1,13 [#]	0,47±0,03 ^{#+}	28,96	9,55
5-10 см	3,23±0,16	12,92±0,83 [#]	1,23±0,13 ^{#+}	17,38	1,10±0,05	21,11±1,36 ^{**}	0,51±0,05 ^{#+}	22,72	7,48
10-15 см	3,46±0,12	12,15±0,71 [#]	0 ^{#+}	15,61	1,25±0,04	18,62±1,09 [#]	0 ^{#+}	19,87	6,55
Всего	15,12	58,85	4,62	78,59	4,19	91,86	1,19	97,24	32,05

Примечание: Здесь и далее в таблице 2: * – разница достоверна относительно предыдущего показателя в вертикальной линии на уровне $p \leq 0,05$; # – разница достоверна относительно предыдущего показателя в горизонтальной линии на уровне $p \leq 0,05$; + – разница достоверна между количеством клеток и биомассой Cyanobacteria и Heterokontophyta на уровне $p \leq 0,05$.

Таблица 2 – Средние значения численности, биомассы и биофиксации углекислого газа микроводорослями и цианобактериями в сосновом насаждении Старо-Бердянского леса (M±SE, n=3)

Горизонт, см	Cyanobacteria	Chlorophyta, Streptophyta Heterokontophyta (Eustigmatophyceae, Xanthophyceae)	Heterokontophyta (Bacillariophyceae)	Всего	Cyanobacteria	Chlorophyta, Streptophyta Heterokontophyta (Eustigmatophyceae, Xanthophyceae)	Heterokontophyta (Bacillariophyceae)	Всего	Утилизованный CO ₂ , кг га ⁻¹
Подстилка	0	8,31±0,42 [#]	1,53±0,07 ^{#+}	9,84	0	10,12±0,51 [#]	4,49±0,21 ^{#+}	14,61	4,82
0-5 см	0	6,82±0,34 [#]	3,15±0,11 ^{**+}	9,97	0	12,42±0,62 [#]	9,45±0,33 ^{#+}	21,87	7,22
5-10 см	0	6,24±0,26 [#]	1,58±0,06 ^{**+}	7,82	0	11,13±0,46 [#]	3,23±0,12 ^{**+}	14,36	4,74
10-15 см	0	2,14±0,22 ^{*#}	1,67±0,07 ^{#+}	3,81	0	5,13±0,53 ^{*#}	3,78±0,16 ^{#+}	8,91	2,94
Всего	0	23,51	7,93	31,44	0	38,8	20,94	59,74	19,72

Исследованные лесные насаждения отличались по численности и биомассе микроводорослей и цианобактерий. В дубовом насаждении численность и биомасса микроводорослей и цианобактерий были выше, чем в сосновом (табл. 1, 2). Очевидно, этому способствовал более благоприятный режим увлажнения пойменного местообитания в сочетании с хорошей водоудерживающей способностью суглинистых почв в сравнении с супесчаными [1, 24].

подавляющее большинство клеток, отмеченных в почве и лесной подстилке, составляют представители зеленых, желтозеленых и эвстигматофитовых водорослей. Значительно меньше численность цианобактерий и диатомовых водорослей. При этом в почве соснового насаждения цианобактерии не обнаружены. Это может быть связано с pH почвы соснового насаждения. Цианобактерии более разнообразны в почвах с щелочными значениями pH и ограничены в кислых почвах [18].

Наибольшее количество клеток и биомасса водорослей и цианобактерий сосредоточены в лесной подстилке и верхнем пятисантиметровом слое почвы (табл. 1, 2). Это соответствует результатам, полученным при исследовании других лесных экосистем [25].

Величина продукции, рассчитанная суммированием статистически достоверных приростов биомассы, в дубовом насаждении выше, чем в сосновом (рис. 1, 2). Время оборота биомассы не превышает 3 суток (рис. 2), что свидетельствует о высокой скорости утилизации органического вещества микроводорослей и цианобактерий. Органическое вещество водорослей и цианобактерий является ценным пищевым ресурсом для многих беспозвоночных [26, 28], участвует в образовании гумуса [28]. Это способствует длительному закреплению углерода в почве.

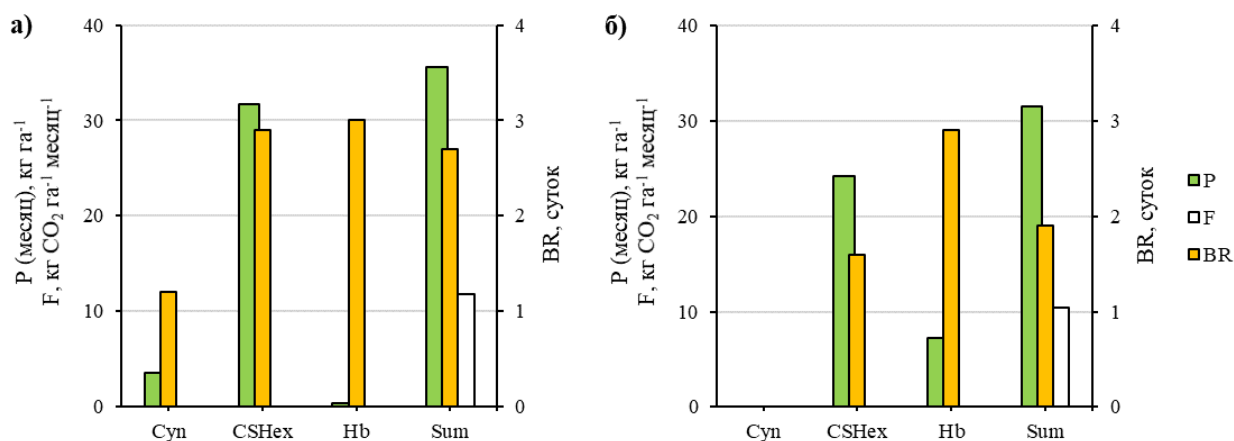


Рисунок 2 – Основные характеристики продуктивности и биофиксации углекислого газа микроводорослями и цианобактериями почв дубового (а) и соснового (б) лесных насаждений Старо-Бердянского леса

Примечание: P – продуктивность биомассы (месяц), кг га⁻¹; F – скорость биофиксации углекислого газа, кг CO₂ га⁻¹ месяц⁻¹; BR – время оборота биомассы, суток. Cyn – Cyanobacteria; CSHex – Chlorophyta, Streptophyta, Heterokontophyta (Eustigmatophyceae, Xanthophyceae); Hb – Heterokontophyta (Bacillariophyceae); Sum – суммарное значение показателя для всех представителей микроводорослей и цианобактерий.

Количество утилизированного водорослями и цианобактериями углекислого газа максимальных значений достигает в верхнем пятисантиметровом слое почвы как в сосновом, так и в дубовом насаждении (табл. 1, 2). В целом, с учётом площади насаждений, количество углекислого газа, фиксированного водорослями и цианобактериями, в дубовом насаждении составило 60,89 кг, а в сосновом – 33,52 кг. Скорость биофиксации, а также общее количество утилизированного водорослями и цианобактериями углекислого газа выше в лиственном насаждении в сравнении с хвойным (рис. 2а, б). Видовой состав древесных пород и почвенные

условия оказали влияние на состав, численность микроводорослей и цианобактерий, что наблюдали и в других лесных экосистемах [25], а также и на секвестрационные характеристики микроводорослей и цианобактерий.

В лиственных лесах средняя скорость секвестрации углерода в древесной биомассе может составлять 3,5-4,0 т С га⁻¹ год⁻¹, в почве, за счет лесного опада – 0,4-0,5 т С га⁻¹ год⁻¹ [2], или при перерасчете на углекислый газ 0,107-0,122 т га⁻¹ месяц⁻¹ и 0,122-0,153 т га⁻¹ месяц⁻¹ соответственно. При сопоставлении этих данных с результатами нашего эксперимента, можно сделать вывод, что микроводоросли и цианобактерии дубового насаждения Старо-Бердянского обеспечивают фиксацию и накопление углерода в почве в количестве, соответствующем 20,9-26,3 % вклада лесного опада в лиственных лесах. Запасы углерода в почве (0-30 см) и подстилке сосновых экосистем на песчаных почвах в среднем достигают 39,66 т С га⁻¹ [29], при пересчете на углекислый газ – 145,42 т С га⁻¹. Таким образом, потенциал поглощения углекислого газа почвенными микроводорослями и цианобактериями сосновых лесов и их вклад в образование запасов почвенного углерода может составлять около 22,04 %.

Выводы

Наибольшее количество клеток и биомасса водорослей и цианобактерий сосредоточены в лесной подстилке и верхнем пятисантиметровом слое почвы дубового и соснового насаждений Старо-Бердянского леса.

Численность и биомасса водорослей и цианобактерий в дубовом насаждении больше, чем в сосновом: 78,5 тыс. клеток г⁻¹ абсолютно сухой почвы/подстилки, 97,24 кг га⁻¹ и 31,44 тыс. клеток г⁻¹ абсолютно сухой почвы/подстилки и 59,74 кг га⁻¹ соответственно.

Количество утилизированного водорослями и цианобактериями углекислого газа в дубовом насаждении соответствует 32,05 кг га⁻¹, в сосновом – 19,72 кг га⁻¹. Вклад водорослей и цианобактерий в зависимости от вида древесной породы и почвенных условий может быть сопоставим с 20-26 % поступления углерода в почву от лесного опада.

Дальнейшие исследования позволят получить больше информации относительно секвестрационного потенциала водорослей и цианобактерий в почвах различных экосистем и станут основой для разработки технологий использования почвенных фототрофных микроорганизмов с целью улучшения связывания углерода в почвах и решения задач углеродной нейтральности.

Благодарности

Работа выполнена в рамках темы «Секвестрационный потенциал микроводорослей и цианобактерий антропогенно-трансформированных экосистем Запорожской области в условиях возрастающей аридизации климата» (FRRS-2024-0003; № 124040100028-6).

Список литературы

1. Бельгард А.Л. Степное лесоведение. М.: Лесная промышленность, 1971. 336 с.
2. Стадниченко В.Г. Почвенные условия района Старо-Бердянской и Алтагирской лесных дач // Сб. науч. раб. биолог. фак-та ДГУ. К.: Изд-во Киев. ун-та, 1953. С. 11-21.
3. Абакумов Е.В., Поляков В.И., Чуков С.Н. Подходы и методы изучения органического вещества почв карбоновых полигонов России (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 773-786. DOI: 10.31857/S0032180X22070024.
4. Курганова И.Н., Гереню В.О., Ипп С.Л., Каганов В.В., Хорошаев Д.А., Рухович Д.И., Сумин Ю.В., Дурманов Н.Д., Кузяков Я.В. Пилотный карбоновый полигон в России: анализ запасов углерода в почвах и растительности // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5. № 2. С. e169. DOI: 10.31251/pos.v5i2.169.
5. Тебенькова Д.Н., Гичан Д.В., Гагарин Ю.Н. Влияние лесоводственных мероприятий на почвенный углерод: обзор // Вопросы лесной науки. 2022. Т. 5. № 4. С. 1-37. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-116.

6. Tarafdar A., Sowmya G., Yogeshwari K., Rattu G., Negi T., Awasthi M.K., Hoang A., Sindhu R., Sirohi R. Environmental pollution mitigation through utilization of carbon dioxide by microalgae // *Environmental Pollution*. 2023. No. 328. P. 121623. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121623.
7. Arenas, F.; Vas-Pinto, F., Marine algae as carbon sinks and allies to combat global warming // *Marine algae: biodiversity, taxonomy, environmental assessment and biotechnology*. CRC Press, Boca Raton, 2014. P. 178-193.
8. Kadhim B., Hamdan M., Hassan F.M., El-Sheekh M.M. Carbon sources and riverine algal biomass: an experimental study // *Egyptian journal of aquatic biology & fisheries*. 2024. Vol. 28. No. 2. P. 39-50. DOI:10.21608/EJABF.2024.344865.
9. Liang Y., Zhang Y., Wang N., Luo T., Zhang Y., Rivkin R.B. Estimating primary production of picophytoplankton using the carbon-based ocean productivity model: a preliminary study // *Frontiers in Microbiology*. 2017. No. 8. e1926. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01926.
10. Chisholm S.W. Stirring times in the Southern Ocean // *Nature*. 2000. Vol. 407. No. 6805. P. 685-687. DOI:10.1038/35037696.
11. Кабиров Р.Р., Гайсина Л.А. Р.Р Показатели продуктивности почвенных водорослей в наземных экосистемах // *Почвоведение*. 2009. № 12. С. 1475-1480.
12. Dettweiler-Robinson E., Nuanez M., Litvak M.E. Biocrust contribution to ecosystem carbon fluxes varies along an elevational gradient // *Ecosphere*. 2018. Vol. 9. No. 6. e02315. DOI: 10.1002/ecs2.2315.
13. Hamard S., Céréghino R., Barret M., Sytiuk A., Lara E., Dorrepaal E., Kardol P., Küttim M., Lamentowicz M., Leflaive J., Le Roux G., Tuittila E., Jassey V.E. Contribution of microbial photosynthesis to peatland carbon uptake along a latitudinal gradient // *Journal of Ecology*. 2021. Vol. 109. No. 9. P. 3424-3441. DOI: 10.1111/1365-2745.13732.
14. Wyatt K.H., Turetsky M.R., Rober A.R., Giroldo D., Kane E.S., Stevenson R.J. Contributions of algae to GPP and DOC production in an Alaskan fen: effects of historical water table manipulations on ecosystem responses to a natural flood // *Oecologia*. 2011. Vol. 169. No. 3. P. 821-832. DOI: 10.1007/s00442-011-2233-4.
15. Gray A., Krolkowski M., Fretwell P., Convey P., Peck L.S., Mendelova M., Smith A.G., Davey M.P. Remote Sensing reveals Antarctic Green Snow algae as important terrestrial carbon sink // *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 2527. DOI:10.1038/s41467-020-16018-w.
16. Jassey V.E.J., Walcker R., Kardol P., Geisen S., Heger T., Lamentowicz M., Hamard S., Lara E. Contribution of soil algae to the global carbon cycle // *New Phytologist*. 2022. Vol. 234. No. 1. P. 64-76. DOI: 10.1111/nph.17950.
17. Мальцева И.А. Грунтови водорості деревних насаджень Старобердянського лісу (Запорізька область) // *Вісник ХНАУ. Серія «Біологія»*. 2004. № 2. С. 21-26.
18. Голлербах М.М., Штина Э.А. Почвенные водоросли. Ленинград: Наука, 1969. 143 с.
19. Кузяхметов Г.Г., Дубовик И.Е. Методы изучения почвенных водорослей. Уфа: Башк. ун-т, 2001. 56 с.
20. Соколов А.В., Аскинази Д.Л. Агрехимические методы исследования почв. М.: Наука, 1965. 436 с.
21. Adamczyk M., Lasek J., Skawińska A. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana* // *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2016. Vol. 179. No. 7. P. 1248-1261. DOI:10.1007/s12010-016-2062-3.
22. Gautam K., Pareek A., Sharma D.K. Exploiting microalgae and macroalgae for production of biofuels and biosequestration of carbon dioxide – a review // *International Journal of Green Energy*. 2022. Vol. 12. No. 11. P. 1122-1143. DOI: 10.1080/15435075.2014.893239.
23. Федоров В.Д., Корсак М.Н., Боров Ю.А. Некоторые итоги изучения первичной продукции фитопланктона Белого моря // *Гидробиологический журнал*. 1974. Т. 10. № 5. С. 9-14.
24. Пузанов А.В., Бабошкина С.В., Рождественская Т.А., Балыкин С.Н., Егорова И.В., Мешкина С.С. Восстановление расчетными методами основной гидрофизической характеристики и сравнение водоудерживающей способности степных (бассейн реки Алей) и

горнолесных (бассейн реки Майма) почв Алтая // Мир науки, культуры, образования. 2014. Т. 49. № 6. С. 572-578.

25. Алексахина Т.И., Штина Э.А. Почвенные водоросли лесных биогеоценозов. М.: Наука, 1984. 150 с.

26. Bokhorst S., Ronfort C., Huiskes A., Convey P., Aerts R. Food choice of Antarctic soil arthropods clarified by stable isotope signatures // Polar Biology. 2007. Vol. 30. No. 8. P. 983-990. DOI: 10.1007/s00300-007-0256-4.

27. Pakhomov O., Pokhylenko A., Maltseva I., Kulbachko Y. Participation of *Rossiulus kessleri* (Diplopoda, Julida) in the Formation of Algae Assemblages of Urbanized Territories // Diversity. 2022. Vol. 14. No. 7. P. 508. DOI: 10.3390/d14070508.

28. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas // Ecological Chemistry and Engineering S. 2015. Vol. 22. No. 4. P. 675-690. DOI: 10.1515/eces-2015-0041.

29. Кузнецова А.И., Лукина Н.В., Тихонова Е.В., Горнов А.В., Горнова М.В., Смирнов В.Э., Гераськина А.П., Шевченко Н.Е., Тебенькова Д.Н., Чумаченко С.И. Аккумуляция углерода в песчаных и суглинистых почвах равнинных хвойно-широколиственных лесов в ходе послерубочных восстановительных сукцессий // Почвоведение. 2019. № 7. С. 803-816. DOI: 10.1134/S0032180X19070086.

Конфликт интересов: Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 12.07.2024

Принята к публикации 28.11.2024

THE PARTICIPATION OF SOIL MICROALGAE AND CYANOBACTERIA OF FOREST PLANTATIONS OF THE STEPPE ZONE IN THE UTILIZATION OF CARBON DIOXIDE

I. Maltseva¹, *A. Yakoviichuk^{1,2}, E. Maltsev², S. Cherkashina¹, Yu. Bredikhina¹, I. Dukova¹

¹Melitopol State University, Russia, Melitopol

²Timiryazev Institute of Plant Physiology of the Russian Academy of Sciences, Russia, Moscow

e-mail: *alex.yakov1991@yandex.ru

The study provides data on how soil microalgae and cyanobacteria in the Staro-Berdyansk forest plantation in the steppe zone of the Zaporozhye region contribute to the utilization of carbon dioxide. It is found that the types of trees and soil conditions influence on the composition, abundance, and carbon sequestration abilities of microalgae and cyanobacteria. The research shows that the most significant amount of carbon dioxide is utilized by microalgae and cyanobacteria in the top five centimeters of soil in both pine and oak plantations. Additionally, biofixation and the total amount of carbon dioxide utilized by algae and cyanobacteria are higher in deciduous forests compared to coniferous ones.

Key words: Staro-Berdyansky forest, biofixation, biomass productivity, biomass recycling time, Cyanobacteria, Chlorophyta, Streptophyta, Heterokontophyta.

References

1. Bel'gard A.L. Stepnoe lesovedenie. M.: Lesnaya promyshlennost', 1971. 336 с.
2. Stadnichenko V.G. Pochvennye usloviya raiona Staro-Berdyanskoi i Altagirskoi lesnykh dach. Sb. nauch. rab. biolog. fak-ta DGU. K.: Izd-vo Kiev. un-ta, 1953. S. 11-21.

3. Abakumov E.V., Polyakov V.I., Chukov S.N. Podkhody i metody izucheniya organicheskogo veshchestva pochv karbonovykh poligonov Rossii (obzor). *Pochvovedenie*. 2022. N 7. S. 773-786. DOI: 10.31857/S0032180X22070024.
4. Kurganova I.N., Gerenyu V.O., Ipp S.L., Kaganov V.V., Khoroshaev D.A., Rukhovich D.I., Sumin Yu.V., Durmanov N.D., Kuzyakov Ya.V. Pilotnyi karbonovyi poligon v Rossii: analiz zapasov ugleroda v pochvakh i rastitel'nosti. *Pochvy i okruzhayushchaya sreda*. 2022. T. 5. N 2. S. e169. DOI: 10.31251/pos.v5i2.169.
5. Teben'kova D.N., Gichan D.V., Gagarin Yu.N. Vliyanie lesovodstvennykh meropriyatii na pochvennyi uglerod: obzor. *Voprosy lesnoi nauki*. 2022. T. 5. N 4. S. 1-37. DOI: 10.31509/2658-607x-202252-116.
6. Tarafdar A., Sowmya G., Yogeshwari K., Rattu G., Negi T., Awasthi M.K., Hoang A., Sindhu R., Sirohi R. Environmental pollution mitigation through utilization of carbon dioxide by microalgae. *Environmental Pollution*. 2023. No. 328. P. 121623. DOI: 10.1016/j.envpol.2023.121623.
7. Arenas, F.; Vas-Pinto, F., Marine algae as carbon sinks and allies to combat global warming. *Marine algae: biodiversity, taxonomy, environmental assessment and biotechnology*. CRC Press, Boca Raton, 2014. P. 178-193.
8. Kadhim B., Hamdan M., Hassan F.M., El-Sheekh M.M. Carbon sources and riverine algal biomass: an experimental study. *Egyptian journal of aquatic biology & fisheries*. 2024. Vol. 28. No. 2. P. 39-50. DOI:10.21608/EJABF.2024.344865.
9. Liang Y., Zhang Y., Wang N., Luo T., Zhang Y., Rivkin R.B. Estimating primary production of picophytoplankton using the carbon-based ocean productivity model: a preliminary study. *Frontiers in Microbiology*. 2017. No. 8. e1926. DOI: 10.3389/fmicb.2017.01926.
10. Chisholm S.W. Stirring times in the Southern Ocean. *Nature*. 2000. Vol. 407. No. 6805. P. 685-687. DOI:10.1038/35037696.
11. Kabirov R.R., Gaisina L.A. R.R Pokazateli produktivnosti pochvennykh vodoroslei v nazemnykh ekosistemakh. *Pochvovedenie*. 2009. N 12. S. 1475-1480.
12. Dettweiler-Robinson E., Nuanez M., Litvak M.E. Biocrust contribution to ecosystem carbon fluxes varies along an elevational gradient. *Ecosphere*. 2018. Vol. 9. No. 6. e02315. DOI: 10.1002/ecs2.2315.
13. Hamard S., Céréghino R., Barret M., Sytiuk A., Lara E., Dorrepaal E., Kardol P., Küttim M., Lamentowicz M., Leflaive J., Le Roux G., Tuittila E., Jassey V.E. Contribution of microbial photosynthesis to peatland carbon uptake along a latitudinal gradient. *Journal of Ecology*. 2021. Vol. 109. No. 9. P. 3424-3441. DOI: 10.1111/1365-2745.13732.
14. Wyatt K.H., Turetsky M.R., Rober A.R., Giroldo D., Kane E.S., Stevenson R.J. Contributions of algae to GPP and DOC production in an Alaskan fen: effects of historical water table manipulations on ecosystem responses to a natural flood. *Oecologia*. 2011. Vol. 169. No. 3. P. 821-832. DOI: 10.1007/s00442-011-2233-4.
15. Gray A., Krolkowski M., Fretwell P., Convey P., Peck L.S., Mendelova M., Smith A.G., Davey M.P. Remote Sensing reveals Antarctic Green Snow algae as important terrestrial carbon sink. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 2527. DOI:10.1038/s41467-020-16018-w.
16. Jassey V.E.J., Walcker R., Kardol P., Geisen S., Heger T., Lamentowicz M., Hamard S., Lara E. Contribution of soil algae to the global carbon cycle. *New Phytologist*. 2022. Vol. 234. No. 1. P. 64-76. DOI: 10.1111/nph.17950.
17. Mal'tseva I.A. Truntovi vodorosti derevnikh nasadzen' Staroberdyans'kogo lisu (Zaporiz'ka oblast'). *Visnik KhNAU. Seriya "Biologiya"*. 2004. N 2. S. 21-26.
18. Gollerbach M.M., Shtina E.A. *Pochvennye vodorosli*. Leningrad: Nauka, 1969. 143 c.
19. Kuzyakhmetov G.G., Dubovik I.E. *Metody izucheniya pochvennykh vodoroslei*. Ufa: Bashk. un-t, 2001. 56 c.
20. Sokolov A.V., Askinazi D.L. *Agrokhimicheskie metody issledovaniya pochv*. M.: Nauka, 1965. 436 c.

21. Adamczyk M., Lasek J., Skawińska A. CO₂ Biofixation and Growth Kinetics of *Chlorella vulgaris* and *Nannochloropsis gaditana*. *Applied Biochemistry and Biotechnology*. 2016. Vol. 179. No. 7. P. 1248-1261. DOI:10.1007/s12010-016-2062-3.
22. Gautam K., Pareek A., Sharma D.K. Exploiting microalgae and macroalgae for production of biofuels and biosequestration of carbon dioxide – a review. *International Journal of Green Energy*. 2022. Vol. 12. No. 11. P. 1122-1143. DOI: 10.1080/15435075.2014.893239.
23. Fedorov V.D., Korsak M.N., Borov Yu.A. Nekotorye itogi izucheniya pervichnoi produktsii fitoplanktona Belogo moraya. *Gidrobiologicheskii zhurnal*. 1974. T. 10. N 5. S. 9-14.
24. Puzanov A.V., Baboshkina S.V., Rozhdestvenskaya T.A., Balykin S.N., Egorova I.V., Meshkinova S.S. Vosstanovlenie raschetnymi metodami osnovnoi gidrofizicheskoi kharakteristiki i sravnenie vodouderzhivayushchei sposobnosti stepnykh (bassein reki Alei) i gornolesnykh (bassein reki Maima) pochv Altaya. *Mir nauki, kul'tury, obrazovaniya*. 2014. T. 49. N 6. S. 572-578.
25. Aleksakhina T.I., Shtina E.A. Pochvennye vodorosli lesnykh biogeotsenozov. M.: Nauka, 1984. 150 s.
26. Bokhorst S., Ronfort C., Huiskes A., Convey P., Aerts R. Food choice of Antarctic soil arthropods clarified by stable isotope signatures. *Polar Biology*. 2007. Vol. 30. No. 8. P. 983-990. DOI: 10.1007/s00300-007-0256-4.
27. Pakhomov O., Pokhylenko A., Maltseva I., Kulbachko Y. Participation of *Rossius kessleri* (Diplopoda, Julida) in the Formation of Algae Assemblages of Urbanized Territories. *Diversity*. 2022. Vol. 14. No. 7. P. 508. DOI: 10.3390/d14070508.
28. Rahmonov O., Cabala J., Bednarek R., Rozek D., Florkiewicz A. Role of soil algae on the initial stages of soil formation in sandy polluted areas. *Ecological Chemistry and Engineering S*. 2015. Vol. 22. No. 4. P. 675-690. DOI: 10.1515/eces-2015-0041.
29. Kuznetsova A.I., Lukina N.V., Tikhonova E.V., Gornov A.V., Gornova M.V., Smirnov V.E., Geras'kina A.P., Shevchenko N.E., Teben'kova D.N., Chumachenko S.I. Akkumulyatsiya ugleroda v peschanykh i suglinistykh pochvakh ravninnykh khvoino-shirokolistvennykh lesov v khode poslerubochnykh vosstanovitel'nykh suksessii. *Pochvovedenie*. 2019. N 7. S. 803-816. DOI: 10.1134/S0032180X19070086.

Сведения об авторах:

- Мальцева Ирина Андреевна
 Д.б.н., профессор, декан факультета естественных наук, ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»
 ORCID 0000-0002-7517-529X
 Maltseva Iryna
 Doctor of Biological Sciences, Professor, Dean of the Faculty of Natural Sciences, Melitopol State University
- Яковийчук Александр Владимирович
 К.б.н., доцент кафедры химии и химического образования, ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»
 ORCID 0000-0003-4667-3684
 Yakoviichuk Alexandr
 Candidate of Biological Sciences, Associate Professor of the Department of Chemistry and Chemical Education, Melitopol State University
- Мальцев Евгений Иванович
 Д.б.н., доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории Молекулярной систематики водных растений, Институт физиологии растений им. К.А. Тимирязева РАН
 ORCID 0000-0003-4710-319X

Maltsev Yevgenii

Doctor of Biological Sciences, Associate Professor, Leading Researcher at the Laboratory of Molecular Systematics of Aquatic Plants, K.A. Timiryazev Institute of Plant Physiology RAS

Черкашина Светлана Викторовна

Старший преподаватель кафедры биологии и биологического образования, ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»

Cherkashyna Svetlana

Senior Lecturer of the Department of Biology and Biological Education, Melitopol State University

Бредихина Юлия Леонидовна

К.с.-х.н., доцент, доцент кафедры географического образования и лесного дела, ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»

ORCID 0000-0001-9284-1082

Bredihina Yulia

Candidate of Agricultural Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Geographical Education and Forestry, Melitopol State University

Дукова Ирина Степановна

Ассистент кафедры химии и химического образования, ФГБОУ ВО «Мелитопольский государственный университет»

Dukova Irina

Assistant of the Department of Chemistry and Chemical Education, Melitopol State University

Для цитирования: Мальцева И.А., Яковийчук А.В., Мальцев Е.И., Черкашина С.В., Бредихина Ю.Л., Дукова И.С. Участие почвенных микроводорослей и цианобактерий лесных насаждений степной зоны в утилизации углекислого газа // Вопросы степеведения. 2024. № 4. С. 102-112. DOI: 10.24412/2712-8628-2024-4-102-112