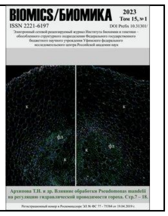
BIOMICS/БИОМИКА

ISSN 2221-6197 http://biomicsj.ru



ДИНАМИКА СОДЕРЖАНИЯ ФОТОСИНТЕТИЧЕСКИХ ПИГМЕНТОВ У ОСНОВНЫХ ЛЕСООБРАЗУЮЩИХ ПОРОД КАРБОНОВОГО ПОЛИГОНА «УРАЛ-КАРБОН»

Синенко О.С., Ермошин А.А., Тугбаева А.С., Трубецкой Д.В., Малева М.Г., Киселева И.С.

Уральский Федеральный Университет им. Первого Президента России Б.Н. Ельцина
Россия, г. Екатеринбург, ул. Мира 19, 620002
e-mail: olga_sinenko@list.ru

Резюме

Проблемы роста содержания парниковых газов в атмосфере и глобального потепления привели к созданию в России сети карбоновых полигонов, на которые возложена миссия оценки, учета и поиска технологических решений в целях уменьшения количества парниковых газов в атмосфере. Осенью 2021 г. был создан карбоновый полигон «Урал-Карбон», который на данный момент включает в себя две площадки, на которых произрастают основные лесообразующие породы. Первая характеризуется пихтово-еловыми и елово-пихтовым лесами, вторая – светлохвойным лесом южнотаежного типа. Для оценки потенциального вклада лесов Среднего Урала в фиксацию CO_2 оценивали динамику накопления фотосинтетических пигментов в хвое первого года у трех видов хвойных. Содержание пигментов определяли с июня по октябрь 2022 г. спектрофотометрически в этанольных экстрактах. Показано, что у *Pinus sylvestris* формирование хвои первого года началось позже, чем у *Abies sibirica* и *Picea abies*. Несмотря на более позднее, содержание хлорофиллов и каротиноидов в хвое экспоненциально росло и достигло практически одинаковых значений для всех трех видов в августе. У всех видов максимум содержания фотосинтетических пигментов приходился на начало осени, следовательно, можно предположить, что в этот период потенциальная способность хвойных пород к фиксации CO_2 максимальна, однако реальный фотосинтез может быть ограничен погодными условиями. При сопоставлении данных этого года с ранее полученными результатами, можно предположить, что в условиях роста температуры и концентрации CO_2 в атмосфере *P. sylvestris* будет более эффективно связывать углекислый газ, чем *A. sibirica* и *P. abies*. С возрастом в хвое первого года происходило опережающее накопление каротиноидов по сравнению с хлорофиллами, что может обеспечивать защиту фотосинтетического аппарата от фотоокисления в зимнее время.

Ключевые слова: хлорофиллы, каротиноиды, карбоновые полигоны, *Picea abies, Abies sibirica, Pinus sylvestris*

Цитирование: Синенко О.С., Ермошин А.А., Тугбаева А.С., Трубецкой Д.В., Малева М.Г., Киселева И.С. Динамика содержания фотосинтетических пигментов у основных лесообразующих пород карбонового полигона «Урал-карбон» // Biomics. 2023. Т.15(1). С. 19-25. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2023-3

DYNAMICS OF PHOTOSYNTHETIC PIGMENTS IN THE MAIN FOREST-FORMING TREES OF THE CARBON POLYGON "URAL-CARBON"

Sinenko O.S., Ermoshin A.A., Tugbaeva A.S., Trubetskoy D.V., Maleva M.G., Kiseleva I.S.

Ural Federal University named after B.N. Yeltsin, Russia, 620002, Mira Str., 19
e-mail: olga_sinenko@list.ru

Resume

Increasing of the greenhouse gases in the atmosphere and global warming have led to the creation of a network of carbon polygons in Russia, which are entrusted with the mission of assessing, accounting, and finding technological solutions in order to reduce the amount of these gases in the atmosphere. The Ural-Carbon polygon was created in the fall of 2021, and currently includes two sites, where the main forest-forming species grow. The first is characterized by fir-spruce and spruce-fir forests, the second - by light coniferous forest of the southern taiga type. To assess the potential contribution of the Middle Urals forests to CO_2 fixation, the dynamics of photosynthetic pigments in the needles of the first-year shoots was evaluated in three conifer species. The content of photosynthetic pigments was determined from June to October 2022 spectrophotometrically in ethanol extracts. It was shown that in *Pinus sylvestris*, the formation of the first year needles began later than in *Abies sibirica* and *Picea abies*. Despite the later formation, the content of chlorophylls and carotenoids in the needles grew exponentially and reached almost the same values for all three species in August. In all species, the maximal content of photosynthetic pigments was found at the beginning of autumn, therefore, it can be assumed that at that time the potential ability of conifers to fix CO_2 is maximal, but in reality photosynthesis can be limited by weather conditions. Comparing the data received in 2022 with the results obtained earlier, it can be assumed that, under conditions of increasing temperature and CO_2 concentration in the atmosphere *P. sylvestris* will more effectively fix carbon dioxide than *A. sibirica* and *P. abies*. It was shown that in the first year needles there was an advanced accumulation of carotenoids in comparison with chlorophylls with age, which can protect the photosynthetic apparatus from photooxidation in winter.

Keywords: chlorophylls, carotenoids, carbon polygons, *Picea abies, Abies sibirica*, *Pinus sylvestris*

Citation: Sinenko O.S., Ermoshin A.A., Tugbaeva A.S., Trubetskoy D.V., Maleva M.G., Kiseleva I.S. Dynamics of photosynthetic pigments in the main forest-forming trees of the carbon polygon "Ural-carbon". *Biomics*. 2023. V.15(1). P. 19-25. DOI: 10.31301/2221-6197.bmcs.2023-3 (In Russian)

Введение

В октябре 2021 г. на территории Свердловской области был открыт карбоновый полигон «Урал-Карбон», задачи которого определены как мониторинг содержания парниковых газов в атмосфере и оценка эмиссии и поглощения климатически активных газов. Кроме того, деятельность полигонов направлена на отработку технологических решений, направленных на уменьшение выбросов CO_2 и метана и увеличение их поглощения природными экосистемами (https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/).

Естественным процессом связывания CO_2 в атмосфере является процесс фотосинтеза, осуществляемый растениями, водорослями, некоторыми прокариотами. Доминирующими фотосинтетиками являются зеленые растения. Растительные организмы – это тонко настроенные системы, чутко реагирующие на изменение условий окружающей среды, в том числе и в первую очередь, изменением фотосинтетической деятельности. Известно, что масштабы фотосинтеза растений определяются как абиотическими условиями, так и особенностями организации фотосинтетического аппарата растений. [Ничипорович (Nichiporovich), 1982] Одной из важных его характеристик является содержание фотосинтетических пигментов – хлорофиллов и каротиноидов. Известно, что содержание этих пигментов в значительной мере коррелирует с фотосинтетической активностью растений [Адрианова и др. (Adrianova et al.), 2000] Количественные и качественные изменения пигментного комплекса являются чувствительным показателем физиологического состояния растений и активности их фотосинтетического аппарата [Дымова и др. (Dymova et al.), 2019] Сведения о пигментном фонде растительного покрова необходимы для оценки стока углерода и продуктивности крупных биомов [Воронин (Voronin P. Ju.), 2009].

Целью данной работы было изучение динамики содержания фотосинтетических пигментов в хвое первого года у основных лесообразующих пород *Picea abies, Abies sibirica,* и *Pinus sylvestris* в период вегетации 2022 г на территории карбонового полигона «Урал-Карбон».

Материалы и методы

Работа была выполнена на полигоне «Урал-Карбон» на двух экспериментальных площадках: в районе Коуровской астрономической обсерватории и на территории Уральского учебно-опытного лесхоза в районе п. Северка. Ландшафт участка близ Коуровской обсерватории представляет собой надпойменную террасу с притеррасным склоном и участком долины реки Чусовая. Растительность территории представлена темнохвойными лесами южнотаежного типа. Выбранные для отбора проб участки характеризуются преимущественно пихтово-еловыми и елово-пихтовыми лесами. Почвы дерново-подзолистые, горные бурые лесные, дерново-луговые. Площадка близ п. Северка характеризуется холмисто-увалистым мезорельефом и представляет собой водораздельный участок, растительность которого представлена разновозрастными светлохвойными лесами южнотаежного типа, преимущественно сосновыми и березово-сосновыми. Почвы дерново-подзолистые и горные бурые лесные. В районе Коуровской обсерватории были отобраны образцы *Picea abies* (L.) H. Karst. и *Abies sibirica* Ledeb, а на территории лесхоза *Pinus sylvestris* L. Сбор образцов происходил ежемесячно с июня по октябрь 2022 г., в четырех геодезических направлениях (Таб.1).

Таблица 1. Координаты площадок отбора образцов
Table 1. Coordinates of sampling sites

Площадка Samples code	Координаты Coordinates	Расположение Place	Объекты Species
CP1-top	57° 02' 16.28"С, 059° 33' 3.90"В	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP1-base	57° 02' 21.90"С, 059° 33' 11.97"В	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP2-top	57° 02' 22.76"С, 059° 32' 48.41"В	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP2-base	57° 02' 23.53"С, 059° 33' 1.84"В	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP3-top	57° 02' 1.42"С, 059° 33' 18.28'В'	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP3-base	57° 02' 6.05"С, 059° 33' 43.97"В	Коуровка	*P. abies, A. sibirica*
CP-S1	56° 52' 57.13"С, 060° 15' 9.84"В	Северка	*P. sylvestris*
CP-S2	56° 52' 17.73"С, 060° 16' 48.02"В	Северка	*P. sylvestris*

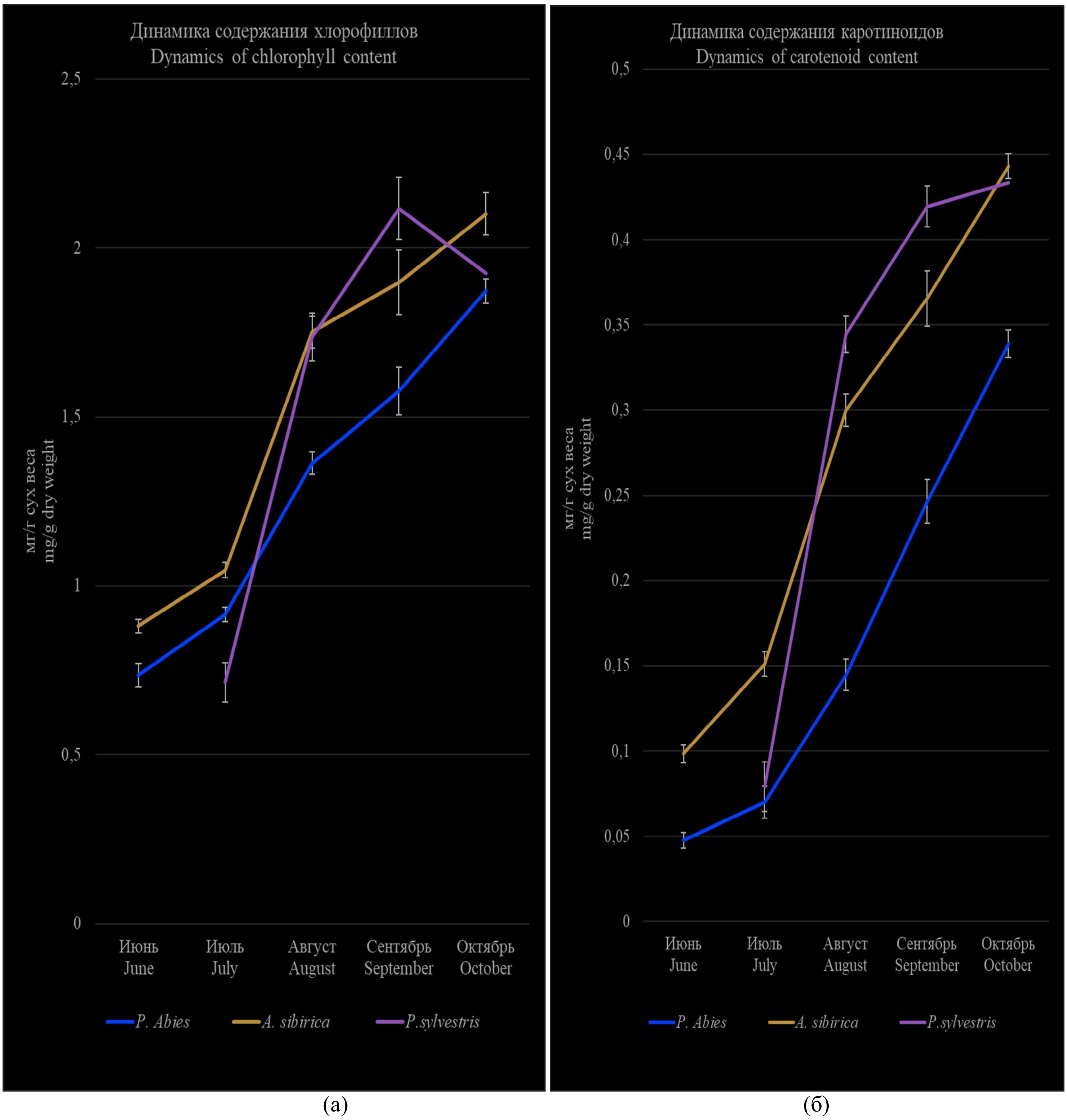
Содержание фотосинтетических пигментов определяли спектрофотометрически в этанольных (95%) экстрактах, рассчитывали по формулам [Lichtenthaler, 1987] с использованием значений оптической плотности экстрактов при 470, 649, 664 нм. Определение проводили в трех биологических и пяти аналитических повторностях.

Результаты и обсуждение

Продуктивность растений определяется важнейшим процессом синтеза органических веществ на Земле – фотосинтезом [Ничипорович (Nichiporovich), 1982]. В ряде случаев решающим фактором скорости накопления сухого вещества у растений является интенсивность фотосинтеза. Эффективное связывание и депонирование CO_2 напрямую зависит от эффективности работы фотосинтетических систем у растений и условий окружающей среды. Задача повышения эффективности процесса фотосинтеза в свою очередь требует детального изучения деятельности пигментной системы, выполняющей многообразные функции, связанные с поглощением и трансформацией солнечной энергии. В работе Ю.Е.Андриановой и И.А.Тарчевского [2000] показано, что определять потенциальную продуктивность лесного фитоценоза можно с помощью данных о пигментном составе фотосинтезирующих органов.

Содержание фотосинтетических пигментов определяли в хвое первого года на разных этапах ее развития. С ростом хвои у *A. sibirica* и *P. abies* происходило накопление *хл a*, *хл b* и каротиноидов (рис. 1(а) и (б)). По литературным данным основной рост хвои *P. abies* и *A. sibirica* завершается в августе [Винокурова и др. (Vinokurova et al.), 2008]. По нашим наблюдениям с июня по июль наблюдалось увеличение содержания хлорофиллов в 1,2 раза, а с июля по август – значительный рост количества этих пигментов в 1,5, 1,7 и 2,4 раза у *A. sibirica, P. abies* и *P. sylvestris,* соответственно. Далее рост этого показателя был менее выраженным – содержание фотосинтетических пигментов к октябрю возросло относительно августа 1,4, 1,2 и 1,1 раза у *A. sibirica, P. abies* и *P. sylvestris,* соответственно. В октябре, в конце вегетационного периода, различия в содержании хлорофиллов у разных видов были невелики, тем не менее, наименьшее содержание этих пигментов обнаружено у *A. sibirica*.

Каротиноиды являются дополнительными пигментами фотосистем, входят в состав светособирающих комплексов и выполняют фотопротекторную функцию как в летние, так и у хвойных в зимние месяцы. Вероятно, поэтому их содержание возрастает в осенний период, что так же подтверждают другие исследования [Титова (Titova), 2014; Софронова и др. (Sofronova et al.), 2007]. С июня по август содержание каротиноидов увеличилось в 2,1, 2 и 4,2 раза, а с августа по октябрь в 2,3, 1,5 и 1,3 раза у *A. sibirica, P. abies* и *P. sylvestris,* соответственно. К октябрю содержание каротиноидов у *P. abies* и *P. sylvestris* было больше, чем у *A. sibirica*.



(а) (б)

Рис. 1. Динамика содержания фотосинтетических пигментов: сумма хлорофиллов *a+b* (а), каротиноидов (б)

Fig. 1. Dynamics of photosynthetic pigment content sum of chlorophylls *a+b* (a) carotenoids (b)

Таблица 2. Соотношение пигментов / Tab. 2 Ratio of pigments

Вид Species	Месяц Month	Хл a/b Chl a/b	Хл a+b/Кар. Chl (a+b)/car
P. abies	Июнь June	5,36±0,87	24,08±0,18
	Июль July	3,32±0,05	20,88±0,61
	Август August	4,10±0,12	10,51±0,67
	Сентябрь September	2,27±0,04	6,53±0,15
	Октябрь October	2,31±0,02	5,56±0,09
A. sibirica	Июнь June	2,93±0,01	9,70±0,57
	Июль July	2,74±0,03	7,69±0,63
	Август August	3,67±0,13	6,01±0,25
	Сентябрь September	2,53±0,04	5,19±0,13
	Октябрь October	2,17±0,02	4,75±0,13
P. sylvestris	Июль July	2,95±0,07	9,80±0,87
	Август August	3,11±0,08	5,08±0,10
	Сентябрь September	2,26±0,02	5,04±0,09
	Октябрь October	2,13±0,02	4,40±0,11

Характеристикой соотношения фотохимически активного хлорофилла и антенных форм пигментов является отношение содержания хлорофилла *a* к хлорофиллу *b*. Это соотношение характеризует размер антенны и отражает уровень светового довольствия листьев. При достаточном освещении этот индекс составляет 2,2–3,0 [Титова (Titova), 2010], а при дефиците света снижается за счет увеличения содержания антенного хлорофилла *b*. Хл *a* формируется в онтогенезе раньше, чем хлорофилл b, поэтому, высокие значения соотношения хлорофиллов на начальных этапах роста хвоинок вполне объяснимы (таб. 2). К октябрю этот показатель снижался, что свидетельствует о накоплении антенного хлорофилла. Такие изменения были характерны для всех трех видов.

Изменение соотношения суммы хлорофиллов к каротиноидам (таб. 2) у всех древесных пород имело одинаковую тенденцию – этот показатель снижался к концу вегетационного сезона в 2–5 раз по сравнению с начальными этапами онтогенеза хвоинок, что связано с опережающим ростом содержания каротиноидов в сравнении с хлорофиллами. Очевидно, что накопление каротиноидов в осенние месяцы связано с ролью этих пигментов в реализации фотопротекторной функции, что важно для защиты фотосинтетического аппарата хвойных в зимнее время.

Полученные нами ранее данные [Киселева и др. (Kiseleva et al.), 2022] по оценке влияния разных факторов на интенсивность фотосинтеза изученных видов показали, что среди трех видов наибольшей фотосинтетической активностью обладает *P. sylvestris*, при этом ее температурный и световой оптимумы лежат выше, чем у *A. sibirica* и *P. abies*. Как было показано выше, содержание фотосинтетических пигментов у этого вида также больше, чем у темнохвойных пород *A. sibirica* и *P. abies*. Это согласуется с тем, что *P. sylvestris* является светолюбивым видом, произрастающим в светлохвойной тайге, в отличие от *A. sibirica* и *P. abies*, которые являются основными лесообразующими породами темнохвойной тайги. С учетом ранее полученных данных [Киселева и др. (Kiseleva et al.), 2022] и результатов настоящего исследования можно предположить, что в условиях роста концентрации CO_2 в атмосфере и температуры *P. sylvestris* будет более эффективно связывать углекислый газ, чем *A. sibirica* и *P. abies*. В то же время *A. sibirica* и *P. abies* как теневыносливые виды лучше усваивали CO_2 при низких значениях интенсивности света, при этом *P. abies* имела более высокие показатели интенсивности фотосинтеза, чем *A. sibirica*, что так же было отмечено другими авторами [Головко и др. (Golovko et al.), 2013].

Заключение

Результаты проведенной работы демонстрируют сезонную динамику накопления фотосинтетических пигментов в хвое первого года основных лесообразующих пород карбонового полигона «Урал-Карбон». Эта динамика определяется, прежде всего, онтогенетическими особенностями хвои. Пик содержания фотосинтетических пигментов в хвое первого года приходится на август-сентябрь, следовательно, можно предположить, что в этот период потенциальная способность хвойных пород к фиксации CO_2 максимальна, однако реальный фотосинтез может быть ограничен погодными условиями, связанными со снижением температуры окружающей среды, продолжительности светового дня и изменением спектрального состава света в осенние месяцы в сравнении с весенними и летними.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FEUZ-2023-0023.
The work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, Project No. FEUZ-2023-0023.

Литература

1. Андрианова Ю.Е., Тарчевский И.А. Хлорофилл и продуктивность растений // М.: Наука, 2000. 134 с.
2. Винокурова Р.И., Силкина О.В. Ростовые характеристики хвои деревьев пихты сибирской (*Abies sibirica* L.) и ели обыкновенной (*Picea abies* L.) // Вестник ПГТУ. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2008. №2. С.40-50.
3. Воронин П.Ю. Континентальный растительный покров как глобальный фактор фотосинтетического стока атмосферного углерода и эмиссии органического углерода при аридизации климата Северной Евразии // Фотосинтез: физиология, онтогенез, экология. Калининград: Изд-во ФГОУ ВПО “КГТУ”, 2009. С. 52−125.
4. Головко Т.К., Яцко Я.Н., Дымова О.В. Сезонные изменения состояния фотосинтетического аппарата трех бореальных видов хвойных растений в подзоне средней тайги на европейском Северо-Востоке // Хвойные бореальной зоны. 2013. №1-2. С. 73-78.
5. Дымова О.В., Головко Т.К. Фотосинтетические пигменты в растениях природной флоры таежной зоны европейского северо-востока России // Физиология растений. 2019. Т. 66, № 3, С. 198–206. DOI: 10.1134/S001533031903003
6. Ничипорович А.А. Физиология фотосинтеза и продуктивность растений // Физиология фотосинтеза. М.: Наука, 1982. С. 7–33.
7. Титова М.С. Сравнительный анализ накопления каротиноидов в хвое // Тихоокеанский медицинский журнал. 2014. №2 (56). С. 48-50.
8. Софронова В.Е., Чепалов В.А. Адаптивные изменения состава фотосинтетических пигментов хвои Pinus sylvestris L. при понижении температуры // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2007. №2. С. 34-39.
9. Титова М.С. Сезонная динамика содержания пигментов в хвое сосны сибирской (*Pinus sibirica*) и сосны корейской (*Pinus koraiensis*) // Вестник КрасГАУ. 2010. №8. С 77-81.
10. Kiseleva I.S., Sinenko O.S., Trubetskoy D.V. Photosynthetic CO2 assimilation by the main forest-forming coniferous species at the Ural-Carbon polygon // Материалы 3-ей Международной научной конференции PLAMIC2022 «Растения и микроорганизмы: биотехнология будущего» 3-8 октября 2022 г., Санкт-Петербург. 2022. С. 114.
11. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes // Methods in Enzymology, 1987 V. 148, С.350-382. doi: 10.1016/0076-6879(87)48036-1

References

1. Andrianova Ju.E., Tarchevskij I.A. Hlorofill i produktivnost' rastenij. M.: Nauka, 2000. 134 s. [Chlorophyll and plant productivity] (in Russian)
2. Vinokurova R.I., Silkina O.V. Rostovye harakteristiki hvoi derev'ev pihty sibirskoj (*Abies sibirica* L.) i eli obyknovennoj (*Picea abies* L.). *Vestnik PGTU. Serija: Les. Jekologija. Prirodopol'zovanie*. 2008. №2. P.40-50. [Growth characteristics of needles of Siberian fir (*Abies sibirica* L.) and spruce (*Picea abies* L.)] (in Russian)
3. Voronin P.Ju. Kontinental'nyj rastitel'nyj pokrov kak global'nyj faktor fotosinteticheskogo stoka atmosfernogo ugleroda i jemissii organicheskogo ugleroda pri aridizacii klimata Severnoj Evrazii. Fotosintez: fiziologija, ontogenez, jekologija. Kaliningrad: Izd-vo FGOU VPO “KGTU”, 2009. P. 52−125. [Continental vegetation cover as a global factor of photosynthetic runoff of atmospheric carbon and organic carbon emissions during aridization of the climate of Northern Eurasia] (in Russian)
4. Golovko T.K., Jacko Ja.N., Dymova O.V. Sezonnye izmenenija sostojanija fotosinteticheskogo apparata treh boreal'nyh vidov hvojnyh rastenij v podzone srednej tajgi na evropejskom Severo-Vostoke. *Hvojnye boreal'noj zony*. 2013. №1-2. P. 73-78. [Seasonal changes in the photosynthetic apparatus of three boreal coniferous plant species in the Middle taiga subzone in the European Northeast] (in Russian)

5. Dymova O.V., Golovko T.K. Fotosinteticheskie pigmenty v rastenijah prirodnoj flory taezhnoj zony evropejskogo severo-vostoka Rossii. *RJPF*. 2019. V 66, № 3, s. 198–206. DOI: 10.1134/S001533031903003 [Photosynthetic pigments in native plants of the taiga zone at the european northeast Russia] (In Russian)
6. Nichiporovich A.A. Fiziologija fotosinteza i produktivnost' rastenij. Fiziologija fotosinteza. M.: Nauka, 1982. P. 7–33. [Physiology of photosynthesis and plant productivity] (in Russian)
7. Titova M.S. Sravnitel'nyj analiz nakoplenija karotinoidov v hvoe. *Tihookeanskij medicinskij zhurnal*. 2014. №2 (56). P. 48-50 [Comparative analysis of carotenoid accumulation in conifers] (in Russian)
8. Sofronova V.E., Chepalov V.A. Adaptivnye izmenenija sostava fotosinteticheskih pigmentov hvoi *Pinus sylvestris* L. pri ponizhenii temperatury. *Prirodnye resursy Arktiki i Subarktiki*. 2007. №2 P. 34-39. [Adaptive changes in the composition of photosynthetic pigments of *Pinus sylvestris* L. needles with a decrease in temperature] (in Russian)
9. Titova M.S. Sezonnaja dinamika soderzhanija pigmentov v hvoe sosny sibirskoj (Pinus sibirica) i sosny korejskoj (Pinus koraiensis). *Vestnik KrasGAU*. 2010. №8. P 77-81. [Seasonal dynamics of pigment content in conifers of Siberian pine (*Pinus sibirica*) and Korean pine (*Pinus koraiensis*)] (in Russian)
10. Kiseleva I.S., Sinenko O.S., Trubetskoy D.V. Photosynthetic CO_2 assimilation by the main forest-forming coniferous species at the Ural-Carbon polygon. Materialy 3-ej Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii PLAMIC 2022 «Rastenija i mikroorganizmy: biotehnologija budushhego» 3-8 oktjabrja 2022 g., Sankt-Peterburg, 2022. P. 114.
11. Lichtenthaler H.K. Chlorophylls and Carotenoids: Pigments of Photosynthetic Biomembranes. *Methods in Enzymology*. 1987. V. 148. P.350-382. doi.org/10.1016/0076-6879(87)48036-1