

## ОСОБЕННОСТИ УГЛЕРОДНОГО И ВОДНОГО ЦИКЛОВ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ КРИОЛИТОЗОНЫ В КОНТЕКСТЕ ГЛОБАЛЬНОГО ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА

Т.Х. Максимов<sup>1,2</sup>, А.В. Кононов<sup>1,2</sup>, А.П. Максимов<sup>1</sup>, Р.Е. Петров<sup>1</sup>,  
М.П. Терентьева<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт биологических проблем криолитозоны Сибирского отделения Российской академии наук, Якутск, Россия, *t.c.maximov@ibpc.ysn.ru*

<sup>2</sup>Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Северо-восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова», Россия, *tcmx@mail.ru*

**Аннотация.** Представлены результаты многолетних исследований по изучению основных компонентов углеродного и водного циклов мерзлотных репрезентативных лесных экосистем на Северо-востоке России. Небольшая биомасса хвои при низком листовом ассимилирующем индексе (до 2,0) и укороченный период фотосинтетической деятельности обусловили пониженную чистую первичную продуктивность ( $NPP=3,1\pm0,3$  т га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) основной лесобразующей породы Центральной и Южной Якутии – лиственницы. Рост и развитие древесных растений в Якутии за короткий вегетационный период обеспечиваются высокими уровнями фотосинтеза и транспирации при сравнительно низких темновых и ночных дыхательных затратах на рост и поддержание. Годовой сток углерода в лиственничных лесах Южной Якутии составляет  $2,43\pm0,23$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>, а в Центральной Якутии –  $2,12\pm0,34$  т С га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>. По результатам исследований нами составлены схематические модели годового бюджета углерода и воды в мерзлотных лесных экосистемах, которые могут быть использованы в качестве фактического материала для верификации и оценки углеродного пула России и для разработки адекватных моделей регионального и глобального баланса углерода и воды в растительных сообществах.

**Ключевые слова:** многолетняя мерзлота, изменение климата, лес, углерод, вода

**DOI:** 10.31255/978-5-94797-319-8-492-495

Основной сферой деятельности физиолога является растение в природных экосистемах и задачи экологической физиологии включают количественные исследования энерго-, массообмена в природных экосистемах, экологию растений-эдификаторов в природных ценозах, вопросы защиты генофонда и другие проблемы [Мокроносов, 1983]. В природной среде сосредоточено около 80-90% всего хлорофилла биосферы и около 250 тысяч видов растений.

Начиная с шестидесятых годов прошлого века, основное внимание экологов было направлено на фотосинтетическую деятельность сельскохозяйственных и лесных растений. Увеличение объема работ и улучшение приборного обеспечения в течение последних 25 лет позволили проводить комплексные измерения микрометеорологических и экофизиологических параметров, не нарушая целостности растительного организма и экосистемы в целом. Результаты этих исследований могут быть использованы в создании и совершенствовании современных экологических моделей регионального и континентального бюджета углерода и воды в условиях глобального изменения климата.

Территория Якутии (3,1 млн. км<sup>2</sup>), занимающей значительную часть пространства Севера, играет важную роль в климатической системе планеты и является свободным резервом биосферы в пределах Единого циркумполярного экологического пространства. При глобальном потеплении климата именно в этом регионе рост температуры наибольший, и ответное воздействие криосферы на атмосферу более

значительное, чем где-либо. Здесь представлены все основные биотические и абиотические компоненты Севера, дающие отклик на изменения климата: Северный Ледовитый океан, многолетняя мерзлота, северная граница лесов, северные популяции растений и животных [Максимов, 2007].

Многолетние исследования проводились с 2000 по 2017 гг. в Центральной Якутии (62 °с.ш., 129 °в.д.) и в Южной Якутии (60 °с.ш., 133 °в.д.) в средне- и высокопродуктивных лиственничных лесах, соответственно. Для общего анализа чистого углекислотного газообмена экосистем (NEE) нами использованы автоматические системы эдди-корреляции как закрытого, так и открытого типов (частота измерений 30 Гц), установленные на разных высотах от 3 до 34 метров. Фотосинтетическую и дыхательную способность растений определяли общепринятыми методами с помощью инфракрасных газоанализаторов KIP-9010 (Japan), ADC-Shimadzu (UK) и Li-Cor LI-6400 (USA). Почвенное дыхание измерено с помощью двух систем – автоматической системы почвенного дыхания с четырьмя затемненными камерами с интервалом 15 минут (PP system, UK) и ручными газоанализаторами EGM-4 (PP system, UK). Поток биогенных летучих органических соединений (БЛОС) измерен системой эдди-ковариации с масс-спектрометром PTR-MS (Ionicon, Austria).

Основной стратегией растений криолитозоны является выживание и воспроизводство семян даже в ущерб высокой продуктивности. В условиях таежной зоны Центральной и Южной Якутии древесные растения имеют сравнительно небольшую биомассу фотосинтезирующих органов. Так, масса хвои лиственницы в Центральной Якутии (1,68 т га<sup>-1</sup>) в 1,5 раза ниже, чем в регионах с влажным климатом. Небольшая биомасса хвои при низком листовом ассимилирующем индексе (до 2,0) и укороченный период фотосинтетической деятельности обусловили пониженную чистую первичную продуктивность ( $NPP=3,1\pm0,3$  т га<sup>-1</sup> год<sup>-1</sup>) основной лесообразующей породы Центральной Якутии – лиственницы.

Рост и развитие древесных растений в Якутии за короткий вегетационный период обеспечиваются высокими уровнями физиологических процессов (фотосинтеза и транспирации) при сравнительно низких темновых и ночных дыхательных затратах на рост и поддержание. Большая межгодовая вариабельность процесса фотосинтеза и темного дыхания у растений *Larix cajanderi* свидетельствует о прекрасной ее приспособленности к своеобразным климатическим условиям криолитозоны.

Наши многолетние наблюдения показали, что в течение короткого, но теплого вегетационного периода (конец мая – конец первой декады сентября) мерзлотные лесные экосистемы являются стоком углекислого газа с максимальной поглотительной способностью до 6,1 кг С га<sup>-1</sup> сут<sup>-1</sup>. Несмотря на краткость периода «нетто-поглощение» (июнь, июль и август), древесные растения Якутии используют от 1,5 до 4,0 т С га<sup>-1</sup> сезон<sup>-1</sup>. Высокая фотосинтетическая активность древесных растений в условиях недостатка доступной влаги в почве и атмосфере обеспечивается усвоением влаги надмерзлотных слоев почвы, благодаря невысокой устьичной проводимости и высокого ксилемного потенциала.

Главенствующим фактором повышения продуктивности лесов криолитозоны при потеплении климата будет направленность педотурбационных процессов, напрямую воздействующих на круговорот основных органогенов в экосистеме. Продукционный процесс якутских популяций деревьев в условиях потепления климата будет в основном лимитирован эндогенными факторами – устьичной проводимостью, а также экзогенными – обеспеченностью растений влагой и минеральными органогенами, особенно азотом.

Высокочувствительные экосистемы криолитозоны могут быть не только значительными стоками углекислого газа атмосферы, предотвращающими глобальное

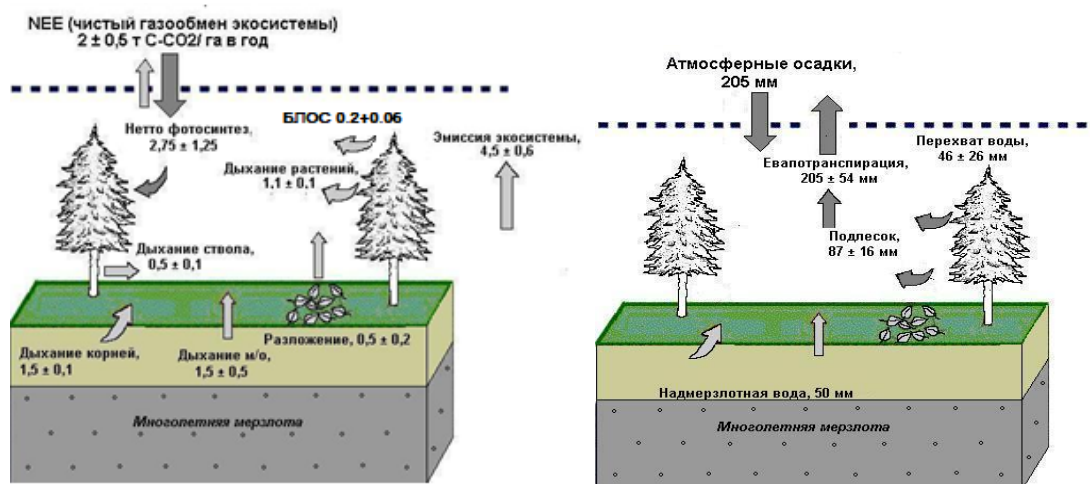
потепление климата, но также источниками, в зависимости от сезона года, климатических факторов и интенсивности лесных пожаров [Максимов и др., 2005; Максимов, 2007].

Главным фактором, влияющим на интенсивность дыхания почв лиственных лесов Якутии, является температура почвы. Кривая суточных колебаний дыхания почв в целом имеет U-образную форму, с максимумом в вечерние и ночные часы. В сезонном ходе эмиссии  $\text{CO}_2$  почвами максимум отмечаются с середины июля до середины августа, когда температура почвы достигает наибольших значений.

Во влажные годы интенсивность дыхания почвы возрастает в 1,2-1,7 раз, достигая  $5,2 \pm 0,2 \text{ т С га}^{-1} \text{ сезон}^{-1}$ . Приблизительно 50 мм воды поступает в почву после весеннего снеготаяния. Количество летних дождевых осадков является наиболее важным фактором, определяющим внутригодовое колебание влажности и интенсивности дыхания почвы. Годовая эмиссия углерода из почв Южной Якутии за исследованные годы была в среднем вдвое выше, чем в Центральной Якутии –  $7,91 \text{ т С га}^{-1}$  и  $3,54 \text{ т С га}^{-1}$ , соответственно.

Величина чистого углекислотного газообмена экосистем (NEE) в таежных экосистемах Южной Якутии превышает таковую Центральной в 1,5 раза. По многолетним эдди-корреляционным данным, годовой сток углерода в лиственных лесах Южной Якутии составляет  $2,43 \pm 0,23 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ , а в лиственном лесу Центральной Якутии –  $2,12 \pm 0,34 \text{ т С га}^{-1} \text{ год}^{-1}$ .

Леса криолитозоны превышают по стоку углерода луга и тундры России в среднем 1,5 и 4,5 раза, соответственно. В дальневосточных лиственных лесах Сибири ежегодно аккумулируется от 0,4 до 1,0 млрд. тонн С, что сопоставимо с данными по европейским и тропическим лесам.



**Рисунок. Годовой бюджет основных компонентов углеродного и водного циклов лиственных лесов криолитозоны.**

По результатам многолетних исследований нами составлена схематическая модель годового бюджета углерода и воды лиственных лесов (рисунок). Составленные схематические модели годового бюджета углерода и воды лиственных лесов криолитозоны свидетельствуют в пользу возрастающего дефицита влаги в условиях потепления мерзлотных почв и расхода запасенной в них влаги. Учитывая значительное уменьшение аккумуляции углекислоты в засушливые и увлажненные годы, повышенную частоту лесных пожаров и площади увеличения перестойных лесов, можно с большой уверенностью говорить о существенном изменении баланса в круговороте углерода и воды в мерзлотных

экосистемах при прогнозируемом потеплении климата. Эти данные могут быть использованы в качестве фактического материала для верификации и оценки углеродного пула России и для разработки адекватных моделей регионального и глобального баланса углерода и воды в растительных сообществах.

#### Литература

Мокроносов А.Т. Фотосинтетическая функция и целостность растительного организма. – М.: Наука, 1983. – 63 с.

Максимов Т.Х. Круговорот углерода в лиственничных лесах якутского сектора криолитозоны // Автореф. докт. дисс. – Якутск, 2007. – 46 с.

Максимов Т.Х., Долман А.Й., Мурс Э.Й., Ота Т., Сугимото А., Иванов Б.И. Параметры круговоротов углерода и воды в лесных экосистемах криолитозоны // Доклады РАН. – 2005. – Т. 408, № 8. – С. 684–686.

### FEATURES OF CARBON AND WATER CYCLES OF FOREST PERMAFROST ECOSYSTEMS IN THE CONTEXT OF GLOBAL CLIMATE CHANGE

T.C. Maximov<sup>1, 2</sup>, A.V. Kononov<sup>1,2</sup>, A.P. Maksimov<sup>1</sup>, R.E. Petrov<sup>1</sup>, M.P. Terentyeva<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute for Biological Problems of Cryolithozone Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russia, *t.c.maximov@ibpc.ysn.ru*

<sup>2</sup>M.K Ammosov North-Eastern Federal University, Yakutsk, Russia, *tcmx@mail.ru*

**Abstract.** The results of long-term investigations on the main components of the carbon and water cycles of permafrost representative forest ecosystems in the North-East of Russia are presented. Low biomass of needles with a low leaf area index (up to 2.0) and a shorted period of photosynthetic activity led to a decreased net primary productivity ( $NPP=3.1\pm0.3 \text{ t ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ ) of larch, the main forest-forming species in Central Yakutia. In Yakutia during a short growing season the growth and development of woody plants are provided by high levels of photosynthesis and transpiration with relatively low dark and night respiration expenses for growth and maintenance. The annual carbon sink in the larch forests of South Yakutia is  $2.43\pm0.23 \text{ t C ha}^{-1} \text{ yr}^{-1}$ , and in the larch forest of Central Yakutia is  $2.12\pm0.34 \text{ t C ha}^{-1} \text{ year}^{-1}$ . Based on the results of long-time research, we have compiled the schematic models of the annual carbon and water budget of larch forests, these models can be used as an exclusive data for verification and assessment of the Russian carbon pool and for developing adequate models of regional and global balance of carbon and water in plant communities.

**Keywords:** *permafrost, climate change, forest, carbon, water*