

**ОЦЕНКА ДИНАМИКИ БАЛАНСА УГЛЕРОДА В БОЛОТАХ ЮЖНОТАЕЖНОЙ ПОДЗОНЫ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ (ТОМСКАЯ ОБЛАСТЬ)**© 2022 Е. А. Головацкая , Е. А. Дюкарев , Е. Э. Веретенникова , Л. Г. Никонова ,  
С. В. Смирнов ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, Академический проспект 10/3, г. Томск, 634055, Россия. E-mail: [golovatskayaea@gmail.com](mailto:golovatskayaea@gmail.com)**Цель исследования:** оценка запасов и баланса углерода в олиготрофных и эвтрофных болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири.**Место и время проведения.** Исследования проводили на научно-исследовательском стационаре «Васюганье» (56° 57' с.ш., 82° 30' в.д.) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН на олиготрофных и эвтрофных естественных ненарушенных болотах. Экспедиционные работы проводили в течение вегетационного периода (май-сентябрь) с 1999 по 2012 гг.**Методология.** Изучение биологической продуктивности (запасов фитомассы и чистой первичной продукции) проводили укосным методом, подземную продукцию определяли методом монолитов. Оценку скорости трансформации растительных остатков растений-торфообразователей проводили методом частично изолированных проб. Скорость разложения и потери углерода рассчитывали как процент от исходной массы и исходного содержания углерода. Измерение эмиссии CO<sub>2</sub> проводили камерным методом. Годовой поток CO<sub>2</sub> с поверхности торфяной залежи был смоделирован на основе данных, полученных в результате натурных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> и выявленных зависимостей интенсивности потока от температуры воздуха. Дополнительные потери углерода, такие как эмиссия метана, зимние эмиссии CO<sub>2</sub> и метана, вынос углерода с болотными водами, были оценены на основе литературных данных. Годовой баланс углерода для исследуемых болотных экосистем был рассчитан как разница между эмиссией углерода и NPP болотных экосистем.**Основные результаты.** Основные запасы углерода в болотных экосистемах сосредоточены в торфяных залежах. В среднем для исследуемой территории они составляют: на олиготрофном болоте 74 кг/м<sup>2</sup>, эвтрофном – 161 кг/м<sup>2</sup>. Запасы углерода в виде органического вещества растений значительно ниже (в среднем в 50 раз). В результате многолетних исследований выявлено, что при высокой межгодовой вариабельности баланса углерода в период с 1999 по 2012 гг., для исследуемых болотных экосистем отсутствуют значимые тенденции изменений во временном ходе углеродного баланса. Ежегодное поглощение углерода болотными экосистемами ключевого участка «Бакчарский» площадью 212 тыс. га составляет около 3 × 10<sup>5</sup> т.**Заключение.** Болотные экосистемы южнотаежной подзоны Западной Сибири в настоящее время являются местом постоянного стока углерода и, кроме того, являясь устойчивыми природными образованиями, способствуют смягчению последствий изменения климата.**Ключевые слова:** болотные экосистемы; запасы углерода; эмиссия CO<sub>2</sub>; баланс углерода**Цитирование:** Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г., Смирнов С.В. Оценка динамики баланса углерода в болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири (Томская область) // Почвы и окружающая среда. 2022. Том 5. № 4. е194. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194)**ВВЕДЕНИЕ**

Биогеохимический цикл углерода является одним из важнейших процессов, протекающих в биосфере. Динамика содержания CO<sub>2</sub> в атмосфере привлекает внимание различных специалистов, поскольку наблюдается постоянное увеличение концентрации CO<sub>2</sub>, которое в основном связывают с антропогенной деятельностью (IPCC, 2021; Кобак, 1977; Noughton et al., 1983). При этом из общего потока CO<sub>2</sub> в атмосферу из разных источников, лишь около половины остается в атмосфере, а остальное представляет «неизвестный сток», которым может быть либо океан, либо наземные экосистемы. В результате обмена между атмосферой, растительностью, почвами и океанами, рост концентрации в атмосфере составляет меньше половины его поступления. Россия занимает особое место в глобальной климатической системе благодаря своим уникальным поглотителям и накопителям парниковых газов, лесным и болотным экосистемам, занимающим обширные

пространства. Бесспорным стоком CO<sub>2</sub> для России служит торфообразование на болотах (Заварзин, 1994). На долю торфяных болот приходится около 3,5% поверхности земли, что составляет 5×10<sup>6</sup> км<sup>2</sup>, а мировые запасы торфа в углеродном эквиваленте составляют 120–455 млрд. т углерода, из которых не менее 1/3 углеродного пула болот мира приходится на Россию (Вомперский, 1994). Согласно оценкам С.Э. Вомперского с соавторами (1999) общая площадь оторфованных почв в России составляет 369 млн га (21,6% территории страны). На территории Западной Сибири болотные экосистемы занимают почти 50% площади; в них содержится около 36% общего пула почвенного углерода России (Вомперский, 1994; Бирюкова, Орлов, 1995; Ефремов и др., 1994; Титлянова и др., 1998). Баланс углерода природных экосистем, в том числе и болотных, определяется по соотношению процессов поглощения углерода растениями (чистая первичная продукция) и выделения (эмиссия CO<sub>2</sub> и метана почвами). Наиболее детально изучены болотные экосистемы США, Канады, Финляндии и др. стран (Backeus, 1990; Bartsch, 1985; Dyck, Shay, 1999; Grigal et al., 1985; Vasander, 1982; Moore et al., 2002). На территории бывшего СССР проводились исследования в Белоруссии, Карелии, Западной Сибири, Дальнем Востоке (Валуцкий, Храмов, 1976; Ефремова и др., 1994; Косых и др., 2003; Миронычева-Токарева, 2001; Титлянова, 2001; Титлянова, 2007; Козловская и др., 1978; Елина и др., 1984; Копотева, 1986). В результате накоплен большой фактический материал; проводятся исследования особенностей биологического круговорота углерода на региональном уровне, оцениваются балансовые характеристики углеродного цикла, изучаются механизмы функционирования болотных экосистем (Ефремова и др., 1994; Косых и др., 2003; Миронычева-Токарева, 2001; Титлянова, 2001; Паников и др., 1993; Косых, 2001; Пьявченко, 1985; Храмов, Валуцкий, 1977; Титлянова и др., 1996, 2000).

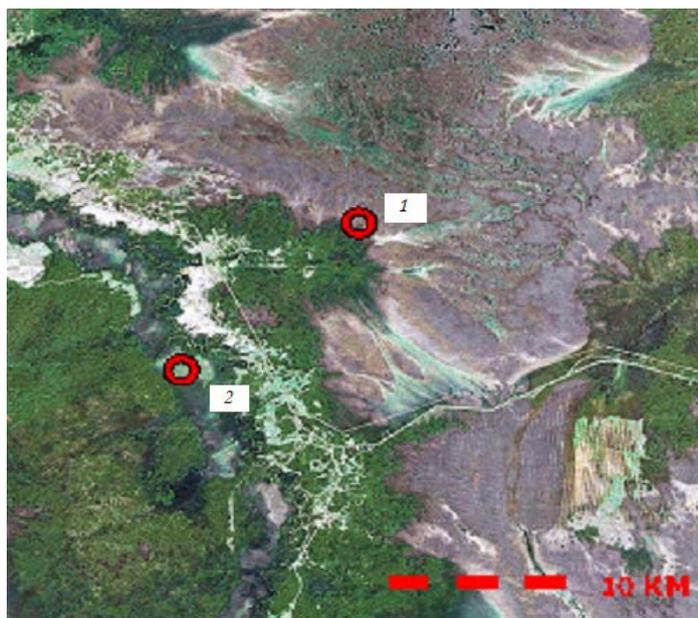
Основной поток CO<sub>2</sub>, идущий с поверхности болотных экосистем, формируется за счет высвобождения углерода, связанного в органическом веществе растений гетеротрофными организмами. При этом минерализация опада на болотах составляет от 25 до 60% в зависимости от типа болотных экосистем. Кроме того, болота считаются одним из основных поставщиков метана в атмосферу, хотя в результате деятельности микроорганизмов всего лишь 0,5–7% ежегодной первичной нетто-продукции болотного фитоценоза превращается в CH<sub>4</sub> (Вомперский, 1994; Brown et al., 1989; Aselmann, Crutzen, 1989).

Цель работы заключалась в оценке запасов углерода, а также баланса углерода в олиготрофных и эвтрофных болотах южнотаежной подзоны Западной Сибири.

#### МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследования проводили на территории восточной части Обь-Иртышского междуречья в пределах восточной окраины Васюганского плато – ключевой участок (КУ) «Бакчарский» (Бакчарский район, Томская область). Характерными особенностями климата для исследуемой территории является: продолжительная и суровая зима, значительный снежный покров, высокая относительная влажность воздуха, значительное количество осадков, превышающее испарение, короткое и теплое лето.

Исследования проводили на научно-исследовательском стационаре «Васюганье» (56° 57' с.ш., 82° 30' в.д.) Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН на олиготрофных и эвтрофных естественных ненарушенных болотах (рис. 1). В качестве модельного объекта наблюдения на олиготрофном болоте «Бакчарское» принята территория малого заболоченного водосбора р. Ключ (водосборная площадь 58 км<sup>2</sup>), в пределах которой был заложен ландшафтный профиль, пересекающий основные виды болотных фитоценозов: сосново-кустарничково-сфагновые фитоценозы (высокий рям, ВР, и низкий рям, НР), грядово-мочажинный комплекс (гряда, ГМКГ, и мочажина, ГМКМ) и осоково-сфагновую топь (ОТ). Мощность торфяной залежи на ландшафтном профиле изменяется от 100 до 350 см (Головацкая, 2009). Для сравнения режимов верховых и низинных болотных экосистем проводили исследования на эвтрофном болоте «Самара». Исследование проводили в центральной части эвтрофного болота – ерничково-осоковом фитоценозе (СЕ), на окраине – осоково-ерничково-гишномом фитоценозе (СО) и в сосново-елово-кедрово-березовой согре (СС). Мощность торфяной залежи эвтрофного болота – 375–430 м. Подробное описание растительного покрова исследуемых болотных экосистем приведено ранее (Головацкая, 2009).



**Рисунок 1.** Объекты исследования на территории КУ «Бакчарский»: 1 – Ландшафтный профиль олиготрофного болота «Бакчарское»; 2 – эвтрофного болота «Самара». Космический снимок Landsat 7, сенсор ETM+, дата съемки 7 июля 1999 г.

Изучение биологической продуктивности (запасов биомассы) проводилось в период максимального ее развития в конце июля - начале августа. Надземную продукцию определяли укосным методом (без учета древесного яруса), подземную - методом монолитов (Головацкая, 2009). Чистая первичная продукция фитоценоза (NPP) была рассчитана как сумма надземной и подземной продукции (Титлянова и др., 1988).

В 2008 году был заложен опыт по определению скорости разложения растений-торфообразователей методом закладки растительности в торф (Козловская и др., 1978). Для этого осенью 2008 г. на болоте были собраны растения, характерные для исследуемых болотных фитоценозов (*Sph. angustifolium*, *Sph. magellanicum*, *Sph. fuscum*, *Andromeda polifolia*, *Ledum palustre*, *Betula nana*, *Vaccinium vitis-idea*, *Chamaedaphne calyculata*, *Vaccinium oxycoccus*, *Pinus sylvestris*, *Menyanthes trifoliata*, *Rubus chamaemorus*, *Carex rostrata*, *Eriophorum vaginatum*, *Comarum palustre*, *Scheuchzeria palustris*). Высушенные образцы в нейлоновых мешочках (масса навески 3-6 г) закладывали в торфяную залежь на глубину 10 см от поверхности в сентябре 2008 г. Через 12 месяцев в образцах определяли убыль массы растительного вещества весовым методом, а также изменение содержания углерода по общепринятым методикам (Агрохимические методы..., 1975; Пономарева, Плотникова, 1975). Скорость разложения и потери углерода рассчитывали как процент от исходной массы и исходного содержания углерода.

С 1999 по 2002 гг. измерения эмиссии CO<sub>2</sub> проводили два раза в месяц абсорбционным методом в трехкратной повторности (Головацкая, 2002). С 2004 года измерение эмиссии CO<sub>2</sub> проводилось с использованием инфракрасного газоанализатора ОПТОГАЗ 500.4 (ЗАО «ОПТЭК», Санкт-Петербург, Россия). Измерение эмиссии CO<sub>2</sub> проводилось камерным методом (объем камеры 16,6 л, площадь основания 590 см<sup>2</sup>) (Головацкая, Дюкарев, 2011). Скорость эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности торфяной залежи рассчитывали по формуле:

$$F = dc \times V/S \quad (1)$$

где F – скорость эмиссии CO<sub>2</sub>, мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup>/час; dc – изменение концентрации CO<sub>2</sub> в камере, мг/м<sup>3</sup> ч; V – объем камеры, м<sup>3</sup>; S – площадь основания камеры, м<sup>2</sup>.

Сравнительные измерения эмиссии CO<sub>2</sub> абсорбционным методом и с помощью газоанализатора показали, что абсорбционный метод дает заниженные (в 2,5-2,7 раз) оценки интенсивности потока CO<sub>2</sub>. В соответствии с этими данными для потоков, измеренных в течение 1999-2003 гг., была проведена дополнительная коррекция.

Годовой поток CO<sub>2</sub> с поверхности торфяной залежи был смоделирован на основе данных, полученных в результате натуральных измерений эмиссии CO<sub>2</sub> и выявленных зависимостей интенсивности потока от температуры воздуха:

$$F = a \exp (b T), \quad (2)$$

где  $F$  – поток  $\text{CO}_2$ ,  $T$  – температура воздуха,  $b$  – коэффициент чувствительности эмиссии к температуре,  $a$  – коэффициент, соответствующий эмиссии  $\text{CO}_2$  при  $T=0$  °C.

Дополнительные потери углерода, такие как эмиссия метана, зимние эмиссии  $\text{CO}_2$  и метана, вынос углерода с болотными водами были оценены на основе литературных данных (Panikov, Dedysh, 2000; Nykanen et al., 2003; Heikkinen et al., 2002; Heikkinen et al., 2004; Вомперский, 1994; Прокушкин, Гуггенбергер, 2007; Veretennikova, Dyukarev, 2021). Годовой баланс углерода для исследуемых болотных экосистем был рассчитан как разница между потоками углерода ( $\text{CO}_2$ - и  $\text{CH}_4$ -эмиссия, вынос с болотными водами) и NPP болотных экосистем.

Погодные условия периода исследования (1999-2012 гг.) оценивались по данным метеостанции «Бакчар» (57°05' N, 81°55' E).

Плотность торфа, содержание углерода в торфе и растительных остатках определяли в Лаборатории мониторинга лесных экосистем ИМКЭС СО РАН по стандартным методикам.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

### Запасы углерода в болотных экосистемах

Основные запасы углерода болотных экосистем сосредоточены в биомассе растений и торфяных залежах. При этом время пребывания углерода в том или ином резервуаре различно. Для растительности оно зависит от продолжительности жизни растений, и, как правило, в болотных экосистемах составляет от 1-2 лет у травянистых растений, до нескольких десятков лет у древесных. В торфяной залежи углерод консервируется на несколько тысяч лет.

**Запасы углерода в растительности.** Запасы фитомассы определяются составом растительного покрова (Головацкая, 2009). Оценка запасов фитомассы показала, что среди исследуемых болотных фитоценозов максимальные запасы характерны для эвтрофного болота, а на олиготрофном болоте максимальными запасами фитомассы характеризуется высокий рям (табл. 1). Для всех фитоценозов максимальный вклад в запасы фотосинтезирующей фитомассы вносят зеленые части мхов (46-91%). Также достаточно велико содержание листьев кустарничков (21-28%), за исключением открытой топи, мочажины ГМК и согры эвтрофного болота, где кустарничковый ярус слабо выражен. На открытой топи и эвтрофном болоте увеличивается роль травянистых растений в запасе фотосинтезирующей фитомассы (от 17 на открытой топи до 76% у осоково-ерникового фитоценоза) (табл. 1).

**Таблица 1**

Запасы растительного вещества (среднее за 1999-2012 гг.), г/м<sup>2</sup>

Фракции фитомассы		Фотосинтезирующая фитомасса	Нефотосинтезирующая фитомасса	Итого фитомасса
Олиготрофное болото «Бакчарское»	ВР	405 ± 63*	864 ± 327	1269 ± 390
	НР	456 ± 104	716 ± 311	1172 ± 415
	ОТ	433 ± 88	574 ± 147	980 ± 980
	ГМКГ	294 ± 23	584 ± 239	878 ± 170
	ГМКМ	302 ± 18	267 ± 58	569 ± 76
Эвтрофное болото «Самара»	СЕ	395 ± 79	1669 ± 497	2064 ± 576
	СО	189 ± 89	1546 ± 214	1735 ± 303
	СС	195 ± 10	1762 ± 791	1957 ± 801

Примечание.

\* – представлены среднее значение ± стандартное отклонение.

ВР – высокий рям; НР – низкий рям; ОТ – осоково-сфагновая топь; ГМКГ – гряда грядово-мочажинного комплекса; ГМКМ – мочажина грядово-мочажинного комплекса; СЕ – ерниково-осоковый фитоценоз; СО – осоково-ерниково-гипновый фитоценоз; СС – сосново-елово-кедрово-березовый согра (здесь и далее в таблицах и на рисунках).

Полученные нами данные в целом соответствуют оценкам, полученным ранее для западносибирских болот (Титлянова и др., 1995; Косых, 2003; Валуцкий, Храмов, 1976).

Запасы фитомассы древесного яруса для болотных экосистем оцениваются крайне редко и, в основном, для оценки изменения растительного покрова при осушении болот в целях лесомелиорации (Елина, Кузнецов, 1977; Биогеоэкологическое..., 1982; Валетов, 1992, 1999; Грабовик, 2006, 2008; Кузнецов, Саковец, 2006). Наиболее изученными в этом плане являются болотные экосистемы европейской части России, территории Беларуси, Швеции, Финляндии,

Норвегии и др. стран (Медведева, 1978; Медведева, Егорова, 1977; Биогеоэкологическое ..., 1982; Валетов, 1992; Кузнецов, Саковец, 2006). На территории Западной Сибири подобные исследования также проводились (Храмов, Валуцкий, 1977; Ефремов и др., 2005; Углерод ..., 1994; Косых, Коронатова, 2010; Копотева, Косых, 2011; Головацкая, Никонова, 2017). На верховых болотах продукция древесного яруса не велика, а сами деревья не представляют ценности для хозяйственных нужд, что, видимо, и является основной причиной недостаточного внимания к древесному ярусу болот. Однако, с точки зрения оценки баланса углерода, в болотных экосистемах исследование продукции и запасов биомассы именно древесного яруса является актуальной задачей, что также обусловлено широким распространением сосново-кустарничково-сфагновых биоценозов на олиготрофных болотах (Вомперский и др., 2005, 2011). Для низкого рьяма Бакчарского болота была проведена оценка запасов древесного яруса. При пересчете деревьев на пробной площади к древостою относили деревья диаметром 2 см и больше. Формула древостоя 10СедК, средняя высота древесного яруса 1,4 м (максимальная 3,6 м), средний диаметр ствола 1,4 см (максимальный – 7 см). Количество деревьев на 1 га 12 560 шт., подрост сильно развит – 19 600 шт./га. Исследование запасов фитомассы древесного яруса рьяма Бакчарского болота показало, что в зависимости от размеров дерева запасы фитомассы изменяются от 0,3 до 4,0 кг, в среднем составляя 0,67 кг/м<sup>2</sup>. Основная часть биомассы сосредоточена в стволах (в среднем 54%). На долю хвои в запасах биомассы приходится около 18%. Согласно литературным данным (Козловская и др., 1978), масса корней деревьев составляет 25% от веса их надземной части.

Согласно данным, полученным нами в результате анализа химического состава растений-торфообразователей, содержание углерода в растениях составляет в среднем 46%. Минимальное содержание углерода характерно для сфагновых мхов, максимальное – для кустарничков. Для оценки запаса углерода в болотной растительности использовали данные по среднему содержанию углерода в разных группах растений и запасам фитомассы каждой группы. С учетом древесного яруса запасы углерода в растительном покрове возрастают в 2-8 раз (табл. 2).

Таблица 2

Запасы углерода в исследуемых торфяных залежах и растительности олиготрофных и эвтрофных болот, кг/м<sup>2</sup>

Пул углерода	«Бакчарское»					«Самара»		
	ВР	НР	ОТ	ГМКГ	ГМКМ	СЕ	СО	СС
Растительность*	1,3	1,2	1,0	0,9	0,6	2,1	1,7	2,0
Древесный ярус	2,7**	0,8	0	0,1	0	-	-	17
Торф	46	66	109	65	86	137	159	189

Примечание.

\* – без учета древесного яруса; \*\* – по литературным данным (Храмов, Валуцкий, 1977); прочерк – нет данных.

**Содержание углерода в торфе.** Результаты исследования показали, что в исследуемых торфах олиготрофного болота «Бакчарское» содержание общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ) изменяется от 39 до 53%, в среднем составляя 45%. Среднее содержание  $C_{\text{общ}}$  в торфах эвтрофного болота составляет 33%, изменяясь в пределах от 12 до 50%.

На основании данных по содержанию углерода в торфе, плотности торфа и мощности исследуемых торфяных залежей был выполнен расчет содержания углерода во всей торфяной толще для всех исследуемых фитоценозов, а также в слое торфа 1 м (рис. 2). Общие запасы углерода в торфе в первую очередь определяются мощностью торфяной залежи. Однако следует учитывать, что существенную роль играет также плотность торфа, слагающего торфяную залежь, которая изменяется в широких пределах, как для олиготрофного (41-157 г/дм<sup>3</sup>), так и для эвтрофного (76-540 г/дм<sup>3</sup>) болот. Общие запасы углерода для всех исследуемых торфяных залежей приведены в таблице 2.

Как правило, оценки содержания углерода в почвенном покрове выполняются для верхнего метрового слоя. Согласно оценкам, полученным О.Н. Бирюковой и Д.С. Орловым (1995), запасы углерода в метровом слое почвы на территории России в среднем составляют 17 кг/м<sup>2</sup>. Болотные экосистемы по занимаемой площади и запасам углерода являются одним из важнейших резервуаров углерода. По разным оценкам запасы углерода в метровом слое торфяной залежи изменяются от 36

до 81 кг/м<sup>2</sup> (Боч и др. 1994; Вомперский и др., 1994; Ефремов и др., 1994; Stolbovoi, 2002; Честных и др., 2004). Суммарные оценки запасов углерода в болотных экосистемах существенно различаются, что связано с недостаточно достоверными данными по площадям, занимаемым разными типами болот. С учетом того, что торфяная залежь не ограничивается 1-метровым слоем, а в среднем составляет, например, для Западной Сибири 2,7 м (Лисс и др., 2001), остается неучтенным значительное количество углерода, депонированного в торфяных залежах. Общие запасы углерода в исследуемых торфяных залежах составляют от 46 до 189 кг/м<sup>2</sup>, в зависимости от мощности торфяных залежей (см. рис. 2).

Сопоставление данных по запасам углерода в торфе и растительности, показало, что углерод торфяной залежи (1 м) значительно превышает (в среднем в 14 раз) запасы углерода в биомассе растительности. Для почв и биомассы мира и России это соотношение составляет всего лишь 3 и 7,5 раз соответственно (Пулы и потоки..., 2007).

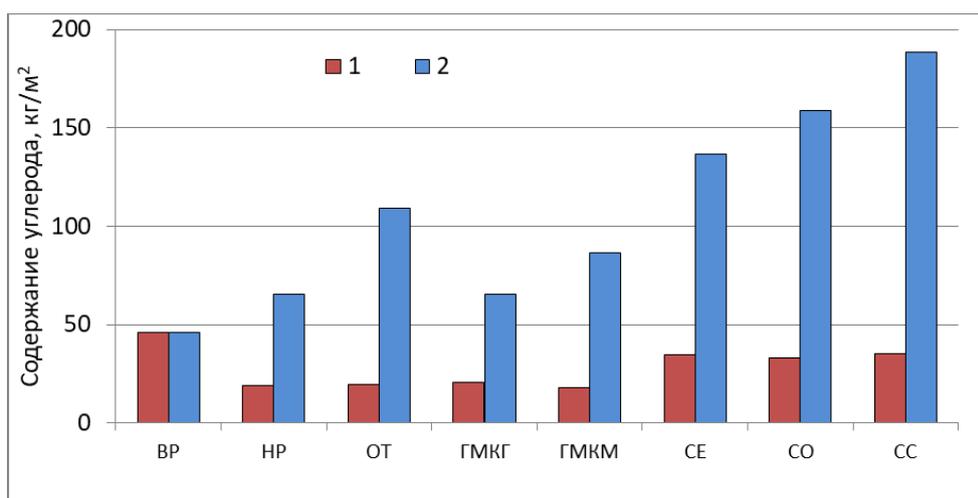


Рисунок 2. Запасы углерода в 1-метровом слое торфа (1) и в торфяной залежи (2).

#### Баланс углерода болотных экосистем

**Чистая первичная продукция.** Результаты исследования показали, что в среднем олиготрофные болотные экосистемы имеют близкие величины NPP травяно-кустарничково-мохового яруса на высоком и низком рьяе, открытой топи и ГМК, изменяясь от 542 г/м<sup>2</sup> на открытой топи до 659 на гряде ГМК. NPP на эвтрофном болоте в среднем незначительно отличается от продукции олиготрофного болота (рис. 3). Основной вклад в продукцию на исследуемых олиготрофных болотных фитоценозах вносят корни трав и кустарничков (44-60%). На эвтрофном болоте вклад подземной продукции составляет от 31 до 63% (см. рис. 3).

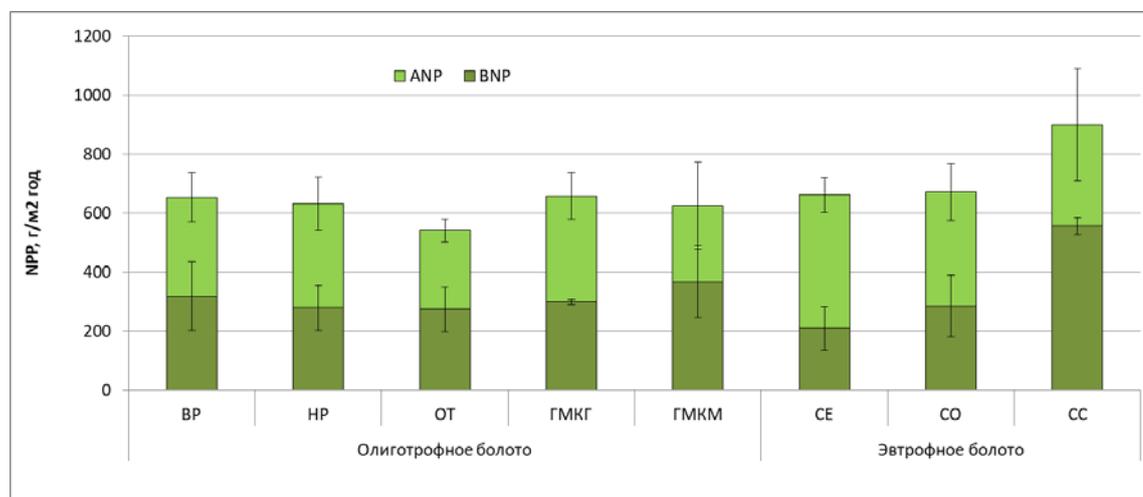
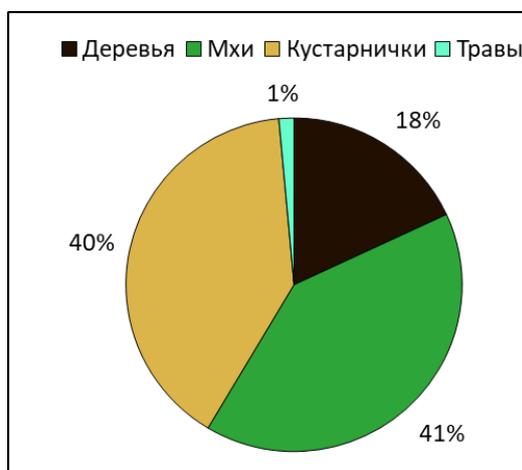


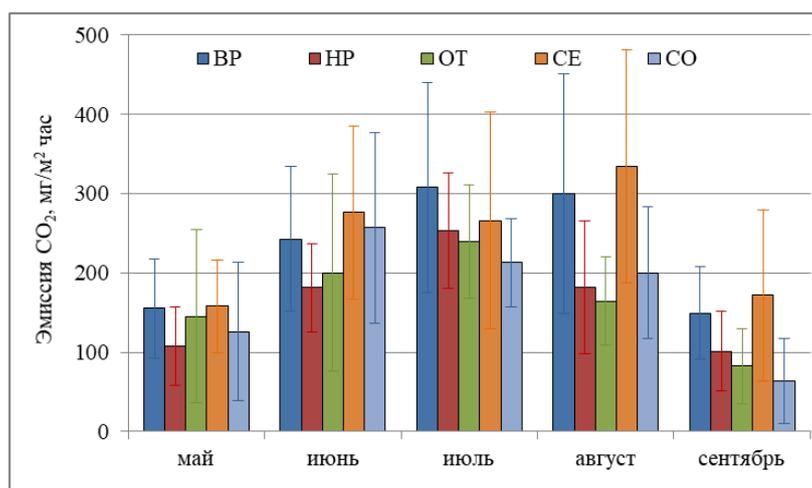
Рисунок 3. Чистая первичная продукция на исследуемых болотных фитоценозах, среднее за 1999-2012 гг.: ANP и BNP – надземная и подземная продукция.

Годичный прирост древесного яруса низкого ряма болота «Бакчарское» в среднем на единицу площади составляет 48 г/м<sup>2</sup>. Основной вклад в продукцию древесного яруса дает хвоя последней генерации (48%). Таким образом, доля древесного яруса в продукции сосново-кустарничково-сфагновых фитоценозов на низком ряме Бакчарского болота составляет 18% (рис. 4).



**Рисунок 4.** Вклад древесного яруса в надземную продукцию сосново-кустарничково-сфагновых биоценозов: 1 – деревья, 2 – мхи, 3 – кустарнички, 4 – травы.

**Сезонная динамика выделения CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофных и эвтрофных болот.** Эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофных фитоценозов на «Бакчарском» болоте имеет четко выраженный сезонный ход (рис. 5). Динамика эмиссии CO<sub>2</sub> определяется гидротермическими условиями вегетационного периода (Bubier et al., 2003; Aurela et al., 2001). Интенсивность эмиссии CO<sub>2</sub> изменяется от 20-60 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> час весной (май) и осенью (сентябрь) до 400-600 мг CO<sub>2</sub>/м<sup>2</sup> час в середине лета (июль) в зависимости от типа болотной экосистемы. В летний период (июль-август) значительно возрастает амплитуда суточных колебаний эмиссии CO<sub>2</sub> во всех исследуемых фитоценозах. Интенсивность выделения CO<sub>2</sub> на эвтрофном болоте в течение вегетационного периода в среднем не отличается от динамики на других болотных фитоценозах (см. рис. 5). Практически в течение всего времени наблюдения окраина болота характеризуется более низкой интенсивностью выделения CO<sub>2</sub>; возможно, это связано с тем, что при высоких уровнях болотных вод на окраине болота наблюдается постоянный поверхностный сток воды, в результате которого, вероятно, и происходит вынос углерода с болотными водами.



**Рисунок 5.** Среднемесячная эмиссия CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофных фитоценозов на болоте «Бакчарское» (за период 1999-2012 гг.).

Изменчивость потоков увеличивается во всех исследуемых экосистемах в сухие годы. Снижение потока CO<sub>2</sub> во влажные годы и увеличение дыхания в сухие годы, также установлено и другими авторами (Strack et al., 2006; Moore, Dalva, 1993; Bubier et al., 2003).

Эмиссия  $\text{CO}_2$  с поверхности торфяных почв болотных экосистем имеет тесную связь с температурой воздуха и почвы (Wickland et al., 2001; Lafleur et al., 2005; Strack et al., 2006; и др.). Для оценки влияния температуры воздуха на изменения потока  $\text{CO}_2$  был проведен корреляционный анализ и выявлена положительная зависимость между эмиссией  $\text{CO}_2$  и температурой воздуха. Линейный коэффициент корреляции Пирсона ( $r$ ) равен 0,63, что свидетельствует об интенсификации эмиссии  $\text{CO}_2$  с увеличением температуры воздуха. Выявленные зависимости между температурой воздуха и потоком  $\text{CO}_2$  использовались для оценки потоков на исследуемых болотах в течение вегетационных периодов 1999-2012 гг.

**Баланс углерода.** Углеродный баланс любой экосистемы характеризует чистый углеродный поток, представляющий собой сумму валовой первичной продукции и валового дыхания как разнонаправленных потоков. Особенность болот обуславливается незамкнутостью круговорота веществ, когда системы возвращают в биосферу меньше веществ, чем забирают из нее. Накопление торфа происходит за счет более медленного разложения растительных остатков. Современную скорость депонирования торфа и соответственно углерода, косвенно можно оценить, используя данные по NPP, отмиранию и скорости разложения растительных остатков.

Количественную оценку депонирования углерода получали путем вычитания потерь углерода при разложении растительных остатков из годового опада (табл. 3). Исходя из полученных данных, текущая скорость аккумуляции углерода в среднем для исследуемых фитоценозов составляет 147 г  $\text{C}/\text{м}^2$  год, изменяясь от 122 г  $\text{C}/\text{м}^2$  год на эвтрофном болоте, до 163 г  $\text{C}/\text{м}^2$  год на высоком ряме Бакчарского болота. Приведенные в таблице 3 значения соответствуют накоплению углерода в результате разложения растительных остатков на поверхности (опада трав, кустарничков и мхов) и разложения опада корней в 20 сантиметровом слое торфа. Максимальный вклад в депонирование углерода оказывают корневые системы трав и кустарничков (46-73%), за счет медленной скорости деструкции. Значительную роль в накоплении углерода играют сфагновые мхи (во всех исследуемых фитоценозах) и кустарнички (на рямовых участках олиготрофных болот и на эвтрофном болоте).

Таблица 3

Депонирование углерода при разложении растительных остатков, г  $\text{C}/\text{м}^2$  год

Болото, фитоценоз		NPP	Ежегодный опад	Потери С при разложении	Ежегодное депонирование С в слое 20 см
«Бакчарское»	ВР	294	212	49	163
	НР	284	191	36	155
	ОТ	243	189	41	148
«Самара»	СЕ	297	189	67	122

Одним из методов оценки текущего связывания углерода болотами является оценка по разнице между NPP и эмиссией  $\text{CO}_2$ , так как накопление углерода происходит не только в виде торфа, но и в виде растительности. Наиболее часто при оценке депонирования углерода используют измеренные данные по NPP и эмиссии углекислого газа с поверхности почвы. Однако, на наш взгляд, такая оценка для болотных фитоценозов может быть существенно занижена, так как эмиссия  $\text{CO}_2$  на болотных фитоценозах определяется с поверхности мохового покрова, то есть включает в себя не только эмиссию из торфяной залежи, но и в результате дыхания сфагновых мхов. Тогда как NPP это накопление углерода растениями в результате процесса фотосинтеза за вычетом дыхания растений. Следовательно, в данном случае мы дважды учитываем дыхание мхов. Согласно данным А.В. Наумова (2009) дыхание сфагновых мхов в зависимости от вида и местообитания составляет от 54 до 87 мг  $\text{C}/\text{м}^2$  час. Полученные в результате значения скорости накопления углерода, оцененные балансовым методом (табл. 4), сопоставимы со скоростью накопления углерода в торфе при разложении растительных остатков (см. табл. 3). Современное накопление углерода составляет в среднем около 50% от NPP, изменяясь от 26 до 66% в зависимости от типа фитоценоза.

В результате преобладания процесса аккумуляции углерода (NPP) над его выделением (эмиссия  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$ , вынос углерода с болотными водами), в болотах происходит накопление органической массы торфа. При близких значениях NPP, полученных для олиготрофных болотных фитоценозов КУ «Бакчарский», из-за различия в интенсивности потоков углекислого газа с поверхности торфяной залежи баланс углерода может отличаться в 1,5-2 раза в зависимости от типа фитоценоза (например, высокий и низкий рям). Эвтрофное болото является более продуктивным по

сравнению с олиготрофным, но за счет более богатых минеральных условий, процессы трансформации органического вещества протекают интенсивнее, потоки  $\text{CO}_2$  выше по сравнению с олиготрофным болотом. В результате баланс углерода на эвтрофном болоте в среднем в 1,5 раза ниже, чем на олиготрофном.

Таблица 4

Депонирование углерода, рассчитанное балансовым методом  
(депонирование =  $\text{NPP} - \text{эмиссия } \text{CO}_2$ ),  $\text{г C}/\text{м}^2 \text{ год}$

Фитоценоз		NPP	Эмиссия $\text{CO}_2$	Депонирование С	Дыхание мхов	Депонирование без учета дыхания мхов
«Бакчарское»	ВР	293	232	61	74	135
	НР	284	183	101	87	188
	ОТ	243	164	79	54	133
	ГМКГ	296	206	90	87	177
	ГМКМ	281	218	63	54	117
«Самара»	СЕ	297	243	54	68	112
	СО	302	196	106	68	174
	СС	404	356	48	68	116

Многолетние наблюдения (1999-2012 гг.) за потоками углерода позволяют оценить изменения баланса углерода в зависимости от погодных условий (рис. 6).

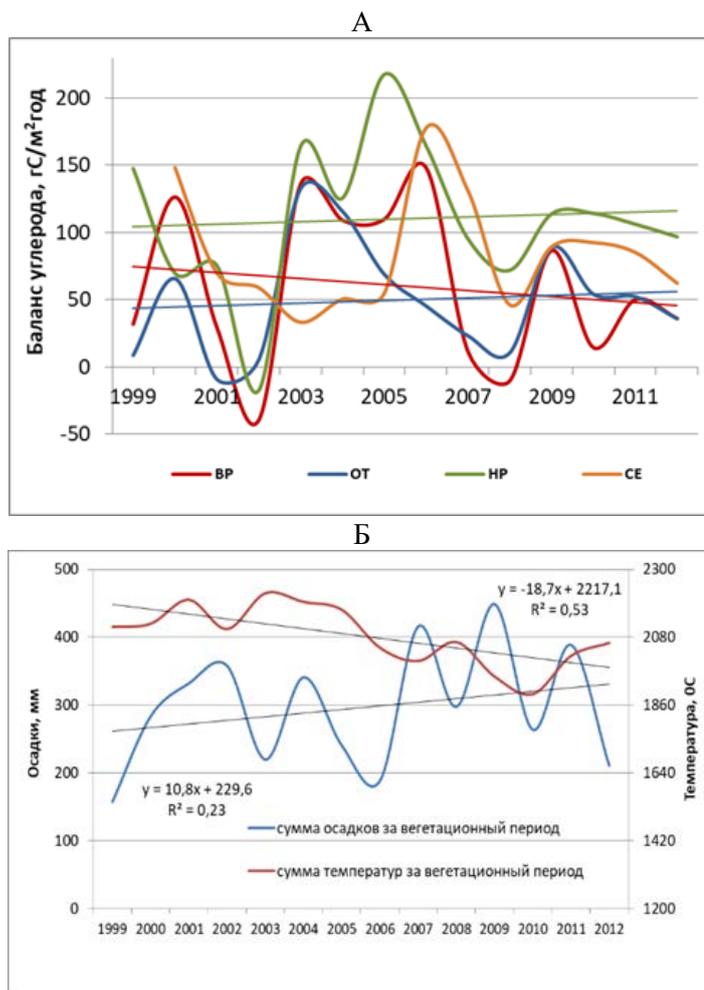


Рисунок 6. Динамика баланса углерода на примере олиготрофного и эвтрофного болот (А) и изменение погодных условий (Б) за период 1999-2012 гг.

Согласно полученным данным, в отдельные периоды болотные фитоценозы могут являться источником углекислого газа, однако в целом наблюдается тренд увеличения стока углерода в болотные фитоценозы. Притом, что за исследуемый период температура в течение вегетации снижается, а количество осадков, наоборот, увеличивается (см. рис. 6Б).

Высокая межгодовая вариабельность баланса углерода обусловлена межгодовой изменчивостью чистой первичной продукции. Стандартное отклонение эмиссии углерода в 8-15 раз ниже по сравнению со стандартным отклонением NPP. Такая изменчивость и приводит к получению отрицательного баланса углерода. Отрицательный годовой баланс углерода является частью нормальной климатической вариабельности.

Оценка составляющих углеродного баланса ключевого участка «Бакчарский» показала, что олиготрофные болотные экосистемы, занимающие площадь 166 тыс. га, в течение года накапливают 477 тыс. тонн углерода в год в виде первичной продукции растений, при этом из них выделяется около 203 тыс. тонн углерода. Эвтрофные болотные экосистемы (площадь 42,6 тыс. га) накапливают 158 тыс. тонн углерода в год, а выделяют 129 тыс. тонн. Углеродный баланс олиготрофных и эвтрофных экосистем положителен и составляет 274 и 29 тыс. тонн углерода в год, соответственно, при этом накопление углерода на единицу площади болот составляет 165 и 65 г С/м<sup>2</sup> в год для олиготрофных и эвтрофных болот. Установленная нами скорость аккумуляции углерода, оцененная балансовым методом, практически совпадает с оценкой скорости современного депонирования, полученной нами на основании данных по разложению растительных остатков.

Таким образом, исследуемые болотные экосистемы ключевого участка «Бакчарский» (площадь 212 тыс. га) ежегодно поглощают  $3 \times 10^5$  т углерода из атмосферы (табл. 5). Площадь ключевого участка составляет 0,06% от площади болот мира, 0,15% от площади болот России и 0,26% от площади болот Западной Сибири. Следовательно, по нашим оценкам, поглощение углерода болотами ключевого участка составляет 0,32, 0,62 и 4% от поглощения болотами мира, России и Западной Сибири соответственно.

Таблица 5

## Депонирование углерода болотными экосистемами

Болота	Площадь, км <sup>2</sup>	Поглощение углерода, т С в год	Поглощение углерода, г С/м <sup>2</sup> в год	Источник
КУ «Бакчарский»	2120	$3 \times 10^5$	51	Головацкая, 2013
Южнотаежная подзона Западной Сибири	327000*	$9,2 \times 10^{6**}$	28	*Efremov, Efremova, 2001; ** Головацкая, 2013.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На территории южнотаежной подзоны Западной Сибири болотные экосистемы олиготрофного типа занимают площадь 121 тыс. км<sup>2</sup>, эвтрофные и мезотрофные – 206 тыс. км<sup>2</sup> (Efremov, Efremova, 2001). Олиготрофные и эвтрофные болота на этой территории ежегодно депонируют 8,3 и 0,8 млн т С соответственно. Таким образом, болотные экосистемы южнотаежной подзоны Западной Сибири в настоящее время являются постоянным стоком углерода и, кроме того, являясь устойчивыми природными образованиями, способствуют смягчению последствий изменения климата.

## ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Исследование выполнено в рамках государственного задания ИМКЭС СО РАН (регистрационный номер 122110100001-1) в соответствии с распоряжением Правительства Российской Федерации № 2515-р от 2 сентября 2022 г. в целях реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения, направленного на создание единой национальной системы мониторинга климатически активных веществ.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Агробиохимические методы исследования почв* / Под ред. А.В. Соколова. М.: Наука, 1975. 656 с.
2. *Биогеоценологическое изучение болотных лесов в связи с опытной гидромелиорацией* / Под ред. А.А. Молчанова. М.: Наука, 1982. 207 с.

3. Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // *Почвоведение*. 1995. № 1. С. 21–32.
4. Боч М.С., Кобак К.И., Кольчугина Т.П., Винсон Т. Содержание и скорость аккумуляции углерода в болотах бывшего СССР // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отделение биологическое*. 1994. Т. 99. Вып. 4. С. 59–69.
5. Валетов В.В. *Влияние осушительной мелиорации на биопродуктивность сосновых олиготрофных болот севера Беларуси* // Болота и заболоченные леса в свете задач устойчивого природопользования. М.: Изд-во ГЕОС, 1999. С. 244–246.
6. Валетов В.В. *Фитомасса и первичная продукция безлесных и лесных болот (на примере севера Беларуси)*. Автореф. дисс. ... д.б.н. М.: Институт лесоведения РАН, 1992. 36 с.
7. Валущий В.И., Храмов А.А. *Структура и первичная продуктивность рямов юго-восточного Васюганья* // Теория и практика лесного болотоведения и гидролесомелиорации. Красноярск: ИЛИД СО АН СССР, 1976. С. 59–82.
8. Вомперский С.Э. *Роль болот в круговороте углерода* // Биогеоэкологические особенности болот и их рациональное использование. М.: Наука, 1994. С. 5–37.
9. Вомперский С.Э. Биосферное значение болот в углеродном цикле // *Природа*. 1994. № 7. С. 44–50.
10. Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Майков Д.А. Болота и заболоченные земли России: попытка анализа пространственного распределения и разнообразия // *Известия Российской академии наук. Серия географическая*. 2005. № 5. С. 39–50.
11. Вомперский С.Э., Сиринов А.А., Сальников А.А., Цыганова О.П., Валяева Н.А. Оценка площади болотных и заболоченных лесов России // *Лесоведение*. 2011. № 5. С. 3–11.
12. Вомперский С.Э., Цыганова О.П., Ковалев А.Г., Глухова Т.В., Валяева Н.А. *Заболоченность территории России как фактор связывания атмосферного углерода* // Круговорот углерода на территории России. М.: Миннаука РФ, 1999. С. 124–145.
13. Головацкая Е.А. Биологическая продуктивность олиготрофных и эвтрофных болот южно-таежной подзоны Западной Сибири // *Журнал сибирского федерального университета. Сер. Биология*. 2009. Т. 2. № 1. С. 38–53.
14. Головацкая Е.А., Белова Е.В., Санникова Ю.В., Петкевич М.В. *Влияние лесомелиорации на биологическую продуктивность олиготрофного болота* // Контроль и реабилитация окружающей среды: сб. матер. Междунар. симп. (Томск, 6–12 июля 2002 г.). Томск: Копировальный центр «Южный», 2002. С. 96–97.
15. Головацкая Е.А., Дюкарев Е.А. Сезонная и суточная динамика эмиссии CO<sub>2</sub> с поверхности олиготрофной торфяной почвы // *Метеорология и гидрология*. 2011. № 6. С. 84–93.
16. Головацкая Е.А., Никонова Л.Г. Влияние уровня болотных вод на процессы трансформации сфагновых мхов в торфяной почве олиготрофных болот // *Почвоведение*. 2017. № 5. С. 606–613. DOI: 10.7868/80032180X17030030
17. Грабовик С.И. *Постмелиоративная динамика структуры и биологической продуктивности мезотрофных травяно-сфагновых болот южной Карелии* // Болотные экосистемы севера Европы: разнообразие, динамика, углеродный баланс, ресурсы и охрана: сб. матер. Междунар. симп. (Петрозаводск, 30 августа – 2 сентября 2005 г.). Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2006. С. 73–82.
18. Грабовик С.И., Ананьев В.А. Структура и формирование растительного покрова в ненарушенных ельниках и после сплошного ветровала // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук*. 2008. № 12. С. 9–13.
19. Елина Г.А., Кузнецов О.Л. *Биологическая продуктивность болот Южной Карелии* // Стационарное изучение болот и заболоченных лесов в связи с лесомелиорацией. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977. С. 105–123.
20. Елина Г.А., Кузнецов О.П., Максимов А.И. *Структурно-функциональная организация и динамика болотных экосистем Карелии*. Л.: Наука, 1984. 128 с.
21. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Блойтен Б. Биологическая продуктивность и углеродный пул фитомассы лесных болот Западной Сибири // *Сибирский экологический журнал*. 2005. № 1. С. 29–44.
22. Ефремова Т.Т., Ефремов С.П., Косых Н.П., Титлянова А.А. Биологическая продуктивность и почвы болот южного Васюганья // *Сибирский экологический журнал*. 1994. № 3. С. 253–267.
23. Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Мелентьева Н.В. *Запасы углерода в экосистемах болот* // Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск, 1994. С. 128–139.
24. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // *Природа*. 1994. № 7. С. 15–18.
25. Кобак К.И. *Углекислота в биосфере*. Л.: ЛТА, 1977. 47 с.
26. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. *Динамика органического вещества в процессе торфообразования*. Л.: Наука ЛО, 1978. 172 с.
27. Копотева Т.А. Продукционно-деструкционные процессы в экосистемах травяных болот Приамурья // *Экология*. 1986. № 3. С. 35–41.
28. Копотева Т.А., Косых Н.П. Сравнительная оценка структуры фитомассы и продуктивности мезотрофных кустарничково-сфагновых болот зоны тайги // *Сибирский экологический журнал*. 2011. Т. 8. № 2. С. 301–307.

29. Косых Н.П. *Динамика запасов фитомассы и продукция болот северной тайги* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 94–96.
30. Косых Н.П., Коронатова Н.Г. Запасы общей фитомассы и чистая первичная продукция болотных экосистем Сургутского Полесья // *Динамика окружающей среды и глобальные изменения климата. 2010. Т. 1. № 2. С. 77–84.*
31. Косых Н.П. Миронычева-Токарева Н.П., Блейтен В. Продуктивность болот южной тайги Западной Сибири / Н. П. Косых, // *Вестник Томского государственного университета. Прил. № 7. 2003. С. 142–152.*
32. Кузнецов О.Л., Саковец В.И. Результаты комплексных стационарных исследований экосистем болот и заболоченных лесов южной Карелии // *Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2006. № 9. С. 119–129.*
33. Лисс О. Л., Абрамова Л. И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слукa З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. *Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение.* Тула: Гриф и К0, 2001. 584 с.
34. Медведева В.М. *Биологическая продуктивность заболоченных лесов и болот* // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. Л.: Наука, 1978. С. 8–32.
35. Медведева В.М., Егорова Н.В. *Типы заболоченных и болотных сосняков Южной Карелии и их продуктивность* // Биологическая и хозяйственная продуктивность лесных фитоценозов Карелии. Петрозаводск: Карельский филиал АН СССР, 1977. С. 44–58.
36. Миронычева-Токарева Н.П. *Динамика запасов и первичная продуктивность болот южной тайги* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 106–107.
37. Наумов А.В. *Дыхание почвы: составляющие, экологические функции, географические закономерности.* Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2009. 207 с.
38. Паников Н.С., Титлянова А.А., Палеева М.В., Семенов А.М., Миронычева-Токарева Н.П., Макаров В.П., Дубинин Е.В., Ефремов С.П. Эмиссия метана из болот юга Западной Сибири // *Доклады академии наук. 1993. Т. 330. № 3. С. 388–390.*
39. Пономарева В.В., Плотникова Т.А. *Методические указания по определению содержания состава гумуса в почвах (минеральных и торфяных).* Л.: Наука, 1975. 105 с.
40. Прокушкин А.С., Гуггенбергер Г. Роль климата в выносе растворенного органического вещества с водосборов криолитозоны Средней Сибири // *Метеорология и гидрология. 2007. № 6. С. 93–106.*
41. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / Под ред. Г.А. Заварзин. М.: Наука, 2007. 315 с.
42. Пьявченко Н.И. *Торфяные болота, их природное и хозяйственное значение.* М.: Наука, 1985. 152 с.
43. Титлянова А.А. Чистая первичная продукция травяных и болотных экосистем // *Сибирский экологический журнал. 2007. № 5. С. 763–770.*
44. Титлянова А.А. *Что мы знаем о продукции болот?* // Торфяники Западной Сибири и цикл углерода: прошлое и настоящее: материалы международного полевого симпозиума (Ноябрьск, 18–22 августа 2001 г.) / Е.Д. Лапшина (отв. ред.). Новосибирск: ООО Агенство Сибпринт, 2001. С. 136–139.
45. Титлянова А.А., Булавко Г.И., Кудряшова С.Я., Наумов А.В., Смирнов В.В., Танасиенко А.А. Запасы и потери органического углерода в почвах Сибири // *Почвоведение. 1998. № 1. С. 51–59.*
46. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. *Биологическая продуктивность болот Южного Васюганья* // Чтения памяти Ю.А. Львова: сб. матер. (Томск, 1–28 февраля 1995 г.) / Г.Ф. Плеханов (отв. ред.). Томск: Изд-во ТГУ, 1995. С. 59–63.
47. Титлянова А.А., Косых Н.П., Миронычева-Токарева Н.П. Прирост болотных растений // *Сибирский экологический журнал. 2000. № 5. С. 653–658.*
48. Титлянова А.А., Миронычева-Токарева Н.П., Наумова Н.Б. Круговорот углерода в травяных экосистемах при зарастании отвалов // *Почвоведение. 1988. № 7. С. 164–174.*
49. Титлянова А.А., Наумов А.В., Кудряшова С.Я. Булавко Г.И. *Запасы органического углерода в почвах Сибири, эмиссия парниковых газов и сток CO<sub>2</sub> в почвах Западной Сибири* // Тез. докл. II съезда Общества почвоведов. (27–30 июня 1996 г.). С.–П.: ВНИИЦлесресурс, 1996. Кн. 1. С. 221–222.
50. *Углерод в экосистемах лесов и болот России* / Под ред. В.А. Алексеева и Р.А. Бердси. Красноярск: Изд-во ВЦ СО РАН, 1994. 226 с.
51. Храмов А.А., Валуцкий В.И. *Лесные и болотные фитоценозы Восточного Васюганья.* Новосибирск: Наука СО, 1977. 219 с.
52. Честных О.В., Замолодчиков Д.Г., Уткин А.И. Общие запасы биологического углерода и азота в почвах лесного фонда России // *Лесоведение. 2004. № 4. С. 30–42.*
53. Aselmann I., Crutzen P.J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions // *Journal of Atmospheric chemistry. 1989. No. 8. P. 307–358.* <https://doi.org/10.1007/BF00052709>
54. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.P. Seasonal CO<sub>2</sub> balances of subarctic mire // *Journal Geophysical Research Atmospheres. 2001. Vol. 106 (D2). P. 1623–1637.* <https://doi.org/10.1029/2000JD900481>

55. Backeus I. Production and depth distribution of fine roots in a boreal open bog // *Annales Botanici Fennici*. 1990. Vol. 27. No. 3. P. 261–265.
56. Bartsch I., Moore T.R. A preliminary investigation of primary production and decomposition in subarctic peatlands // *Canadian Journal of Botany*. 1985. Vol. 63. P. 1241–1248. <https://doi.org/10.1139/b85-17>
57. Brown A., Mathur S.P., Kushner D.J. An ombrotrophic bog as a methane reservoir // *Global Biogeochemical Cycles*. 1989. Vol. 3. No. 3. P. 205–213. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00205>
58. Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frohling S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO<sub>2</sub> chambers // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. No. 2. P. 1066. <https://doi.org/10.1029/2002GB001946>
59. Dyck B.S., Shay J.M. Biomass and carbon pools of two bogs in the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario // *Canadian Journal of Botany*. 1999. Vol. 77. P. 291–304. <https://doi.org/10.1139/b98-215>
60. Efremov S.P., Efremova T.T. *Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia* // Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001. P. 73–78.
61. Grigal D.F., Buttlesman C.G., Kernick L.K. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota // *Canadian Journal of Botany*. 1985. Vol. 63. P. 2416–2424. <https://doi.org/10.1139/b85-345>
62. Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia // *Global Biogeochemical Cycles*. 2002. Vol. 16. No. 4. P. 62-1-62-15. <https://doi.org/10.1029/2002GB001930>
63. Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon balance in East European tundra // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. P. GB1023. DOI: 10.1029/2003GB002054
64. Houghton R.G., Hobbie J.E., Melillo J.M., Moore B., Peterson B.J., Shaver G.R., Woodwell G.M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere // *Ecological Monographs*. 1983. Vol. 53. No. 3. P. 235–262. <https://doi.org/10.2307/1942531>
65. IPCC, 2021: *Index*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FrontMatter.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf) (дата обращения 03.12.2022)
66. Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Frohling S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table // *Ecosystems*. 2005. Vol. 8. P. 619–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
67. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils // *European Journal of Soil Science*. 1993. Vol. 44. No. 4. P. 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>
68. Moore T.R., Bubier J.L., Frohling S.E., Lafleur P.M., Roulet N.T. Plant biomass and production and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic bog // *Journal of Ecology*. 2002. Vol. 90. No. 1. P. 25–36. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x>
69. Nykanen H., Heikkinen J.E.P., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P.J. Annual CO<sub>2</sub> exchange and CH<sub>4</sub> fluxes on a subarctic palsamire during climatically different years // *Global Biogeochemical Cycles*. 2003. Vol. 17. No. 1. P. 1018. <https://doi.org/10.1029/2002GB001861>
70. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission on from Boreal peat bogs (West Siberia) Winter fluxes and thaw activation dynamics // *Global Biogeochemical Cycles*. 2000. Vol. 14. No. 4. P. 1071–1080. <https://doi.org/10.1029/1999GB900097>
71. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool // *Global Biogeochemical Cycles*. 2004. Vol. 18. No. 3. P. GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
72. Stolbovoi V. Carbon in Russia soils // *Climatic change*. 2002. Vol. 55. No. 1–2. P. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>
73. Strack M., Waddington J.M., Rochefort L., Tuittila E.S. Response of vegetation and net ecosystem carbon dioxide exchange at different peatland microforms following water table drawdown // *Journal Geophysical Research. Biogeosciences*. 2006. Vol. 111. No. G2. <https://doi.org/10.1029/2005JG000145>
74. Vasander H. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland // *Annales Botanici Fennici*. 1982. Vol. 19. No. 2. P. 103–125.
75. Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia // *Boreal Environment Research*. 2021. Vol. 26. No. 1. P. 43–59.
76. Wickland K.P., Striegl R.G., Mast M.A., Clow D.W. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998 // *Global Biogeochemical Cycles*. 2001. Vol. 15. No. 2. P. 321–335. <https://doi.org/10.1029/2000GB001325>

Поступила в редакцию 01.12.2022

Принята 05.12.2022

Опубликована 05.12.2022

**Сведения об авторах:**

**Головацкая Евгения Александровна** – доктор биологических наук, профессор РАН, директор, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [golovatskayaea@gmail.com](mailto:golovatskayaea@gmail.com)

**Дюкарев Егор Анатольевич** – кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru)

**Веретенникова Елена Эдуардовна** – кандидат биологических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [lena2701@yandex.ru](mailto:lena2701@yandex.ru)

**Никонова Лилия Гарифулловна** – кандидат биологических наук, младший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [lili112358@mail.ru](mailto:lili112358@mail.ru)

**Смирнов Сергей Васильевич** – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физики климатических систем, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [smirnov@imces.ru](mailto:smirnov@imces.ru)

*Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.*



Статья доступна по лицензии [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

## EVALUATION OF THE DYNAMICS OF THE CARBON BALANCE FOR PEATLANDS OF THE SOUTHERN-TAIGA SUBZONE OF WEST SIBERIA (TOMSK REGION)

© 2022 E. A. Golovatskaya , E. A. Dyukarev , E. E. Veretennikova , L. G. Nikonova ,  
S. V. Smirnov 

*Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russia. E-mail: [golovatskayaea@gmail.com](mailto:golovatskayaea@gmail.com)*

*The aim of the study was to assess carbon reserves and balance in oligotrophic and eutrophic bogs of the southern-taiga subzone of West Siberia.*

*Location and time of the study. The study was carried out at the field station "Vasyuganye" (56° 57' N, 82° 30' E) of the Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences in oligotrophic and eutrophic undisturbed native. Field work was carried out during the growing seasons (May-September) from 1999 to 2012.*

*Methods. The estimation of biological productivity (phytomass stocks and net primary production) was carried out by the cutting method, underground production was determined by the method of monoliths. The rate of transformation of plant residues of peat-forming plants was assessed using the method of partially isolated samples. The rate of decomposition and loss of carbon was calculated as a percentage of the original mass and the original carbon content. CO<sub>2</sub> emissions were measured by the chamber method. The annual CO<sub>2</sub> flux from the surface of the peat deposit was modeled on the basis of the data obtained as a result of field measurements of CO<sub>2</sub> emission. Additional carbon losses, such as methane emissions, winter emissions of CO<sub>2</sub> and methane, and carbon removal with bog waters, were estimated based on published data. The annual carbon balance for the studied mire ecosystems was calculated as the difference between the carbon fluxes and NPP of bog ecosystems.*

*Results. The main carbon pools in mire ecosystems are concentrated in peat deposits. On average, for the study area, they are 74 kg/m<sup>2</sup> for the oligotrophic bog, and 161 kg/m<sup>2</sup> for the eutrophic one. Carbon reserves in the form of plant organic matter are much lower (50 times on average). As a result of many years of research, it was revealed that with a high interannual variability of the carbon balance in the period from 1999 to 2012, there are no significant trends in temporal changes of the carbon balance for the studied ecosystems. The annual absorption of carbon by the peatland ecosystems of the key site "Bakcharsky" with an area of 212 thousand hectares is about 3 × 10<sup>5</sup> tons.*

*Conclusion. Peatland ecosystems of the southern-taiga subzone of West Siberia are currently a constant sink of carbon and, as such, being sustainable natural formations, contribute to climate change mitigation.*

**Key words:** peatland ecosystems; carbon stocks; CO<sub>2</sub> emissions; carbon balance

**How to cite:** Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A., Veretennikova E.E., Nikonova L.G., Smirnov S.V. Evaluation of the dynamics of the carbon balance for peatlands of the southern-taiga subzone of West Siberia (Tomsk region) // *The Journal of Soils and Environment*. 2022. 5(4). e194. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194) (in Russian with English abstract).

## REFERENCES

1. *Agrochemical methods in soil research*. A.V. Sokolov (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 1975, 656 p. (in Russian)
2. *Biogeocenological study of peatland forests in connection with experimental hydromelioration*. Molchanov A.A. (ed). Moscow: Nauka Publ., 1982, 207 p. (in Russian)
3. Biryukova O.N., Orlov D.S. Reserves of organic carbon in soils of the Russian Federation, *Pochvovedenie*, 1995, No. 1, p. 21–32. (in Russian)
4. Boch M.S., Kobak K.I., Kolchugina T.P., Vinson T. Content and rate of carbon accumulation in peatlands of the former USSR, *Bulletin of Moscow Society of Naturalists*, 1994, Vol. 99, No. 4, p. 59–69. (in Russian)
5. Valetov V.V. *Influence of drainage reclamation on the productivity of pine oligotrophic bogs in the north of Belarus*. In book: *Wetlands and wetland forests in the world are the objectives of sustainable nature management: Proc. of the Sci. Conf. (Moscow, 1 June, 1999)*. Vompersky S.E., Sirin A.A. (ed.). Moscow: GEOS Publ., 1999, p. 244–246. (in Russian)
6. Valetov V.V. *Phytomass and primary production of treeless and forest swamps (on the example of the north of Belarus)*. Abstract of Dissertation ... Doc. of Biol. Sci., Moscow, 1992. 36 p. (in Russian)
7. Valutsky V.I., Khramov A.A. *Structure and primary productivity of the ryams of the southeastern Vasyugan area*. In book: *Theory and practice of forest swamp science and hydroforest reclamation*. Krasnoyarsk: ILiD SB Publ., 1976, p. 59–82. (in Russian)
8. Vompersky S.E. *The role of mires in the carbon cycle*. In book: *Biogeocenotic Specificity of Mires and Their Rational Use*. Moscow: Nauka Publ., 1994, p. 5–37. (in Russian)
9. Vompersky S.E. Biospheric significance of the peatland in the carbon cycle, *Priroda*, 1994, No. 7. p. 44–50. (in Russian)
10. Vompersky S.E., Sirin A.A., Tsiganova O.P., Valyaeva N.A. Sal'nikov A. A., Maikov D.A. Peatlands and paludified lands of Russia: attempt of analyses of spatial distribution and diversity, *Regional Research of Russia*, 2005, No. 5, p. 39–50. (in Russian)
11. Vompersky S.E., Sirin A.A., Sal'nikov A.A., Tsiganova O.P., Valyaeva N.A. Estimation of the areas of peatland and paludified shallow – peat forest in Russia, *Lesovedenie*, 2011, No. 5, p. 3–11. (in Russian)
12. Vompersky S.E., Tsiganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. *Carbon cycle in Russia*. In book: *Carbon Budget of Russia*. Moscow: Nauka Publ., 1999, p. 124–145. (in Russian)
13. Golovatskaya, E.A. Biological Productivity of Oligotrophic and Eutrophic Mires in the Southern Taiga of Western Siberia, *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2009, No. 2. p. 38–53. (in Russian)
14. Golovatskaya E.A., Belova E.V., Sannikova Yu.V., Petkevich M.V. *Influence of forest reclamation on the biological productivity of an oligotrophic bog*. In book: *Control and rehabilitation of the environment: Proc. of the International symp. (Tomsk, July 6-12, 2002)*. Tomsk: Yuzhny Publ., 2002, p. 96–97. (in Russian)
15. Golovatskaya E.A., Dyukarev E.A. Seasonal and diurnal dynamics of CO<sub>2</sub> emission from oligotrophic peat soil surface, *Meteorologiya i Gidrologiya (Russian Meteorology and Hydrology journal)*, 2011, No. 36, p. 413–419. (in Russian). DOI: [10.3103/S1068373911060094](https://doi.org/10.3103/S1068373911060094)
16. Golovatskaya E.A., Nikonova, L.G. The influence of the bog water level on the transformation of sphagnum mosses in peat soils of oligotrophic bogs, *Eurasian Soil Science*, 2017, No. 50, p. 580–588. DOI: [10.1134/S1064229317030036](https://doi.org/10.1134/S1064229317030036)
17. Grabovik S.I. *Post-reclamation dynamics of the structure and biological productivity of mesotrophic grass-sphagnum bogs in southern Karelia*. In book: *Mire Ecosystems in Northern Europe: Diversity, Dynamics, Carbon Balance, Resources and Conservation: Proc. of the International symp. (Petrozavodsk, 30 August – 2 September, 2005)*. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2006, p. 73–82. (in Russian)
18. Grabovik S.I., Ananiev V.A. Structure and formation of vegetation cover in native spruce forests and after a continuous windfall, *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2008, No. 12, p. 9–13. (in Russian)
19. Elina G.A., Kuznetsov O.L. *Biological productivity of peatlands in South Karelia*. In book: *Stationary study of peatland and forests in connection with forest reclamation*. Petrozavodsk: Karelian branch of the Academy of Sciences of the USSR publ., 1977, p. 105–123. (in Russian)
20. Elina G.A., Kuznetsov O.L., Maksimov A.I. *Structural-functional organization and dynamics of mire ecosystems in Karelia*. Leningrad: Nauka Publ., 1984, 128 p. (in Russian)
21. Efremov S.P., Efremova T.T., Bloyten B. Biological Productivity and the Carbon Pool of Forest Swamps in West Siberia, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2005, No. 1, p. 29–44. (in Russian)
22. Efremova T.T., Efremov S.P., Kosykh N.P., Titlyanova A.A. Biological Productivity and Bog Soils of Southern Vasyugan, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 1994, No 3, p. 253–267. (in Russian)

23. Efremov S.P., Efremova T.T., Melent'eva N.V. *Carbon Reserves in Bog Ecosystems*. In book: Carbon in the Ecosystems of Russian Forests and Bogs. Krasnoyarsk, 1994, p. 128–139. (in Russian)
24. Zavarzin G.A. Carbon Balance in Russia, *Priroda*, 1994, No. 7, p. 15–18. (in Russian)
25. Kobak K.I. *Carbon dioxide in the biosphere*. Leningrad: LTA Publ., 1977, 47 p. (in Russian)
26. Kozlovskaya L.S., Medvedeva V.M., P'yavchenko N.I., *Dynamics of Organic Matter in the Course of Peat Formation*. Leningrad: Nauka Publ., 1978, 172 p. (in Russian)
27. Kopoteva T.A. Production-destructive processes in the ecosystems of grassy swamps of the Amur Region, *Russian Journal of Ecology*, 1986, No. 3, p. 35–41. (in Russian)
28. Kopoteva T.A., Kosykh N.P. Comparative evaluation of the structure of phytomass and productivity of mesotrophic and dwarf shrub-sphagnum mires of the Taiga zone, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2011, Vol. 8, No. 2, p. 301–307. (in Russian)
29. Kosykh N.P. *Dynamics of phytomass reserves and production of northern taiga bogs*. In book: West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001). Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 94–96. (in Russian)
30. Kosykh N.P., Koronatova N.G. Phytomass and primary production of mire ecosystems in Surgut polesie, *Environmental Dynamics and Global Climate Change*, 2010, Vol. 1, No. 2, p. 77–84. (in Russian)
31. Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P., Blayten V. Productivity of peatland of the southern taiga of Western Siberia, *Tomsk State University Journal*, 2003, No. 7, p. 142–152. (in Russian)
32. Kuznetsov O.L., Sakovets V.I. Results of complex stationary studies of ecosystems of swamps and swampy forests of southern Karelia, *Transactions of the Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences*, 2006, No. 9, p. 119–129. (in Russian)
33. Liss O.L., Abramova L.I., Avetov H.A., Berezina H.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Y., Shvedchikova N.K. *Mire Systems of Western Siberia and Their Role in Nature Protection*. Tula: Grif Publ, 2001, 584 p. (in Russian)
34. Medvedeva V.M. *Biological productivity of paludified forests and bogs*. In book: Organic matter dynamics during peat formation. Leningrad: Nauka Publ., 1978, p. 8–32. (in Russian)
35. Medvedeva V.M., Egorova N.V. *Types of waterlogged and paludified pine forests of South Karelia and their productivity*. In book: Biological and economic productivity of forest phytocenoses of Karelia. Petrozavodsk: Karelian Branch of the Academy of Sciences of the USSR Publ., 1977, p. 44–58. (in Russian)
36. Mironycheva-Tokareva N.P. Dynamics of stocks and primary productivity of southern taiga bogs. In book: West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001). Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 106–107. (in Russian)
37. Naumov A.V. *Soil respiration: components, ecological functions, geographical patterns*. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2009, 207 p. (in Russian)
38. Panikov N.S., Titlyanova A.A., Paneeva M.V., et al. Methane Emission from Bogs in the Southern Part of Western Siberia, *Doklady Akademii Nauk*, 1993, Vol. 330, No. 3, p. 388–390. (in Russian)
39. Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. *Methodological Recommendations for Determination of the Composition of Humus in Peat and Mineral Soils*. Leningrad: Nauka Publ, 1975, 105 p. (in Russian)
40. Prokushkin A.S., Guggenberger G. The role of climate in the removal of dissolved organic matter from the watersheds of the permafrost zone of Central Siberia, *Meteorologiya i Gidrologiya (Russian Meteorology and Hydrology journal)*, 2007, No. 6, p. 93–106. (in Russian)
41. *Carbon Pools and Fluxes in Terrestrial Ecosystems of Russia*. G. A. Zavarzin (Ed.). Moscow: Nauka Publ., 2007, 315 p. (in Russian)
42. Pyavchenko N.I. *Peatlands, their natural and economic significance*. Moscow: Nauka Publ., 1985, 152 p. (in Russian)
43. Titlyanova A.A. Net primary production of grass and bog ecosystems, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*. 2007, No. 5, p. 763–770. (in Russian)
44. Titlyanova A.A. *What do we know about productivity of bogs?* In book: West Siberian peatlands and the carbon cycle: past and present: Proc. of the materials of the international field symp. (Noyabrsk, August 18–22, 2001). Lapshina E.D. (ed.). Novosibirsk: OOO Agency Sibprint Publ., 2001, p. 136–139. (in Russian)
45. Titlyanova A.A., Bulavko G.I., Kudryashova S.Y., Naumov A.V., Smirnov V.V., Tanasienko A.A. Storages and losses of organic carbon in Siberian soils, *Pochvovedenie*, No. 1, p. 51–59 (in Russian)
46. Titlyanova, A.A., Kosykh, N.P., Mironycheva-Tokareva, N.P. *Biological productivity of Bogs in Southern Vasyugan*. In book: Yu.A. L'vov Memorial Lectures. Tomsk: Tomsk St. Univ. Publ., 1995, p. 59–63. (in Russian)
47. Titlyanova A.A., Kosykh N.P., Mironycheva-Tokareva N.P. Growth of marsh plants, *Sibirskij ekologicheskij zhurnal*, 2000, No. 5, p. 653–658. (in Russian)
48. Titlyanova A.A., Mironcheva-Tokareva N.P., Naumova N.B. Carbon Cycle in the developing grass ecosystems of earth excavation, *Pochvovedenie*, 1988, No.7, p. 164–174. (in Russian)
49. Titlyanova A.A., Naumov A.V., Kudryashova S.Ya., Bulavko G.I., *Organic Carbon Storage in the Soils of Siberia, Emission of Greenhouse Gases, and CO<sub>2</sub> Sinking into the Soils of Western Siberia*. In book: Abstr. 2nd Congress of the Russian Society of Soil Scientists. St. Petersburg, 1996, Vol. 1, p. 221–222. (in Russian)

50. *Carbon in the Ecosystems of Forests and mires of Russia*. Alekseev V.A., R.A. Birdsey (Eds.). Krasnoyarsk: Publishing House of the Computing Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 1994, 226 p. (in Russian)
51. Khramov A.A., Valutskii V.I. *Forest and bog phytocenoses of East Vasuganiya*. Novosibirsk: Nauka SB Publ., 1977, 219 p. (in Russian)
52. Chestnykh O.V., Zamolodchikov D.G., Utkin A.I. Total reserves of biological carbon and nitrogen in the soils of the forest fund of Russia, *Lesovedenie*, 2004, No. 4, p. 30–42. (in Russian)
53. Aselmann I., Crutzen P.J. Global distribution of natural freshwater wetlands and rice paddies, their net primary productivity, seasonality and possible methane emissions, *Journal of Atmospheric chemistry*, 1989, No. 8, p. 307–358. <https://doi.org/10.1007/BF00052709>
54. Aurela M., Laurila T., Tuovinen J.P. Seasonal CO<sub>2</sub> balances of subarctic mire, *Journal Geophysical Research Atmospheres*, 2001, Vol. 106 (D2), p. 1623–1637. <https://doi.org/10.1029/2000JD900481>
55. Backeus I. Production and depth distribution of fine roots in a boreal open bog, *Annales Botanici Fennici*, 1990, Vol. 27, No. 3, p. 261–265.
56. Bartsch I., Moore T.R. A preliminary investigation of primary production and decomposition in subarctic peatlands, *Canadian Journal of Botany*, 1985, Vol. 63, p. 1241–1248. <https://doi.org/10.1139/b85-17>
57. Brown A., Mathur S.P., Kushner D.J. An ombrotrophic bog as a methane reservoir, *Global Biogeochemical Cycles*, 1989, Vol. 3, No. 3, p. 205–213. <https://doi.org/10.1029/GB003i003p00205>
58. Bubier J.L., Crill P.M., Mosedale A., Frohling S., Linder E. Peatland responses to varying interannual moisture conditions as measured by automatic CO<sub>2</sub> chambers, *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, Vol. 17, No. 2, p. 1066. <https://doi.org/10.1029/2002GB001946>
59. Dyck B.S., Shay J.M. Biomass and carbon pools of two bogs in the Experimental Lakes Area, northwestern Ontario, *Canadian Journal of Botany*, 1999, Vol. 77, p. 291–304. <https://doi.org/10.1139/b98-215>
60. Efremov S.P., Efremova T.T. *Present stocks of peat and organic carbon in bog ecosystems of West Siberia*. In book: Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht, Netherlands: Utrecht Univ., 2001, p. 73–78.
61. Grigal D.F., Buttlemann C.G., Kernick L.K. Biomass and productivity of the woody strata of forested bogs in northern Minnesota, *Canadian Journal of Botany*, 1985, Vol. 63, P. 2416–2424. <https://doi.org/10.1139/b85-345>
62. Heikkinen J.E.P., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon dioxide and methane dynamics and annual carbon balance in tundra wetland in NE Europe, Russia, *Global Biogeochemical Cycles*, 2002, Vol. 16, No. 4, p. 62-1-62-15. <https://doi.org/10.1029/2002GB001930>
63. Heikkinen J.E.P., Virtanen T., Huttunen J.T., Elsakov V., Martikainen P.J. Carbon balance in East European tundra, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, Vol. 18, p. GB1023. DOI: 10.1029/2003GB002054
64. Houghton R.G., Hobbie J.E., Melillo J.M., Moore B., Peterson B.J., Shaver G.R., Woodwell G.M. Changes in the carbon content of terrestrial biota and soils between 1860 and 1980: a net release of CO<sub>2</sub> to the atmosphere, *Ecological Monographs*, 1983, Vol. 53, No. 3, p. 235–262. <https://doi.org/10.2307/1942531>
65. IPCC, 2021: *Index*. In Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. [https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_WGI\\_FrontMatter.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_FrontMatter.pdf) (accessed on 03/12/2022)
66. Lafleur P.M., Moore T.R., Roulet N.T., Frohling S. Ecosystem respiration in a cool temperate bog depends on peat temperature but not water table, *Ecosystems*, 2005, Vol. 8, p. 619–629. <https://doi.org/10.1007/s10021-003-0131-2>
67. Moore T.R., Dalva M. The influence of temperature and water table position on carbon dioxide and methane emissions from laboratory columns of peatland soils, *European Journal of Soil Science*, 1993, Vol. 44, No. 4, p. 651–664. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1993.tb02330.x>
68. Moore T.R., Bubier J.L., Frohling S.E., Lafleur P.M., Roulet N.T. Plant biomass and production and CO<sub>2</sub> exchange in an ombrotrophic bog, *Journal of Ecology*, 2002, Vol. 90, No. 1, p. 25–36. <https://doi.org/10.1046/j.0022-0477.2001.00633.x>
69. Nykanen H., Heikkinen J.E.P., Pirinen L., Tiilikainen K., Martikainen P.J. Annual CO<sub>2</sub> exchange and CH<sub>4</sub> fluxes on a subarctic peat mire during climatically different years, *Global Biogeochemical Cycles*, 2003, Vol. 17, No. 1, p. 1018. <https://doi.org/10.1029/2002GB001861>
70. Panikov N.S., Dedysh S.N. Cold season CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission from Boreal peat bogs (West Siberia) Winter fluxes and thaw activation dynamics, *Global Biogeochemical Cycles*, 2000, Vol. 14, No. 4, p. 1071–1080. <https://doi.org/10.1029/1999GB900097>
71. Sheng Y., Smith L.C., MacDonald G.M., Kremenetski K.V., Frey K.E., Velichko A.A., Lee M., Beilman D.W., Dubinin P. A high-resolution GIS-based inventory of the west Siberian peat carbon pool, *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, Vol. 18, No. 3, p. GB3004. <https://doi.org/10.1029/2003GB002190>
72. Stolbovoi V. Carbon in Russia soils, *Climatic change*, 2002, Vol. 55, No. 1–2, p. 131–156. <https://doi.org/10.1023/A:1020289403835>

73. Strack M., Waddington J.M., Rochefort L., Tuittila E.S. Response of vegetation and net ecosystem carbon dioxide exchange at different peatland microforms following water table drawdown, *Journal Geophysical Research. Biogeosciences*, 2006. Vol. 111. No. G2. <https://doi.org/10.1029/2005JG000145>
74. Vasander H. Plant biomass and production in virgin, drained and fertilized sites in a raised bog in southern Finland, *Annales Botanici Fennici*, 1982, Vol. 19, No. 2, p. 103–125.
75. Veretennikova E.E., Dyukarev E.A. Comparison of methane fluxes of open and forested bogs of the southern taiga zone of Western Siberia, *Boreal Environment Research*, 2021, Vol. 26, No. 1, p. 43–59.
76. Wickland K.P., Striegl R.G., Mast M.A., Clow D.W. Carbon gas exchange at a southern Rocky Mountain wetland, 1996–1998, *Global Biogeochemical Cycles*, 2001, Vol. 15, No. 2, p. 321–335. <https://doi.org/10.1029/2000GB001325>

*Received 01 December 2022*

*Accepted 05 December 2022*

*Published 05 December 2022*

**About the authors:**

**Golovatskaya Evgeniya Aleksandrovna** – Doctor of Biological Sciences, Professor of the Russian Academy of Sciences, Director, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [golovatskayaea@gmail.com](mailto:golovatskayaea@gmail.com)

**Dyukarev Egor Anatolyevich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [egor@imces.ru](mailto:egor@imces.ru)

**Veretennikova Elena Eduardovna** – Candidate of Biological Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [lena2701@yandex.ru](mailto:lena2701@yandex.ru)

**Nikonova Liliya Garifullovna** – Candidate of Biological Sciences, Junior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [lili112358@mail.ru](mailto:lili112358@mail.ru)

**Smirnov Sergey Vasilyevich** – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, Laboratory of Physics of Climate Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [smirnov@imces.ru](mailto:smirnov@imces.ru)

*The authors read and approved the final manuscript*



The article is available under [Creative Commons Attribution 4.0 License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)