

## РАЗРАБОТКА МЕТОДИЧЕСКОГО ПОДХОДА К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЯХ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

© 2023 Ю. И. Прейс , Е. А. Головацкая , М. М. Кабанов 

ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,  
проспект Академический, 10/3, г. Томск, 634005, Россия. E-mail: preisyui@rambler.ru

**Цель исследования.** Разработка методического подхода к оценке запасов углерода, депонированных в торфяных месторождениях Западной Сибири, на основе анализа имеющихся литературных и фондовых материалов и с учётом возможности быстрой переоценки запасов углерода при поступлении новых данных.

**Методы.** Анализ литературных данных по содержанию углерода и методическим подходам оценки его запасов в болотных экосистемах Западной Сибири. Использование данных «Кадастра торфяных месторождений Томской области» и фондовых материалов по конкретным месторождениям для апробации существующих методических подходов и разработки оптимального подхода оценки запасов углерода в торфяных месторождениях Западной Сибири.

**Основные результаты.** Выявлен существенный недостаток репрезентативных данных по содержанию органического углерода ( $C_{орг}$ ) в торфах Западной Сибири. Обоснована необходимость пересмотра имеющихся показателей плотности и  $C_{орг}$ , усреднённых для разных типов болот, для уточнения запасов углерода, депонированного в торфяных месторождениях данного региона. Предложены методика расчёта запасов углерода в торфяных месторождениях по данным областных кадастров и фондовых материалов геологической разведки торфяных месторождений Западной Сибири и алгоритм расчёта с учётом особенностей имеющейся информации.

**Заключение.** Для уточнения запасов углерода в торфяных месторождениях Западной Сибири необходимы проведение масштабных аналитических исследований единым методом и создание открытой базы данных содержания  $C_{орг}$  в органическом веществе разных видов торфа Западной Сибири, а в высокозольных низинных торфах необходимо определение содержания неорганического углерода. В качестве оптимального, предложен методический подход оценки запасов углерода, основанный на максимальном использовании данных областных кадастров и фондовых материалов геологической разведки торфяных месторождений.

**Ключевые слова:** методический подход; запасы углерода; торфяные месторождения; Западная Сибирь

**Цитирование:** Прейс Ю.И., Головацкая Е.А., Кабанов М.М. Разработка методического подхода к оценке запасов углерода в торфяных месторождениях Западной Сибири // Почвы и окружающая среда. 2023. Том 6. № 2. e209. DOI: [10.31251/pos.v6i2.209](https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.209).

### ВВЕДЕНИЕ

Роль болотных экосистем в регулировании циклов углерода и климата достаточно велика, поскольку именно болотные экосистемы являются поглотителями углерода, накапливая его в виде торфяных залежей на длительный период. Болотные экосистемы как крупные резервуары органического углерода также играют важную роль в поддержании газового баланса атмосферы (Gorham, 1991; Ефремов и др., 1994; Вомперский и др., 1999; Belyea, Malmer, 2004; Ваганов и др., 2005; Инишева и др., 2012; Ciais et al., 2014; Schurg и др., 2015; Ефремова и др., 2016; Головацкая и др., 2022). Необходимость количественной оценки запасов углерода в торфяных почвах, определяется также условиями Рамочной конвенции по климату, Киотского протокола и пост-киотских климатических соглашений (IPCC, 2021). Однако достоверных оценок по запасам углерода в торфяных залежах России в целом и Западной Сибири в частности до сих пор не получено. В рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения «Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» предполагается выполнить оценку содержания углерода в почвах России, в том числе в торфяных. Актуальной задачей является оценка запасов почвенного углерода болотных экосистем Западной Сибири как самого крупного в мире торфоболотного бассейна. К настоящему времени получены оценки запасов углерода в болотных экосистемах различных

территорий Евразии и Северной Америки. Согласно оценкам (Lappalainen, 1996), площадь болот мира оценивается в 6,4 млн км<sup>2</sup>, запасы углерода в них составляют 234–252 Пг. Согласно более ранним оценкам (Вомперский и др., 1994), полученным на основе данных Международного общества по торфу (International Peatland Society), площадь торфяных болот мира оценивается в 5,1 млн км<sup>2</sup> (3,5% суши Земли), а запасы торфа в пересчёте на углерод – 120–240 Пг. В России общая площадь оторфованных и заболоченных земель составляет 3,69 млн км<sup>2</sup> (21,6% территории страны), в том числе площадь болот (со слоем торфа >30 см) – 1,39 млн км<sup>2</sup> (Вомперский и др., 1994), а содержание углерода в них – 100,9 Пг (Вомперский и др., 1999). По данным других авторов (Novikov, Usova, 1998) площадь болот составляет 1,68 млн км<sup>2</sup>, а содержание депонированного углерода в торфяных болотах России оценивается в 116,5 Пг (Бирюкова, Орлов, 1995) и 118,9 Пг (Ефремов и др., 1994). Некоторые различия в цифрах объясняются недостаточной изученностью торфяных ресурсов России, а также разными методами расчетов.

Попытки оценить запасы углерода в болотных экосистемах, в том числе различных территорий Западной Сибири, предпринимались неоднократно. В Западно-Сибирском регионе площадь торфяных болот достигает 42% от территории болот России (Вомперский и др., 1994) с содержанием 42,3 Пг углерода, что составляет 36% от депонированного углерода России (Ефремов и др., 1994). Согласно некоторым расчётам (Sheng et al., 2004), общая площадь торфяных болот Западно-Сибирской равнины равна 592,44 тыс. км<sup>2</sup>, запасы торфа достигают 147,82 Пг, а общий запас углерода – 70,21 Пг. Суммарные запасы абсолютно сухого торфа (а.с.т.) торфяных болот Западно-Сибирского природного макрорегиона составляют 111,3 Пг, а углерода – 55,096 Пг (Ваганов и др., 2005). Различие полученных данных обусловлено разными понятиями при выделении болотных экосистем, а также используемыми методическими подходами и методами оценки содержания углерода в торфе. При этом существенной проблемой остаётся недостаточная изученность болот Западной Сибири, даже таёжной зоны, болота которой наиболее охвачены геологоразведочными работами.

Происходящие в настоящее время климатические изменения создают угрозу превращения болотных экосистем из экосистем-поглотителей углерода, консервирующих и тысячелетия его сохраняющих, в поставщика углерода в атмосферу в виде углеродсодержащих газов (Moore et al., 1998; Belyea, Malmer, 2004; Schurr et al., 2015). «Прогрессирующее потепление климата приведёт к безусловному прогреву торфяных залежей, падению уровня почвенно-грунтовых вод и улучшению режима аэрации в болотных экосистемах, вследствие чего возрастёт микробиологическая и ферментативная активность почв. Это повлечёт ускоренное разложение органического вещества (ОВ) торфов и их гумификацию» (Ваганов и др., 2005, с. 646). «Грубые оценки показывают, что при условии прогрессирующего потепления наиболее восприимчивые к климатогенной трансформации группы и фракции органического вещества только торфяных болот Западно-Сибирского региона, совокупно вовлекут в первоочередной круговорот около 30 млрд. т углерода» (Ваганов и др., 2005, с. 647).

Следовательно, для более точных оценок запасов углерода в болотных экосистемах Западной Сибири как вероятного источника парниковых газов в результате климатических изменений либо антропогенного воздействия актуальна задача получения корректных данных по содержанию и запасам углерода, депонированного в торфяных залежах. По нашему мнению, повысить качество этих оценок возможно при уменьшении региона исследования и при максимальном использовании данных фондовых материалов геологической разведки торфяных месторождений.

Цель данного исследования – разработка методического подхода к оценке запасов углерода, депонированных в торфяных месторождениях, на основе анализа имеющихся литературных и фондовых материалов и с учетом возможности быстрой переоценки запасов углерода при поступлении новых данных.

#### МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА В БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ И СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА В ТОРФАХ (ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР)

**Содержание углерода в торфе.** На содержание углерода в торфе влияет качество органического вещества, зависящее от вида растений-торфообразователей и степени преобразованности их остатков в процессе разложения (Тюрин, 1931). Последнее определяется устойчивостью растений к разложению, условиями трансформации их органического вещества (степень богатства минерального питания, гидротермические условия болотных экотопов). Таким образом, содержание углерода в органическом веществе торфа зависит от его типа, ботанического

состава, степени разложения и возраста. Однако многофакторная обусловленность процесса образования торфа значительно понижает показатели корреляционной связи содержания углерода и конкретных свойств торфа. Поэтому ряд авторов считают, что содержание углерода не является признаком строгой принадлежности торфа к тем или иным видам и типам торфов (Ефремов и др., 1994; Sheng et al., 2004; Степанова, Миронычева-Токарева, 2010; Ефремова и др., 2016).

Литературные данные по содержанию углерода в торфяных залежах лесной зоны Западной Сибири значительно различаются: прежде всего в связи с тем, что приводятся показатели содержания общего ( $C_{\text{общ}}$ ) или органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ) в торфах или же в их органическом веществе.

Для показателей  $C_{\text{общ}}$  в торфах характерно значительное варьирование. Так, согласно данным Головацкой и др. (2019), содержание  $C_{\text{общ}}$  в торфах одного из южнотаежных эвтрофных болот изменяется с глубиной от 50 до 12%. Это обусловлено значительным влиянием зольности (чем она выше, тем ниже содержание  $C_{\text{общ}}$ ), а также степенью разложения. Поэтому содержание  $C_{\text{общ}}$  в низинных торфах обычно ниже, чем в переходных и верховых (табл. 1), и с глубиной постепенно снижается, достигая минимальных значений в придонном слое. Однако необходимо учитывать, что это характерно лишь для торфов, не обогащённых  $\text{CaCO}_3$ , так как высокое содержание карбонатов может оказывать влияние на результат аналитических исследований. Мы согласны с мнением Н.Б. Наумовой (2018), что многие исследователи не учитывают влияние  $\text{CaCO}_3$ , считая его ничтожно малым, и приравнивают полученные показатели содержания общего углерода к органическому. Вероятно, это вполне допустимо для торфов болот, залегающих на некарбонатных породах, но требует проверки для болот, в частности южной тайги и подтайги Западной Сибири, на почвах, обогащённых  $\text{CaCO}_3$ . Здесь в торфяных отложениях болот, особенно пойменного и притеррасного залегания, встречаются прослойки, обогащённые  $\text{CaCO}_3$ , и даже пласты болотно-озерного мергеля (гажи) (Классификация торфов..., 2000; Матухина, Михантьева, 2001; Архипов, Бернатонис, 2006).

**Таблица 1**

Среднее содержание углерода (%) в разных видах, группах и типах торфа болот Европейской части России и таёжной зоны Западной Сибири

Вид, группа, тип торфа	Лиштван, Король, 1975 <sup>1</sup>	Архипов, Маслов, 1998 <sup>2</sup>	Lapshina, Pologova, 2001 <sup>3/4</sup>	Головацкая, 2013 <sup>5/6</sup>	Beilman et al., 2009 <sup>7</sup>	По расчетам авторов данной статьи <sup>*8/9</sup>
I	II	III	IV	V	VI	VII
Тип низинный	58	55,5				
Группа древесная	58,4		46,8/52,8	42,6/46,5		46,2/51,9
Древесно-осоковый	58,6					46,8/51,9
Древесно-травяной	58,7					42,9/52,1
Группа древесно-травяная	58,7	56	48,7/54,3			47,2/51,9
Древесно-гипновый						40,5/52,2
Древесно-сфагновый						48,1/51,9
Осоковый	57,7				54,5	47,5/51,9
Тростниковый						
Травяной	57,8			30,9/41,4		42,2/52,2
Группа травяная	57,8		50,2/54,5			
Осоково-гипновый	57	57		37,2/46,0		45,7/52,0
Осоково-сфагновый						48,8/51,9
Травяно-гипновый				36,7/44,2		
Травяно-сфагновый						
Группа травяно-моховая	57,3		48,1/51,6			
Гипновый	56,6	54,1		31,3/49,0		46,8/51,9

Продолжение табл. 1.

I	II	III	IV	V	VI	VII
Сфагновый	57					48,4/51,9
Группа моховая	56,7		47,3/50,4			
Тип переходный	58,6	57				
Группа древесная	60		51,6/55,7	50,3/53,4	55,0	46,4/51,9
Древесно-осоковый						47,4/51,9
Древесно-травяной						45,7/52,0
Группа древесно-травяная	60,2		49,4/52,2	49,6/52,2		47,2/51,9
Древесно-гипновый						44,9/52,0
Древесно-сфагновый						47,3/51,9
Осоковый	58,6	57,8				46,9/51,9
Травяной						45,7/52,0
Группа травяная	58,6		52,9/55,1			
Осоково-сфагновый						47,2/51,9
Травяно-сфагновый	58			49,4/50,8		48,5/51,9
Пушицево-сфагновый				48,9/51,8		46,0/52,0
Группа травяно-моховая	58		51,3/54,9	49,2/51,5		
Гипновый	58				54,0	49,1/51,9
Сфагновый	56,6	55,8				47,08/51,9
Группа моховая	56,7		46,7/48,6			
Тип верховой	56	54,3				
Сосновый	61,1					44,0/52,1
Сосново-пушицевый	61,3					48,5/51,9
Сосново-сфагновый	59,9					40,5/52,2
Шейхериевый	57,9				56,0	47,8/51,9
Группа травяная	58,6				55,0	
Пушицево-сфагновый	57,6	57,1		40,5/42,0		48,1/51,9
Шейхериево-сфагновый	57					41,3/52,1
Травяно-сфагновый	57,4			49,4/50,8		
Группа травяно-моховая	57,4		50,2/51,3			
Фускум-торф	53,4	53,5	46,7/47,7	42,8/44,0		48,4/51,9
Комплексный	54,2					49,0/51,9
Медиум-торф	54,1	53		43,6/44,2		47,0/51,9
Ангустифолиум				41,2/42,8		48,9/51,9
Сфагновый мочажинный	53,8			44,4/45,7		49,0/51,9
Группа моховая	53,9		47,9/49,0		50,5	
Количество образцов	2014	22	49	51	115	1926

Примечание.

Содержание углерода, полученное аналитическими методами: для общего углерода ( $C_{\text{общ}}$ ): 2 – на горючую массу торфа, 5 – в торфе, 6 – в органическом веществе (ОВ) торфа; для органического углерода ( $C_{\text{орг}}$ ): 3 – в торфе, 1, 4 – в ОВ торфа; 7 – в ОВ остатков растений конкретных видов из торфа. \* – содержание углерода, полученное расчетным методом (Ефремова и др., 2016) по показателям зольности образцов торфа из Ведомости лабораторного анализа свойств торфов участка №22 торфяного месторождения Васюганское (Геологический отчет..., 1990): 8 – в торфе, 9 – в ОВ торфа. Пустые ячейки – данные отсутствуют.

При относительно низкой зольности торфов максимальные показатели содержания  $C_{\text{орг}}$  в торфе более характерны, наоборот, для низинных торфов, сложенных в основном остатками травянистых и древесных растений, органическое вещество которых наиболее подвержено трансформации в процессе торфогенеза. Так, согласно данным А.С. Прокушкина с соавторами (2017), на обследованных авторами болотах северной части Сым-Дубческого междуречья средней тайги, содержание  $C_{\text{орг}}$  в торфах возрастает в нижних слоях торфяных залежей, причём независимо от их типа, что обусловлено более высокой трансформацией органического вещества в более древних слоях. При этом, в зависимости от типа болота и глубины горизонта, содержание  $C_{\text{орг}}$

низинных болот (50–57%,  $p < 0,05$ ) характеризуется достоверно более высокими значениями по сравнению с торфами, сложенными сфагновыми мхами (46–49%).

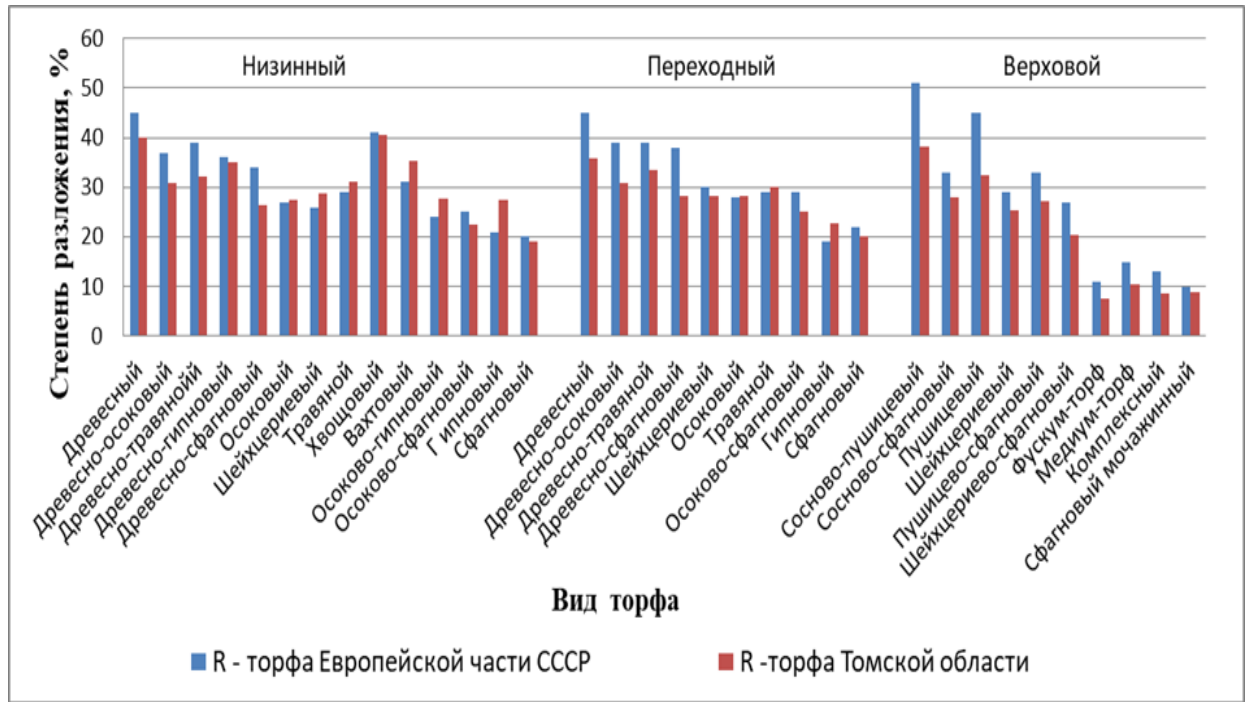
В связи со значительным влиянием зольности на содержание углерода проводят пересчёт содержания  $C_{орг}$  на органическое вещество (ОВ) торфа. При пересчёте более высокие показатели становятся характерными для переходных и низинных торфов нижних слоёв залежей. Однако эта закономерность может нарушаться. Так, для некоторых болот южной тайги (Головацкая, 2013) содержание  $C_{орг}$  в ОВ низинных торфов, несмотря на их высокую зольность, остаётся ниже, чем в переходных и некоторых верховых торфах (см. табл. 1). Необходимо отметить, что этот пересчёт, по нашему мнению, особенно актуален для получения корректных данных суммарных запасов углерода, депонированного в торфяных залежах конкретных территорий по усреднённым показателям содержания углерода в разных типах залежей.

Литературные данные по содержанию  $C_{орг}$  в ОВ торфа в болотах таёжной зоны Западной Сибири, даже полученные одним методом, например, сжиганием на элементных анализаторах, значительно варьируют. Так, содержание  $C_{орг}$  в ОВ торфа изменяется, согласно данным А.С. Прокушкина с соавторами (2017), от 46 до 57%, а по результатам других работ (Weilman et al., 2009), даже в относительно молодых торфяных залежах возрастом до 2000 лет – от 41,5 до 62,8%. Тем более значительно варьируют и отличаются средние показатели содержания  $C_{орг}$  для конкретных видов торфа, полученные разными аналитическими методами определения  $C_{орг}$  (см. табл. 1). Определение  $C_{орг}$  в торфах болот таёжной зоны Западной Сибири проводили по следующим методам: определение элементарного состава торфа по ГОСТ 2408.1-95 (Лиштван, Король, 1975), Либиха по ГОСТ 2408.1-95 (Архипов, Маслов, 1998), И.В. Тюрина по ГОСТ 26213-91 (Vleuten, Lapshina, 2001), В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой (1980) (Головацкая, 2013), а также сжиганием торфа на элементных анализаторах (Прокушкин и др., 2017) или в остатках разных видов растений из торфа (Weilman et al., 2009). Необходимо отметить, что практически все эти данные по болотам Западной Сибири получены по ограниченным выборкам, а данные по максимальной выборке образцов торфа (см. табл. 1), приведенные ранее (Лиштван, Король, 1975), получены по болотам Европейской части СССР.

Содержание  $C_{орг}$  в ОВ конкретных видов торфа зависит прежде всего от степени их разложения ( $R$ ). Поэтому для решения вопроса о корректности использования для торфов таёжной зоны на юго-востоке Западной Сибири показателей содержания  $C_{орг}$ , приведённых в работе (Лиштван, Король, 1975), было проведено сравнение средних показателей  $R$  для конкретных видов торфа Европейской части СССР (Лиштван, Король, 1975), с рассчитанными нами для торфов 15 типичных торфяных месторождений (42360 образцов) Томской области, данные по которым были взяты из фондовых материалов геологической разведки торфяных месторождений. Согласно полученным данным (рис. 1), в Томской области торфа характеризуются в основном меньшей степенью разложения, особенно преобладающие в данном регионе торфа верхового типа. Следовательно, использование  $C_{орг}$  (Лиштван, Король, 1975) для территории Западной Сибири, и, в частности, Томской области, нежелательно, так как приведёт к завышению оценок запасов депонированного углерода.

Таким образом, в настоящее время в литературных источниках отсутствуют репрезентативные данные по содержанию углерода для корректной оценки его запасов, депонированных в болотах таёжной зоны Западной Сибири.

Т.Т. Ефремовой с соавторами (2016) статистически доказана отрицательная связь содержания  $C_{орг}$  в торфах и моховых подстилках лесных болот с зольностью ( $A$ ). При значениях зольности в диапазоне от 5 до 68% и предложен расчётный экспресс-метод определения углерода в торфах по их зольности. О.А. Леоновой (2022) дана положительная оценка этого метода как позволяющего избежать высокой погрешности в аналитических работах. Для решения вопроса о правомерности применения данного метода для болот Томской области нами были использованы данные по ботаническому составу и зольности образцов торфа из отчета по детальной геологической разведке участка №22 торфяного месторождения Васюганское (Геологический отчет..., 1990). Для таёжной зоны Западной Сибири характерно доминирование слабо облесённых верховых болот с низкозольными торфами. Поэтому при расчётах мы были вынуждены исключить из общего количества в 7753 образцов образцы с зольностью менее 5%, вследствие чего выборка составила всего 1926 образцов торфа.



**Рисунок 1.** Степень разложения (R) разных видов торфа Европейской части СССР (Лиштван, Король, 1975) и Томской области.

Полученные данные расчёта содержания органического углерода в торфе ( $C_{\text{орг т}}$ ) были пересчитаны на содержание органического углерода в ОБ торфа ( $C_{\text{орг ОБ}}$ ) по формуле 1:

$$C_{\text{орг ОБ}} = C_{\text{орг т}} / (100 - A) \times 100 \quad (1),$$

где  $A$  – зольность торфа, %.

Согласно расчетным данным (см. табл. 1), содержание  $C_{\text{орг}}$  значительно выше в торфах низинного типа (на 3,6–15,5%) и верхового типа (на 3,4–7,7%), чем по данным, полученным по методу В.В. Пономаревой и Т.А. Плотниковой (1980) (Головацкая, 2013). В торфах переходного типа различия содержания  $C_{\text{орг}}$  менее заметны, но ниже на 1–4%, чем полученные аналитическим методом. Следовательно, применение данного расчётного метода для болот таёжной зоны Западной Сибири может дать существенную погрешность, но может оказаться полезным для мелкозалежных болот, особенно облесённых.

В мировой практике для оценки содержания почвенного органического углерода активно используют разные модификации дихроматометрического метода. Использование этого метода важно для создания баз данных по почвам мира, инвентаризации и мониторинге почвенных ресурсов (Шамрикова и др., 2022). При этом авторы отмечают, что отдельные модификации метода Тюрина, относящегося к вышеуказанному методу, могут включать процедуры, снижающие точность измерения содержания почвенного органического вещества за счёт неполного окисления углерода органических соединений, и предлагают для получения результатов, согласованных с методом высокотемпературного сжигания органического углерода на анализаторе, введение в расчёт содержания почвенного органического вещества поправочного коэффициента  $f = 1,15$ .

По мнению некоторых исследователей (Когут и др., 2023), наиболее оптимальным при мониторинге содержания и запасов  $C_{\text{орг}}$  в почвах, а, следовательно, и в торфах, является использование метода сухого сжигания на автоматических элементных анализаторах. При этом, согласно рекомендациям этих авторов, существующие сложности определения данным методом содержания почвенного  $C_{\text{орг}}$  в карбонатных почвах, можно разрешить дополнительным определением содержания неорганического углерода в них с помощью разложения карбонатов раствором  $\text{HClO}_4$  на экспресс-анализаторе АН-7529. В связи с наличием на рассматриваемой нами территории карбонатных торфов, мы присоединяемся к этому мнению. Преимуществом применения этого метода является и значительное снижение затрат времени на получение результатов исследования, что чрезвычайно важно при создании репрезентативной базы данных  $C_{\text{орг}}$  в торфах.

**Методические подходы к оценке запасов углерода в болотах Западной Сибири.** Для расчёта запасов  $C_{орг}$  в торфяной залежи конкретного пункта отбора проб торфа необходимы данные послойных кумулятивных масс ОВ торфа и содержания  $C_{орг}$  в ОВ. В.А. Степанова и Н.П. Миронычева-Токарева (2010) использовали упрощённый метод расчёта запаса  $C_{орг}$  в ОВ торфа в торфяной залежи, основанный на допущении, что его запасы составляют 50 % запасов ОВ торфов, независимо от их типа и вида. Однако рассматриваемая авторами динамика накопления углерода в процессе формирования трех олиготрофных болот средней тайги Западной Сибири, а именно, снижение содержания  $C_{орг}$  в ОВ торфа от 55% в нижней части торфяной залежи до 42% в верхних горизонтах, по нашему мнению, корректно отражает лишь изменения в накоплении ОВ торфа.

Для оценки общих запасов углерода болот конкретных территорий принято использовать показатели площадей болот или их типовых участков, средних глубин торфяной залежи, усреднённые показатели плотности (объёмной массы) абсолютно сухого торфа ( $P_{а.с.т.}$ ) или его ОВ ( $P_{орг}$ ), принятые для каждого типа болот, а также показатели содержания  $C_{орг}$  в торфе или в его ОВ ( $C_{орг\ ОВ}$ ) (Ефремов и др., 1994; Sheng et al., 2004; Borren, Bleuten, 2006; Инишева и др., 2012; Прокушкин и др., 2017). Принятые методы расчёта усреднённых показателей плотности и содержания углерода авторы не описывают, приводя лишь ссылки на использованные авторские данные и данные из многочисленных литературных и фондовых источников.

С.П. Ефремов с соавторами (1994) проводили расчёты запасов депонированного углерода не только для торфяных болот, заболоченных и болотных лесов, но и избыточно-увлажнённых оторфованных угодий по отдельным административным районам и торфяно-болотным регионам России. Расчёты запасов торфа и депонированного углерода выполнены с учетом типа залежи. Для повышения корректности оценок углерода, депонированного в глубоководных (более 1,5 м) болотах, расчёты проводили отдельно по торфогенному, срединному (основному) и придонному слоям залежи. Для каждого слоя были приняты свои усреднённые показатели  $P_{а.с.т.}$  и  $C_{орг}$ , а для менее глубоководных болот – в целом для каждого типа (табл. 2).

Таблица 2

Усреднённые показатели плотности торфов и их органического вещества для разных типов болот Западной Сибири

Тип болота	$\bar{P}_{а.с.т.}, \text{г/м}^3$		$\bar{P}_{орг}, \text{г/м}^3$			
	Ефремов и др., 1994		По расчётам авторов	Ефремов и др., 1994**	Инишева и др., 2012	Borren, Bleuten, 2006
Верховой	0,049/0,091/0,161*	0,073**	0,068	0,084***	0,073	0,049
Переходный	0,068/0,109/0,161*	0,085**	0,092	0,096***	0,085	0,074
Низинный	0,133/0,122/0,240*	0,133**	0,095	0,115***	0,133	0,118

Примечание.

\* – для торфогенного, срединного и придонного слоёв глубоководных болот. \*\* – для торфяных болот со средней глубиной менее 1,5 м. \*\*\* – пересчитанные по суммарным запасам органического вещества абсолютно сухого торфа и суммарным объёмам торфа, полученным авторами статьи на основании данных (Торфяные месторождения..., 1997).

Л.И. Инишева с соавторами (2012) проводили расчёты по торфяным месторождениям (в границе промышленной глубины залежи 0,9 м) таёжной зоны Западной Сибири с использованием необходимых данных из областных кадастровых справочников, приняв за показатели  $P_{орг}$  показатели  $P_{а.с.т.}$ , ранее приведенные для торфяных болот со средней глубиной менее 1,5 м (Ефремов и др., 1994). В. Боррен и В. Блеутен (Borren, Bleuten, 2006) для расчетов запасов углерода, депонированного в разных типах болот средней и южной тайги Западно-Сибирской равнины, предлагают использовать усреднённые показатели  $P_{орг}$  и  $C_{орг}$  в ОВ торфа, которые получены всего лишь по нескольким торфяным кернам (Bleuten, Lapshina, 2001; Borren et al., 2004). Вероятно, является неточной и оценка площади болот (Sheng et al., 2004): так, авторы, используя ГИС-технологии, выявили по космоснимкам значительно большие площади торфяных болот на территории всей Западной Сибири, даже без учёта мелководных заторфованных площадей, которые были учтены на этой территории С.П. Ефремовым с соавторами (1994). Кроме этого, из-за отсутствия данных о типовой принадлежности торфяных залежей авторы были вынуждены сделать

допущение о среднем содержании  $C_{орг}$  в ОВ торфа равном 52%, что достаточно близко к величине  $C_{орг} 51,8 \pm 2,5\%$ , предложенной ранее для всех типов болот Западной Сибири (Lapshina, Pologova, 2001). Ю. Шенг с соавторами (Sheng et al., 2004) была создана обширная база данных свойств торфов по фондовым материалам геологической разведки торфяных месторождений Западной Сибири, которая, однако, в настоящее время недоступна для российских ученых.

Принятые вышеуказанными авторами показатели  $P_{a.c.t. ср}$  и  $P_{орг ср}$  (см. табл. 2) имеют отличия, что закономерно, так как усреднение проводилось для разных по площади территорий и основано на разных по объему выборках показателей.

Выполнена оценка правомерности применения усреднённых показателей плотности а. с. торфа ( $\bar{P}_{a.c.t.}$ ) и его ОВ ( $\bar{P}_{орг}$ ) из разных литературных источников (см. табл. 2) к данным областных кадастров торфяных месторождений (ТМ). Для этого проведено сравнение показателей  $\bar{P}_{орг}$  и суммарных запасы ОВ по каждому типу ТМ, рассчитанных по данным кадастрового справочника «Торфяные месторождения Томской области, 1997» и пересчитанных с использованием усреднённых показателей из табл. 2. Эти данные были получены следующим образом. Для каждого ТМ по их площади ( $S_{ТМ}$ ) и средней глубине ( $h_{ср}$ ) рассчитаны объёмы торфа ( $V_T$ ), по формуле 2. Запасы торфа 40% влажности ( $Q_{40\%W}$ ) каждого ТМ были пересчитаны на запасы а.с.т. ( $Q_{a.c.t.}$ ), по формуле 3, и его ОВ ( $Q_{орг}$ ), по формуле 4. Подсчитаны суммарные  $Q_{орг} (\sum Q_{орг})$  и  $V_T (\sum V_T)$  по всем ТМ (рис. 2), и получен показатель  $\bar{P}_{орг}$  по формуле 5 (см. табл. 2 по расчётам авторов статьи) на основании данных (Торфяные месторождения..., 1997).

$$V_T = S_{ТМ} / 10000 \times h_{ср}, \text{ тыс. м}^3 \quad (2),$$

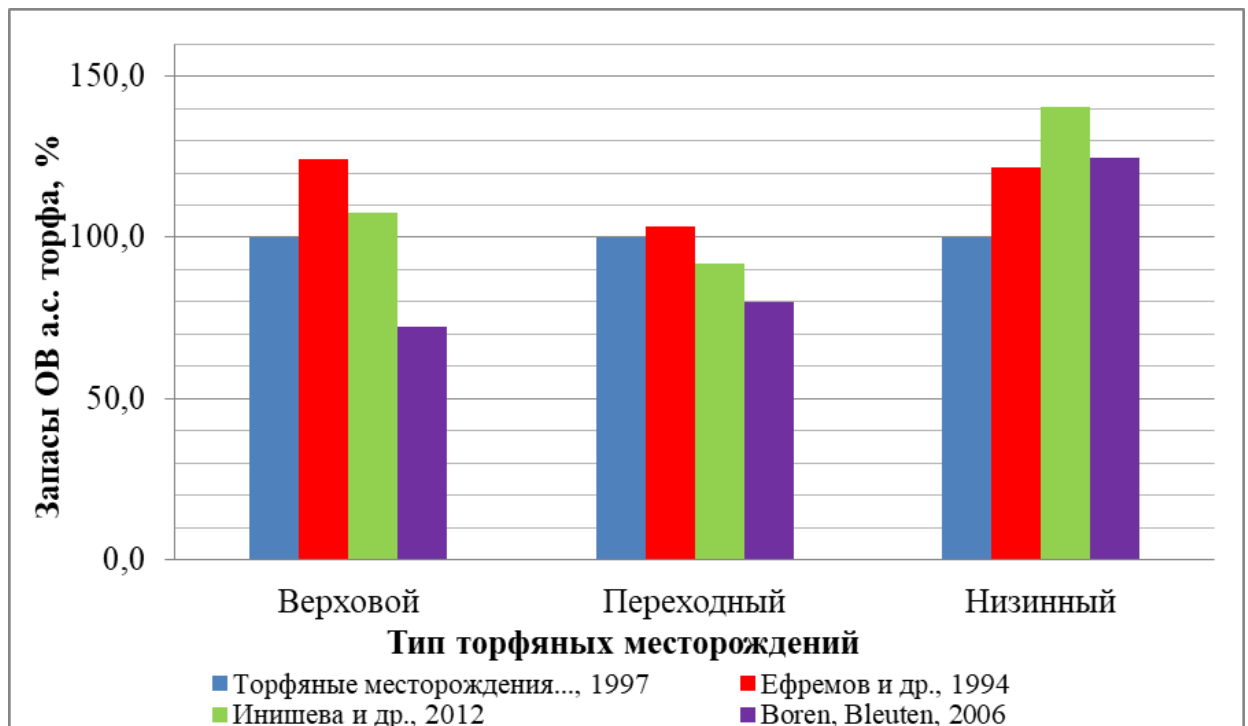
где  $S_{ТМ}$  – площадь ТМ, га;  $h_{ср}$  – средняя глубина ТМ, м; 10000 – коэффициент пересчёта га в тыс. м<sup>2</sup>.

$$Q_{a.c.t.} = Q_{40\%W} \times 0,6, \text{ тыс. т} \quad (3),$$

$$Q_{ов} = Q_{a.c.t.} - Q_{a.c.t.} \times A_{ср} / 100, \text{ тыс. т} \quad (4),$$

где 0,6 – доля а.с. вещества торфа;  $A_{ср}$  – средняя зольность, %.

$$P_{орг} = \sum Q_{орг} / \sum V_T, \text{ г/м}^3 \quad (5).$$



**Рисунок 2.** Процентное отношение суммарных запасов органического вещества абсолютно сухого торфа торфяных месторождений Томской области по данным (Торфяные месторождения..., 1997) и с использованием данных из литературных источников.



Затем была проведена сортировка кадастровых и пересчитанных данных в четыре блока по типам торфяных месторождений.

В каждом блоке, используя  $V_T$  и  $\bar{P}_{орг}$  (см. табл. 2, Инишева и др., 2012; Borren, Bleuten, 2006), пересчитаны  $Q_{орг}$  по каждому ТМ и получены их  $\sum Q_{орг}$  (рис. 2). В связи с отсутствием у Ефремова и др. (1994)  $\bar{P}_{орг}$  в каждом блоке, используя  $V_T$  и показатели  $\bar{P}_{а.с.т.}$  (см. табл. 2, Ефремов и др., 1994), дифференцировано для болот, имеющих разную  $h_{ср}$ , рассчитаны  $Q_{а.с.т.}$ , которые были пересчитаны с учетом кадастровых данных по  $A_{ср}$  в  $Q_{орг}$ , а  $\sum Q_{орг}$  и  $\sum V_T$  легли в основу расчета  $\bar{P}_{орг}$  (см. табл. 2, Ефремов и др., 1994). По данным, приведённым в таблице 2, видно, что максимальные значения  $\bar{P}_{орг}$  для верховых и переходных ТМ получены при пересчете  $\bar{P}_{а.с.т.}$  по Ефремову и др. (1994), а для низинных – согласно Инишевой и др. (2012). То касается рисунка 2, данные по  $\sum Q_{орг}$  разных типов болот значительно отличаются от кадастровых, которые получены по данным широкомасштабных натуральных и аналитических исследований, как в сторону повышения (на 3–41%), так и понижения (на 8–28%). При этом максимально отличаются от кадастровых данные, полученные для болот средней и южной тайги Западно-Сибирской равнины (Borren, Bleuten, 2006) и ее таёжной зоны (Инишева и др., 2012), а для болот верхового типа и от данных Ефремова и др. (1994). Следовательно, использовать имеющиеся в литературных источниках показатели  $\bar{P}_{а.с.т.}$  и  $\bar{P}_{орг}$  для расчета запасов углерода в ТМ более ограниченных территорий Западной Сибири некорректно.

**Усреднённые показатели содержания углерода в торфяных залежах болот разного типа.**

Для основных типов болот Западной Сибири одни из авторов (Lapshina, Pologova, 2001) приводят среднюю величину  $C_{орг}$   $51,8 \pm 2,5\%$  в ОВ торфа. Однако расчёт этого показателя авторами проведён по небольшой выборке (49 образцов), в которой торфа верхового типа составляют всего лишь около 32%, а низинного типа – более 54%. В то же время в центральной части Западной Сибири от подтайги до северной тайги преобладают (от 46 до 76%) запасы торфа в залежах верхового типа (Лисс и др., 2001): во II–IV торфоболотных зонах, соответствующих подзонам южной, средней и северной (до Сибирских увалов) тайги доля верховых торфов составляет от 50 до 94% (Логинов, Хорошев, 1972), а в запасах а.с.т. Большого Васюганского болота соответствующая составляет 50,2% (Ваганов и др., 2005). При этом в залежах верхового типа преобладают слабо преобразованные торфа моховой группы с доминированием фускум-торфа, в которых среднее  $C_{орг}$  равно 49 и 47,7%, соответственно (Lapshina, Pologova, 2001). Следовательно, усреднённый показатель 51,8%, используемый Ю. Шенгом с соавторами (Sheng et al., 2004) для оценки запасов  $C_{орг}$  в торфяных болотах Западной Сибири как консервативный, по нашему мнению, может оказаться несколько завышенным.

Принятые другими авторами усреднённые показатели содержания  $C_{орг}$  в ОВ а.с.т. для разных типов болот (Ефремов и др., 1994; Borren et al., 2004; Инишева и др., 2012) приведены в таблице 3.

**Таблица 3**

Усреднённые показатели содержания углерода для разных типов болот Западной Сибири

Тип болота	$\bar{C}_{орг}, \% \text{ в а.с.т.}$		$\bar{C}_{орг}, \% \text{ в ОВ а.с.т.}$		
	Ефремов и др., 1994	Ефремов и др., 1994	Ефремов и др., 1994	Инишева и др., 2012	Borren et al., 2004
Верховой	46,7/50,3/54,3*	53,9**	50,24***	55,5	51,1
Смешанный	–	–	–	56,03	–
Переходный	49,8/51,1/54,6*	51,8**	51,10***	56,03	51,2
Низинный	49,1/55,4/57,3*	50,4**	54,84***	55,3	53

Примечание.

$\bar{C}_{орг}$  – усреднённые показатели содержания органического углерода в абсолютно сухом торфе (а.с.т.) и в органическом веществе абсолютно сухого торфа (ОВ а.с.т.). \* – для торфогенного, срединного и придонного слоёв глубоководных болот. \*\* – для торфяных болот со средней глубиной менее 1,5 м. \*\*\* – пересчитаны с использованием данных (Торфяные месторождения..., 1997). Прочерк – данные отсутствуют.

Для сравнения имеющихся в литературных источниках данных по содержанию  $\bar{C}_{орг}$  в ОВ а.с.т. ( $\bar{C}_{орг\text{ ов}}$ ) в разных типах торфяных месторождений или болот, ранее опубликованные показатели  $\bar{C}_{орг}$  в а.с.т. ( $\bar{C}_{орг\text{ а.с.т.}}$ ) (Ефремов и др., 1994) пересчитаны на  $\bar{C}_{орг\text{ ов}}$  по каждому ТМ

внутри блоков типов ТМ Томской области. Для этого для каждого блока был использован  $\sum Q_{\text{а.с.т.}}$ , ранее полученный для другого варианта расчёта  $P_{\text{орг}}$  (Ефремов и др., 1994). Сначала по  $Q_{\text{а.с.т.}}$  каждого ТМ и  $\bar{C}_{\text{орг а.с.т.}}$ , принятого в зависимости от  $h_{\text{ср}}$  ТМ (см. табл. 3), рассчитан  $Q_{\text{Сорг}}$  в а.с.т. ( $Q_{\text{Сорг а.с.т.}}$ ) по формуле 6, а с учетом  $A_{\text{ср}}$  ТМ, рассчитан  $Q_{\text{Сорг в ОВ}}$  ( $Q_{\text{Сорг ОВ}}$ ) по формуле 7.

$$Q_{\text{Сорг а.с.т.}} = Q_{\text{а.с.т.}} \times \bar{C}_{\text{орг а.с.т.}} / 100 \quad (6),$$

$$Q_{\text{Сорг ОВ}} = Q_{\text{Сорг а.с.т.}} - Q_{\text{Сорг а.с.т.}} \times A / 100 \quad (7).$$

Затем путем суммирования  $Q_{\text{Сорг ОВ}}$  и  $V_{\text{т}}$  по всем ТМ каждого блока рассчитан  $\bar{C}_{\text{орг ОВ}}$  для разного типа ТМ по формуле 8.

$$\bar{C}_{\text{орг ОВ}} = \sum Q_{\text{Сорг ОВ}} / \sum V_{\text{т}}, \% \quad (8).$$

Как следует из таблицы 3, усреднённые показатели содержания  $\bar{C}_{\text{орг}}, \%$  в ОВ а.с.т. для разных типов болот Западной Сибири имеют достаточно близкие значения у одних авторов (Ефремов и др., 1994; Borgren et al., 2004) и значительно завышенные – у других (Инишева и др., 2012).

Следовательно, вопрос о правомерности использования этих усреднённых показателей для оценки запасов углерода в болотах или торфяных месторождениях конкретных территорий Западной Сибири остаётся открытым до получения по ним репрезентативных данных содержания углерода в различных видах торфа и соотношения видов торфа в залежах разного типа.

#### МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ ЗАПАСОВ УГЛЕРОДА ПО ДАННЫМ КАДАСТРОВ ТОРФЯНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

В настоящее время имеются кадастры торфяных месторождений (ТМ) конкретных административных областей Западной Сибири. По данным кадастровых справочников и фондовых материалов геологической разведки ТМ возможно получение наиболее точных оценок запасов депонированного углерода. Для расчёта запасов органического углерода ( $Q_{\text{Сорг}}$ ) в ТМ необходимы данные по  $Q$  органического вещества ( $Q_{\text{ОВ}}$ ) абсолютно сухого торфа (а.с.т.) и усреднённому показателю содержания  $C_{\text{орг}}$  в ОВ в зависимости от типа торфяного месторождения. В кадастровых справочниках уже имеются достоверные, основанные на полевых и аналитических исследованиях, данные по площадям ( $S$ ), средним глубинам ( $h_{\text{ср}}$ ) торфяной залежи (ТЗ),  $Q$  торфа 40% влажности ( $Q_{40\%W}$ ) и усреднённые показатели степени разложения ( $R_{\text{ср}}$ ), зольности ( $A_{\text{ср}}$ ) и естественной влажности ( $W_{\text{ест}}$ ) не только в целом по ТМ, но и по их участкам, а также отдельно по их ТЗ разного типа в пределах балансовых (с  $A$  торфов не более 35%) и забалансовых (с  $A$  более 35%) запасов торфа. Поэтому прежде всего создаётся база данных, содержащая все имеющиеся в кадастровом справочнике данные.

Согласно рекомендациям некоторых исследователей (Сорокин и др., 1976), при проведении геологоразведочных работ для расчёта  $Q_{40\%W}$  торфа конкретного торфяного месторождения используются данные его  $S$ , в границах промышленной глубины торфяной залежи, средней глубины т.з. и плотности ( $P$ ) торфа из Таблицы Синадского (Таблицы..., 1969), в которых приведены данные выходов воздушно-сухого торфа при условной 40 % влажности при разных сочетаниях показателей  $R$  и естественной влажности ( $W_{\text{ест}}$ ), основанные на обширном массиве данных аналитических исследований проб торфа. Поэтому данные кадастровых справочников позволяют получить наиболее достоверные, детальные данные и по запасам  $Q_{\text{Сорг}}$ .

Далее для расчёта  $Q_{\text{а.с.т.}}$  и  $Q_{\text{ОВ}}$  ТМ, его отдельных участков и торфяной залежи разного типа, используются формулы 3 и 4. Так как, согласно выполненному ранее анализу литературных источников, в настоящее время отсутствуют репрезентативные данные по  $C_{\text{орг}}$  в торфах Западной Сибири, необходимые для расчетов их усреднённых показателей для болот разного типа. Поэтому представляется целесообразным использовать данные по Европейской части СССР, которые необходимо преобразовать в открытую базу данных по  $C_{\text{орг}}$  для возможности корректировки ее по мере поступления новых данных по западносибирским торфам. Для расчёта усреднённых показателей необходимы данные о процентном соотношении видов торфа в торфяных залежах разного типа. Для этого по кадастровому справочнику проводят выбор типичных торфяных месторождений с учетом их типовой принадлежности, геоморфологического положения, размера и средней глубины торфяной залежи. Затем по фондовым материалам геологической разведки этих ТМ создают общую базу данных свойств торфов, в которой для каждого пункта отбора образцов указывают тип торфяной залежи и вид торфа для каждого ее 25-ти см слоя. В пределах этой базы

данных всю информацию по пунктам отбора проб торфа делят на четыре блока по типам торфяной залежи. Затем по каждому блоку проводят сортировку по типам и видам торфа и рассчитывают процент участия каждого вида торфа в пределах каждого блока типов торфяной залежи по формуле 9:

$$F_k = \frac{N_k}{\sum_{i=1}^n N_i}, k = 1..n \quad (9),$$

где  $N_k$ ,  $N_i$  – количество проб определенного вида торфа в блоке конкретного типа торфяной залежи;  $n$  – общее количество видов торфа.

Среднее содержание  $\bar{C}_{орг}$  для каждого типа торфяного месторождения или его торфяной залежи рассчитывают как сумму произведений содержания  $C_{орг}$  каждого вида торфа, по созданной базе данных  $C_{орг}$ , на процент участия его в блоке конкретного типа ТЗ по формуле 10:

$$\bar{C}_{орг} = \sum_{i=1}^n C_{орг}^{(i)} * F_i \quad (10),$$

где  $C_{орг}^{(i)}$  – содержание  $C_{орг}$  для каждого вида торфа по базе данных  $C_{орг}$ , %;  $F_i$  – доля каждого вида торфа в блоке конкретного типа торфяной залежи, %.

В связи с тем, что торфяные месторождения района исследования находятся на разных стадиях разведки, детальность характеристик запасов их торфов в кадастровом справочнике значительно различается. Для разведанных торфяных месторождений с категориями изученности запасов торфа: А, В, С1 и С2 пересчёт запасов а.с.т. и ОВ, для получения наиболее корректных данных, проводят следующим образом:

– при наличии несколько участков разных стадий разведки – по каждому участку при условии совпадения сумм их площадей и запасов с суммарными показателями по торфяному месторождению;

– при наличии торфяной залежи только одного типа – по категориям торфяного сырья балансовых запасов: малой степени разложения ( $R$ ); средней  $R$  с зольностью до 23%; средней и высокой  $R$  с зольностью от 23 до 35%) и забалансовым, с зольностью более 35%.

Для прогнозно-оценённых торфяных месторождений или их участков (с категориями изученности прогнозных ресурсов (запасов) торфа Р1–Р3, как правило, даже при наличии нескольких типов торфяной залежи, приведены лишь ресурсы торфа и средняя зольность ( $A_{ср}$ ), общие для всего месторождения. В этом случае ресурсы каждого типа залежи рассчитывают пропорционально запасам аналогичных типов залежей торфяных месторождений – аналога, имеющегося в кадастре, а при его отсутствии в кадастре – вновь, в процессе выполнения работы, принятого на основании сходства геоморфологического положения, площади и средней глубины торфяной залежи. При отсутствии необходимых данных для выбора торфяного месторождения – аналога запасы ресурсов для разных типов торфяных залежей рассчитывают пропорционально количеству типов торфяной залежи. Аналогично рассчитывают и показатели  $A_{ср}$  для каждого типа их залежи. Так, при наличии нескольких типов торфяных залежей для восполнения отсутствующих у них показателей  $A_{ср}$  проводят пересчёт  $A_{ср}$  для каждого типа с учетом доли запасов торфа этого же типа торфяной залежи у торфяного месторождения – аналога. Иногда отсутствуют и некоторые другие необходимые для расчетов содержания  $C_{орг}$  данные. Восполнить эти данные возможно следующим образом. При отсутствии показателя  $A_{ср}$  забалансовых запасов прогнозно-разведанного участка торфяного месторождения принимают показатель  $A_{ср}$  забалансовых запасов других разведанных участков этого же торфяного месторождения или его аналога, имеющегося или вновь присвоенного в процессе выполнения работы. При отсутствии показателя  $A_{ср}$  категории торфяного сырья средней и высокой степени разложения с зольностью от 23 до 35% принимают средний показатель для этой категории – 29,5%, а для категории с зольностью более 35–42,5%.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ литературных источников выявил недостаточное количество аналитических данных по содержанию органического углерода ( $C_{орг}$ ) в торфах Западной Сибири для получения статистически достоверных усреднённых его показателей. Поэтому актуально создание единой открытой базы данных  $C_{орг}$  в торфах этого региона. Для этого необходимо проведение дополнительных аналитических исследований содержания  $C_{орг}$  в разных видах торфов единым методом, предпочтительно методом сухого сжигания на автоматических элементных анализаторах, по репрезентативной выборке образцов торфа и с обязательным параллельным определением

зольности и степени разложения. В высокозольных низинных торфах дополнительно необходимо определение содержания неорганического углерода.

Использование имеющихся в литературных источниках усреднённых показателей плотности торфа и его органического вещества некорректно для расчетов запасов углерода на более ограниченных территориях, в частности Томской области, и требует уточнения или же использования кадастровых данных, в основу которых положено определение свойств образцов торфа, отобранных в процессе многолетних геологоразведочных работ. Это же касается и усреднённых показателей содержания углерода для разных типов болот более ограниченных территорий. Наиболее объективные данные для таких территорий могут быть получены при выявлении по фондовым материалам геологической разведки типичных торфяных месторождений, видов торфов, слагающих залежи конкретных типов болот, определение участия каждого вида торфа и присвоения показателя содержания в нем углерода.

Предложена методика расчёта запасов углерода в торфяных месторождениях по данным кадастровых справочников и фондовых материалов геологической разведки типичных торфяных месторождений Западной Сибири, включающая следующие этапы:

1) аналитические исследования содержания  $C_{орг}$  в типичных видах торфов по репрезентативной выборке образцов для расчёта его средних показателей;

2) расчёт усреднённых показателей содержания  $C_{орг}$  для разных типов торфяных месторождений на основе содержащихся в фондовых материалах геологической разведки типичных для области торфяным месторождениям данных по типу и видовой принадлежности образцов торфа;

3) пересчёт запасов торфа 40% влажности для каждого месторождения и их типовых участков из кадастрового справочника на органическое вещество абсолютно сухого торфа;

4) определение суммарных запасов углерода по всем торфяным месторождениям.

Методика требует использования интегрированной базы данных, объединяющей данные по содержанию углерода в видах торфа, фондовые данные геологической разведки торфяных месторождений региона, данные кадастровых справочников по характеристикам торфяных месторождений макрорегиона. Привлекая эти категории данных, описанная методика позволяет построить уточнённые оценки содержания углерода. Дальнейшая разработка автоматизированной системы на основе реальных данных и вышеописанной методики позволит получать уточнённые и конкретизированные оценки запасов углерода в автоматическом режиме за минимальное время для любых имеющихся достаточных данных по любому региону.

#### ФИНАНСОВАЯ ПОДДЕРЖКА

Работа выполнена в рамках реализации важнейшего инновационного проекта государственного значения "Разработка системы наземного и дистанционного мониторинга пулов углерода и потоков парниковых газов на территории Российской Федерации, обеспечение создания системы учёта данных о потоках климатически активных веществ и бюджете углерода в лесах и других наземных экологических системах» (рег. № 123030300031-6).

#### ЛИТЕРАТУРА

Архипов В.С., Бернатонис В.К. Распределение кальция в торфяных залежах Центральной части Западной Сибири // Почвоведение. 2006. № 3. С. 293–302.

Архипов В.С., Маслов С.Г. Состав и свойства типичных видов торфа центральной части Западной Сибири // Химия растительного сырья. 1998. № 4. С. 9–16.

Бирюкова О.Н., Орлов Д.С. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. 1995. № 1. С. 21–32.

Ваганов Е.А., Ведрова Э.Ф., Верховец С.В., Ефремов С.П., Ефремова Т.Т., Круглов В.Б., Онучин А.А., Сухинин А.И., Шибистова О.Б. Леса и болота Сибири в глобальном цикле углерода // Сибирский экологический журнал. 2005. № 4. С. 631–649.

Вомперский С.Э., Иванов А.И., Цыганова О.П., Валяева Н.А., Глухова Т.В., Дубинин А.И., Глухов А.И., Маркелова Л.Г. Заболоченные органогенные почвы и болота России, и запасы углерода в их торфах // Почвоведение. 1994. № 12. С. 17–25.

- 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. Москва: Миннаука РФ, 1999. С. 124–145.
- Геологический отчет о детальной разведке торфяного месторождения «Васюганское» (участок № 22) Чаинского района Томской области. Горький, 1990. Т. 2. 257 с.
- Головацкая Е.А. Потоки углерода в болотных экосистемах южной тайги Западной Сибири. Диссертация ... д-р биол. наук. Томск, 2013. 325 с.
- Головацкая Е.А., Веретенникова Е.Э., Никонова Л.Г. Биологическая продуктивность и запасы углерода на эвтрофном болоте // X Галкинские Чтения: сб. матер. Всерос. науч. конф. (Санкт-Петербург, 4–6 февраля 2019 г.) / Юрковская Т.К. и др. (отв. ред.). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. С. 40–42.
- 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. С. 1–18. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194).
- ГОСТ 2408.1-95. Топливо твёрдое. Методы определения углерода и водорода. Москва: Издательство стандартов. 2001. 20 с.
- ГОСТ 26213-91. Почвы. Методы определения органического вещества. Москва: Издательство стандартов. 1992. 6 с.
- 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.
- Ефремова Т.Т., Аврова А.Ф., Ефремов С.П. Расчётный метод определения углерода в торфах и моховых подстилках лесных болот по зольности растительного субстрата // Сибирский лесной журнал. 2016. № 6. С. 73–83. DOI: [10.15372/SJFS20160607](https://doi.org/10.15372/SJFS20160607).
- Инишева Л.И., Сергеева М.А., Смирнова О.Н. Депонирование и эмиссия углерода болотами Западной Сибири // Научный диалог. 2012. № 7. С. 61–74. URL: <https://studylib.ru/doc/2126828/deponirovanie-i-e-missiya-ugleroda-bolotami> (дата обращения 16.05.2023).
- Когут Б.М., Милановский Е.Ю., Хаматнуров Ш.А. О методах определения содержания органического углерода в почвах (критический обзор) // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2023. Вып. 114. С. 5–28. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-5-28](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28).
- Классификация торфов и торфяных залежей Западной Сибири / Составители: Л.Г. Матухин, В.Г. Матухина, И.П. Васильев. Новосибирск: Изд-во СОРАН, 2000. 90 с.
- Леонова О.А. Разнообразие подходов к определению содержания углерода в торфах // Известия Тульского государственного университета. Естественные науки. 2022. Вып. 3. С. 71–80. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-3-71-79](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-3-71-79).
- Лисс О.Л., Абрамова Л.И., Аветов Н.А., Березина Н.А., Инишева Л.И., Курнишкова Т.В., Слука З.А., Толпышева Т.Ю., Шведчикова Н.К. Болотные системы Западной Сибири и их природоохранное значение. Тула: Гриф и К°, 2001. 584 с.
- Лиштван И.И., Король Н.Т. Основные свойства торфа и методы их определения. Минск: Наука и техника, 1975. 320 с.
- Логинов П.Е., Хорошев П.И. Торфяные ресурсы Западно-Сибирской равнины. Москва: Геолторфразведка, 1972. 148 с.
- Матухина В.Г., Михантьева Л.С. Фосфаты, карбонаты и сапропели в торфах Западной Сибири (закономерность образования, ресурсы, направления использования) // Геология и геофизика. 2001. № 4. С. 596–604.
- Наумова Н.Б. К вопросу об определении содержания органического углерода в почве // Почвы и окружающая среда. 2018. Том 1. № 2. С. 98–103. DOI: [10.31251/pos.v1i2.13](https://doi.org/10.31251/pos.v1i2.13).
- Пономарева В.В., Плотникова Т.А. Гумус в почвообразовании (методы и результаты изучения). Ленинград: Наука, 1980. 222 с.
- Прокушкин А.С., Карпенко Л.В., Токарева И.В., Корец М. А., Покровский О. С. Углерод и азот в болотах северной части Сым-Дубческого междуречья // География и природные ресурсы. 2017. № 2. С. 114–123. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-2\(114-123\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123)).
- Сорокин В.Н., Задунайский Я.Н., Стеклов И.А. Методическое руководство по разведке торфяных месторождений. Москва: Геолторфразведка, 1976. 572 с.

- Степанова В. А., Миронычева-Токарева Н. П. Распределение углерода в торфяной толще олиготрофного комплекса средней тайги Западной Сибири // Гео-Сибирь-2010: сб. матер. VI междунар. науч. конгр. (Новосибирск, 19-29 апреля 2010 г.). Новосибирск: СГГА. 2010. Т. 4. Ч. 2. С. 109–113.
- Таблицы для определения выхода воздушно-сухого торфа в тоннах, при 40 % условной влажности из 1000 куб. м торфа. Приложение к «Методическому руководству по камеральной обработке материалов разведки торфяных месторождений» / Составитель: А.А. Синадский. Москва: Гипроторфразведка, 1969. 12 с.
- Торфяные месторождения Томской области (справочник по состоянию изученности на 01.01.1996 г.). Новосибирск: СНИИГГиМС, 1997. 405 с.
- Тюрин И.В. Новое видоизменение объемного метода определения гумуса с помощью хромовой кислоты // Почвоведение. 1931. № 6. С. 36–47.
- Шамрикова Е.В., Ванчикова Е.В., Кондратёнок Б.М., Лаптева Е.М., Кострова С.Н. Проблемы и ограничения дихроматометрического метода измерения содержания почвенного органического вещества (обзор) // Почвоведение. 2022. № 7. С. 787–794. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097>.
- Beilman D. W., MacDonald G. M., Smith L. C., Reimer P. J. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years // *Global Biogeochemical Cycles*. 2009. Vol. 23. Iss. 1. P. 1–12. DOI: [10.1029/2007GB003112](https://doi.org/10.1029/2007GB003112).
- Belyea LR, Malmer N Carbon sequestration in peatland: patterns and mechanisms of response to climate change // *Global Change Biology*. 2004. Vol. 10. Iss. 7. P. 1043–1052. DOI: [10.1111/j.1529-8817.2003.00783.x](https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00783.x).
- Bleuten W. and Lapshina E.D. Carbon storage and atmospheric exchange by West Siberian peatlands. Utrecht: Utrecht University, 2001. 116 p.
- Borren W. and Bleuten W. Simulating Holocene carbon accumulation in a Western Siberian watershed mire using a 3-D dynamic modeling approach // *Water Resources Research*. 2006. Vol. 42. W12413. 13 p. DOI: [10.1029/2006WR004885](https://doi.org/10.1029/2006WR004885).
- Borren W., Bleuten W. and Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia // *Quaternary Research*. 2004. Vol. 61. Iss. 1. P. 42–51. DOI: [10.1016/j.yqres.2003.09.002](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002).
- Ciais P., Tagliabue A., Cuntz M., Bopp L., Scholze M., Hoffmann G., Laurantou A., Harrison S. P., Prentice I. C., Kelley D. I., Koven C. and Piao S. L. Large inert carbon pool in the terrestrial biosphere during the Last Glacial Maximum // *Nature Geoscience*. 2014. Vol. 5. P. 74–79.
- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming // *Ecological Applications*. 1991. Vol. 1. Iss. 2. P. 182–195. DOI: [10.2307/1941811](https://doi.org/10.2307/1941811).
- IPCC: 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, 2021. [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 16.05.2023).
- Lappalainen E. *Global Peat Resources*. Jyska: International Peat Society and Geological Survey of Finland, 1996. 366 p.
- Lapshina E.D., Pologova N.N. Carbon accumulation. In book: *Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands*. Utrecht: Utrecht Univ., 2001. p. 37–46.
- Moore T.R., Roulet N.T., Waddington J.M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands // *Climatic Change*. 1998. Vol. 40. P. 229–245.
- Novikov S.M., Usova L.I. New data on the swamp areas and peat storage on the territory of Russia // *Dynamics of mire ecosystems of Northern Eurasia in Holocene: Proc. of the Intern. Symp. (Petrozavodsk, 5–9 October 1998)* / Elina G.A et al. (ed.). Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1998. P. 32–34.
- Schurr E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven G.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natal S.M., Olefeldt D., Romanowsky V.E., Schäfer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature*. 2015. Vol. 520. Iss. 7546. P. 171–179.
- 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. DOI: [10.1029/2003GB002190](https://doi.org/10.1029/2003GB002190).
- Yu Z., Loisel J., Brosseau D.P., Beilman D.W., Hunt S.J. Global peatland dynamics since the last glacial maximum // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. Iss. 13. L13402. DOI: [10.1029/2010GL043584](https://doi.org/10.1029/2010GL043584).

Поступила в редакцию 21.07.2023

Принята 30.08.2023

Опубликована 07.09.2023

**Сведения об авторах:**

**Прейс Юлия Ивановна** – кандидат биологических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [preisyui@rambler.ru](mailto:preisyui@rambler.ru)

**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)

**Кабанов Михаил Михайлович** – младший научный сотрудник лаборатории геоинформационных технологий, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (г. Томск, Россия); [mike.kabanov@gmail.com](mailto:mike.kabanov@gmail.com)

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.



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

**DEVELOPMENT OF THE METHODOLOGICAL APPROACH FOR THE ESTIMATION OF CARBON STOCKS IN PEAT DEPOSITS OF WEST SIBERIA**

© 2023 Yu. I. Preis , E. A. Golovatskaya , M. M. Kabanov 

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

**The aim of the study.** *Development of the methodical approach to the estimation of carbon stocks in peat deposits of West Siberia, based on the analysis of available published and archived materials, allowing rapid reassessment of carbon stocks once new data is acquired.*

**Methods.** *Analysis of published data on carbon content and methodical approaches to the estimation of carbon stocks in swamp ecosystems of West Siberia. Processing the data contained in “Tomsk region peat deposits inventory” and detailed archived materials on specific deposits to validate the existing and to develop a new optimal approach to the estimation of carbon stocks in peat deposits of West Siberia.*

**Results.** *The lack of representative data on  $C_{org}$  content in West Siberian peats is revealed. The authors demonstrate the necessity to revisit current estimations of peat density and  $C_{org}$  as averaged over different types of swamps with the aim to improve and optimize estimations of carbon stocks in the swamps of the region. New method, based on the data in region inventories and detailed archived materials of geological surveys in West Siberia, is suggested to assess carbon stocks in peat deposits. The algorithm, taking into account all the information available, is also presented.*

**Conclusions.** *To optimize and refine the estimation of carbon stocks in peat deposits of West Siberia it is necessary to carry out large-scale analytic research using a unified method and to develop an open database of  $C_{org}$  content in organic matter of different peat types, determining for the high-ash fen peats the non-organic carbon content. Methodical approach is suggested to estimate carbon stocks based on using most of the data, available in regional inventories and archived materials of geological surveys in order to enhance the quality of estimation.*

**Key words:** *methodical approach; carbon stocks; peat deposits; West Siberia.*

**How to cite:** *Preis Yu.I., Golovatskaya E.A., Kabanov M.M. Development of the methodical approach for the estimation of carbon stocks in peat deposits of West Siberia // The Journal of Soils and Environment. 2023. 6(2). e209. DOI: [10.31251/pos.v6i2.209](https://doi.org/10.31251/pos.v6i2.209). (in Russian with English abstract).*

**FUNDING**

The study was financially supported by the project No. 123030300031-6 “Development of the field and remote monitoring system of carbon pools and greenhouse gases’ flows over the territory of Russian Federation, ensuring development of data accounting system for climate sensitive substances and carbon budgets in forests and other ground ecosystems”.

## REFERENCES

- Arkhipov V.S., Bernatonis V.K. Distribution of calcium in peat deposits of the Central part of Western Siberia. *Eurasian Soil Science*. 2006. No. 39. P. 261–269. DOI: [10.1134/S1064229306030045](https://doi.org/10.1134/S1064229306030045).
- Arkhipov V.S., Maslov S.G. Composition and properties of typical types of peat in the central part of Western Siberia. *Khimija rastitel'nogo syr'ja* (Chemistry of plant raw material). 1998. No. 4. P. 9–16. (in Russian).
- Biryukova O.N., Orlov D.S. The stock of organic carbon in soils of the Russian Federation. *Pochvovedenie*. 1995. No. 1. P. 21–32. (in Russian).
- Vaganov E.A., Vedrova E.F., Verkhovets S.V., Efremov S.P., Efremova T.T., Kruglov V.B., Onuchin A.A., Sukhinin A.I., Shibistova O.B. Forests and swamps of Siberia in the global carbon cycle. *Siberian ecological journal*. 2005. No. 4. P. 631–649. (in Russian).
- Vompersky S.E., Tsyganova O.P., Valyaeva N.A., Glukhova T.V., Dubinin A.I., Glukhov A.I. Paludified soils and mires of Russia and carbon pool of their peat. *Pochvovedenie*. 1994. No. 12. P. 17–25. (in Russian).
- Vompersky S.E., Tsiganova O.P., Kovalev A.G., Glukhova T.V., Valyaeva N.A. Paludification of Russian territory as a factor of atmospheric carbon binding. In book: *Carbon Budget of Russia*. Moscow: Nauka Publ., 1999. P. 124–145. (in Russian).
- Geological report on detailed survey of the peat deposit “Vasyuganskoe” (plot 22) of Chainskiy district of Tomsk region. Gorky, 1990. Vol. 2. 257 p. (in Russian).
- Golovatskaya E.A. Carbon fluxes in swamp ecosystems of the southern taiga of Western Siberia. Dissertation ... Dr. of Biol. Sci. Tomsk, 2013. 325 p. (in Russian).
- Golovatskaya E.A., Veretennikova E.E., Nikonova L.G. Biological productivity and carbon store in the eutrophic mire. In book: *X meeting in memoriam of Ekaterina Alexeevna Galkina: Proc. of Rus. Sci. Conf.* (Saint-Petersburg, 4–6 February 2019). Yurkovskaya T.R. et al. (ed.). Saint-Petersburg: Publishing House "LETI", 2019. P. 40–42. (in Russian).
- 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. Vol. 5. No. 4. P. e194. DOI: [10.31251/pos.v5i4.194](https://doi.org/10.31251/pos.v5i4.194). (in Russian).
- GOST 2408.1-95. Solid fuel. Methods for determining carbon and hydrogen. Moscow: Standard Publishing House. 2001. 20 p. (in Russian).
- GOST 26213-91. Soils. Methods for determining organic matter. Moscow: Standard Publishing House. 1992. 6 p. (in Russian).
- 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).
- Efremova T.T., Avrova A.F., Efremov S.P. Calculation method for determination of carbon in the peat and moss litter of forest swamps by ash content of plant substrates. *Siberian Journal of Forest Science*. 2016. No. 6. P. 73–83. DOI: [10.15372/SJFS20160607](https://doi.org/10.15372/SJFS20160607). (in Russian).
- Inisheva L.I., Sergeeva M.A., Smirnova O.N. Carbon deposition and emission by bogs of Western Siberia. *Nauchnyi dialog* (Scientific Dialogue). 2012. No. 7. P. 61–74. (in Russian). URL: <https://studylib.ru/doc/2126828/deponirovanie-i-e-missiya-ugleroda-bolotami> (accessed on 05.14.2023). (in Russian).
- Kogut B.M., Milanovsky E.Yu., Hamaturov S.A. Methods for determining the organic carbon content in soils (critical review). *Dokuchaev Soil Bulletin*. 2023. Vol. 114. P. 5–28. DOI: [10.19047/0136-1694-2023-114-5-28](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2023-114-5-28). (in Russian).
- Classification of peats and peat deposits of Western Siberia / Compiled by: L.G. Matukhin, V.G. Matukhina, I.P. Vasiliev. Novosibirsk: SB RAS Publ., 2000. 90 p. (in Russian).
- Leonova O.A. A variety of approaches to the determination of carbon content in peat. *Izvestiya Tula State University. Natural Sciences*. 2022. Iss. 3. P. 71–80. DOI: [10.24412/2071-6176-2022-3-71-79](https://doi.org/10.24412/2071-6176-2022-3-71-79). (in Russian).
- Liss O.L., Abramova L.I., Avetov N.A., Berezina N.A., Inisheva L.I., Kurnishkova T.V., Sluka Z.A., Tolpysheva T.Yu., Shvedchikova N.K. *Bog Ecosystems of Western Siberia and Their Conservation Importance*. Tula: Grif&Co, 2001. 584 p. (in Russian).
- Lishtvan I.I., Korol N.T. *Basic properties of peat and methods of their determination*. Minsk: Science and Technology Publ., 1975. 320 p. (in Russian).



- Loginov P.E., Khoroshev P.I. Peat resources of the West Siberian Plain. Moscow: Geol'torfrazvedka Publ., 1972. 148 p. (in Russian).
- Matukhina V.G., Mikhantjeva L.S. Phosphates, carbonates, and sapropels in peats of West Siberia (regularities of formation resources and usage). Russian Geology and Geophysics. 2001. No 4. P. 596–604. (in Russian).
- Naumova N.B. Writing about organic carbon determination in soil. The Journal of Soils and Environment. 2018. Vol 1. No. 2. P. 98–103. DOI: [10.31251/pos.v1i2.13](https://doi.org/10.31251/pos.v1i2.13). (in Russian).
- Ponomareva V.V., Plotnikova T.A. Humus and soil formation (method and results of study). Leningrad: Nauka Publ., 1980. 222 p. (in Russian).
- Prokushkin A.S., Karpenko L.V., Tokareva I.V., Korets M.A., Pokrovskii O.S. Carbon and nitrogen in the bogs of the northern part of the Sym-Dubches interfluvies. Geography and Natural Resources. 2017. No. 2. P. 114–123. DOI: [10.21782/GIPR0206-1619-2017-2\(114-123\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2017-2(114-123)). (in Russian).
- Sorokin V.N., Zadunaiskiy Ya.N., Steklov I.A. Methodological guidelines on peat deposits survey. Methodical instructions. Moscow: Geol'torfrazvedka, 1976. 572 p. (in Russian).
- Stepanova V.A., Mironycheva-Tokareva N.P. Carbon reserve of oligotrophic bogs the middle taiga of Western Siberia. Geo-Siberia-2010: Proc. of the VI Intern. Sci. Congr. (Novosibirsk, 19–29 April 2010). Novosibirsk: SGGA Publ., 2010. Vol. 4. Part 2. P. 109–113. (in Russian).
- Tables for determining a yield of air dry peat in tons with 40% of assumed humidity from 1000 cubic meters of peat. Appendix to “Methodological instruction on office study of peat deposits survey materials” / Compiled by: A.A. Sinadsky. Moscow: Giprotorfrazvedka, 1969. 12 p. (in Russian).
- Peat deposits of Tomsk region (reference book by a state of exploration on 01.01.1996). Novosibirsk: SNIIGGiMS, 1997. 405 p. (in Russian).
- Tyurin I.V. A new modification of the volumetric method of determining humus using chromic acid. Pochvovedenie. 1931. No. 6. P. 36–47. (in Russian).
- Shamrikova E.V., Vanchikova E.V., Kondratenok B.M., Lapteva E.M., Kostrova S.N. Problems and limitations of the dichromatometric method for measuring soil organic matter content: Review. Pochvovedenie. 2022. № 7. P. 787–794. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032180X22070097>. (in Russian).
- Beilman D.W., MacDonald G.M., Smith L.C., Reimer P.J. Carbon accumulation in peatlands of West Siberia over the last 2000 years. Global Biogeochemical Cycles. 2009. Vol. 23. Iss. 1. P. 1–12. DOI: [10.1029/2007GB003112](https://doi.org/10.1029/2007GB003112).
- Belyea L.R., Malmer N. Carbon sequestration in peatland: patterns and mechanisms of response to climate change. Global Change Biology. 2004. Vol. 10. Iss. 7. P. 1043–1052. DOI: [10.1111/j.1529-8817.2003.00783.x](https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00783.x).
- Bleuten W., Lapshina E.D. Carbon storage and atmospheric exchange by West Siberian peatlands. Utrecht: Utrecht University. 2001. 116 p.
- Borren W., Bleuten W. Simulating Holocene carbon accumulation in a Western Siberian watershed mire using a 3-D dynamic modeling approach. Water Resources Research. 2006. Vol. 42. W12413. 13 p. DOI: [10.1029/2006WR004885](https://doi.org/10.1029/2006WR004885).
- Borren W., Bleuten W., Lapshina E.D. Holocene peat and carbon accumulation rates in the southern taiga of western Siberia. Quaternary Research. 2004. Vol. 61. Iss. 1. P. 42–51. DOI: [10.1016/j.yqres.2003.09.002](https://doi.org/10.1016/j.yqres.2003.09.002).
- Ciais P., Tagliabue A., Cuntz M., Bopp L., Scholze M., Hoffmann G., Lourantou A., Harrison S.P., Prentice I.C., Kelley D.I., Koven C., Piao S.L. Large inert carbon pool in the terrestrial biosphere during the Last Glacial Maximum. Nature Geoscience. 2014. Vol. 5. P. 74–79.
- Gorham E. Northern peatlands: role in the carbon cycle and probable responses to climatic warming. Ecological Applications. 1991. Vol. 1. Iss. 2. P. 182–195. DOI: [10.2307/1941811](https://doi.org/10.2307/1941811).
- IPCC: 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, 2021. [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 05.16.2023).
- Lappalainen E. Global Peat Resources. Jyska: International Peat Society and Geological Survey of Finland, 1996. 366 p.
- Lapshina E.D., Pologova N.N. Carbon accumulation. In book: Carbon Storage and Atmospheric Exchange by West Siberian Peatlands. Utrecht: Utrecht Univ., 2001. P. 37–46.

Moore T.R., Roulet N.T., Waddington J.M. Uncertainty in predicting the effect of climatic change on the carbon cycling of Canadian peatlands. *Climatic Change*. 1998. Vol. 40. P. 229–245.

Novikov S.M., Usova L.I. New data on the swamp areas and peat storage on the territory of Russia. Dynamics of mire ecosystems of Northern Eurasia in Holocene: Proc. of the Intern. Symp. (Petrozavodsk, 5–9 October 1998) / Elina G.A et al. (ed.). Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 1998. P. 32–34.

Schurr E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven G.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natal S.M., Olefeldt D., Romanowsky V.E., Schäfer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E. Climate change and the permafrost carbon feedback. *Nature*. 2015. Vol. 520. Iss. 7546. P. 171–179.

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. DOI: [10.1029/2003GB002190](https://doi.org/10.1029/2003GB002190).

Yu Z., Loisel J., Brosseau D.P., Beilman D.W., Hunt S.J. Global peatland dynamics since the last glacial maximum // *Geophysical Research Letters*. 2010. Vol. 37. Iss. 13. L13402. DOI: [10.1029/2010GL043584](https://doi.org/10.1029/2010GL043584).

*Received 21.07.2023*

*Accepted 30.08.2023*

*Published 07.09.2023*

**About the author(s):**

**Preis Yulia Ivanovna** – Candidate of Biological Sciences, Leading Researcher of the Laboratory of Geo-information Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [preisyui@rambler.ru](mailto:preisyui@rambler.ru)

**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)

**Kabanov Mikhail Mikhailovich** – Junior Researcher of the Laboratory of Geo-information Systems, Institute for Monitoring Climatic and Ecological Systems of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Tomsk, Russia); [mike.kabanov@gmail.com](mailto:mike.kabanov@gmail.com)

*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/)