

УДК 631.417.1:631.445.12

ПРОСТРАНСТВЕННОЕ ВАРИИРОВАНИЕ ЗАПАСОВ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ТОРФЯНЫХ ПОЧВАХ И ГЛЕЕЗЕМАХ НА СЕВЕРО-ВОСТОКЕ о. САХАЛИН

© 2021 г. Д. Н. Липатов^а, *, А. И. Щеглов^а, Д. В. Манахов^а, П. Т. Брехов^б^аМГУ им. М.В. Ломоносова, Ленинские горы, 1, Москва, 119991 Россия^бВГАУ им. императора Петра I, ул. Мичурина, 1, Воронеж, 394087 Россия

*e-mail: dlip@soil.msu.ru

Поступила в редакцию 08.04.2020 г.

После доработки 25.04.2020 г.

Принята к публикации 30.06.2020 г.

Запасы органического углерода, зафиксированные на северо-востоке о. Сахалин, в торфяных олиготрофных среднемощных почвах составляют в среднем 109.8 кг/м², в торфяных олиготрофных глеевых – 75.8 кг/м², в торфяно-глееземах – 20.9–42.7 кг/м², в глееземах – 16.6 кг/м². Исследовано вертикальное распределение объемной концентрации и запасов углерода по профилям различных подтипов торфяных почв и глееземов. Построены уравнения линейной регрессии для оценки запасов углерода в зависимости от глубины торфяной толщи. Коэффициенты вариации запасов углерода на площадках 50 × 50 м увеличиваются в следующем ряду почв: торфяные олиготрофные среднемощные (3.1–7.3%) < торфяные олиготрофные глеевые (3.3–12.9%) < торфяно-глееземы (9.2–21.7%) < глееземы (22.9%). С помощью иерархического дисперсионного анализа определено соотношение дисперсии запасов углерода на трех пространственных масштабах (50 × 50 м, 5 × 5 км, 10 × 10 км). Проведено планирование необходимого количества профилей для оценки средних запасов углерода в торфяных почвах и глееземах. Предложены номограммы для определения наименьшей значимой разности между оценками средних запасов углерода в почве при малых объемах выборочных исследований.

Ключевые слова: болотные почвы, почвенный профиль, пробоотбор, почвенный мониторинг, Fibric Histosols, Histic Gleysols

DOI: 10.31857/S0032180X21020088

ВВЕДЕНИЕ

Торфяники обладают огромными запасами органического вещества, выполняя важную функцию природных резервуаров углерода. В различных регионах мира запасы углерода в торфяных почвах достигают 50–300 кг/м² и более [1, 12, 14, 15, 25, 30, 32, 33]. Несколько меньшие запасы углерода выявлены в почвах, имеющих глубину торфяной толщи 0.1–0.5 м, они составляют 10–50 кг/м² [17, 30, 32, 35]. Как правило, запасы углерода в болотных торфяных почвах значительно больше, чем в живой биомассе и почвах сопряженных автоморфных ландшафтов [9, 13, 14]. На о. Сахалин распространены различные типы торфяных почв: олиготрофные, мезотрофные, эутрофные, а также торфяно-глееземы с глубиной торфяной толщи менее 0.5 м. Наиболее протяженные и мощные залежи торфа залегают на территории Северо-Сахалинской равнины и Тымь-Поронайской низменности [3, 5].

Важнейшим этапом оценки запасов углерода в почвах является определение глубины их органической толщи, которая на торфяниках может достигать 6–10 м. В ряде исследований зафиксировано значительное варьирование глубины торфяной толщи даже в пределах одного болотного ландшафта [5, 15, 29, 30]. Поэтому важно выполнять оценку запасов углерода для полной глубины профилей торфяных почв и с учетом ее пространственного варьирования. При расчете запасов органического углерода в очесе и торфяных горизонтах могут использоваться показатели зольности и потери от прокаливания, определяемые в большинстве натуральных исследований. В ряде работ показано, что на основе этих показателей, используя регрессионные уравнения или педотрансферные функции, можно рассчитать другие необходимые параметры и саму величину запасов органического углерода в торфяных почвах [26, 31, 35].

В болотных торфяных почвах отмечается неравномерный характер профильного распределе-

ния и высокая степень пространственного варьирования зольности и других свойств на отдельных микроучастках [8, 21]. Результаты измерения плотности (удельного веса), полученные в некоторых исследованиях, также выявили значительное варьирование этого показателя в торфяных горизонтах в вертикальном и горизонтальном направлениях [31, 34], которое необходимо учитывать при оценке запасов углерода. Изучение особенностей профильного распределения зольности и плотности необходимо для получения более точных оценок запасов органического углерода в торфяных почвах и глееземах.

Закономерности пространственного варьирования запасов углерода в торфяных почвах связаны с неоднородностью процессов аккумуляции и разложения органического вещества. Варьирование измеряемых параметров может существенно затруднять интерпретацию динамики потоков углерода [19]. Опробование по нескольким вертикальным почвенным профилям позволяет учесть горизонтальное варьирование на контрольных участках и значительно улучшить точность оценки запасов органического углерода [36]. При оценке пространственного варьирования запасов органического углерода в почвах анализируются погрешности измерений и вклады природной вариабельности показателей, используемых в расчетных выражениях [18, 29]. Перспективным подходом является применение иерархических схем почвенного опробования [4] для оценки пространственного варьирования запасов углерода на нескольких масштабах: от микровариабельности в пределах пробоотборной площади до структурной организации ландшафтных комплексов.

Определение пространственного варьирования запасов углерода в почвах необходимо для выявления статистически достоверных изменений этого показателя в краткосрочной и долгосрочной динамике при проведении многолетнего мониторинга или в экологическом прогнозировании. В ряде работ отмечалось, что для обнаружения статистически достоверного изменения запасов органического углерода в почвах ландшафта необходимо опробование 50–200 контрольных точек [12, 16, 24, 28]. Важной практической задачей является оптимизация схем пробоотбора при проведении мониторинга запасов углерода в почвах болотных и заболоченных экосистем.

Цель работы – оценка запасов органического углерода и описание закономерностей их пространственного варьирования в различных типах почв болот и заболоченных лесов на северо-востоке о. Сахалин, что является актуальным вопросом регионального мониторинга. Важной задачей является разработка регрессионных моделей для оценки запасов органического углерода в

различных типах торфяных почв и глееземов о. Сахалин.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводили в 2010–2013 гг. в северо-восточной части о. Сахалин на территории, расположенной к северо-западу от Луньского залива Охотского моря, в болотных и заболоченных лесных угодьях общей площадью около 100 км² от 51°21' до 51°29' N и от 143°17' до 143°26' E. Схема почвенного опробования объединяла 4 смежных квадратных участка (5 × 5 км). В каждом из них были заложены трансекты, вдоль которых с шагом 0.5–2 км выбраны 4 пробоотборные площадки 1–16 (50 × 50 м) (рис. 1). В каждой из них было исследовано по 5 почвенных разрезов. Во всех 80 заложенных разрезах проводили морфогенетическое описание почвенных профилей.

Рядом с каждым разрезом проводили отбор подстилки с площади 20 × 20 см и измеряли мощность этого горизонта. Отбор почвенных образцов выполняли послойно из каждого генетического горизонта с помощью цилиндрического бура с режущей кромкой диаметром 8.4 см. В лабораторных условиях после высушивания при температуре 105°C почвенные образцы взвешивали для определения массы подстилки и расчета плотности торфяных и нижележащих органогенных и минеральных горизонтов [11]. Зольность торфяных горизонтов измеряли методом озольнения навесок в муфельной печи с прокаливанием зольного остатка при температуре 540°C. Содержание органического вещества в них вычисляли в соответствии с ГОСТ 11306-2013 по формуле:

$$O = 100 - A, \quad (1)$$

где A – массовая доля золы, %; O – массовая доля органического вещества, %.

Оценку содержания органического углерода в исследованных пробах органогенных горизонтов проводили расчетными методами. Для подстилки долю углерода рассчитывали на основе измеренной массы сухого вещества этого горизонта, умножая ее на коэффициент 0.37 [27], в пересчете на единицу площади. Для торфяных горизонтов содержание углерода принимали равным 56% от величины потери массы при сгорании [2].

Для образцов, отобранных из минеральных горизонтов, анализировали содержание углерода по методу Тюрина в соответствии с ГОСТ 26213-91. Коэффициент пересчета, учитывающий неполную окисляемость углерода в методе Тюрина, принимали равным 1.28, данное значение характеризуется широким диапазоном 1.09–1.47 [7].

Расчет запасов углерода в каждом исследованном профиле почвы проводили, объединяя оценки запасов в подстилке, отдельных торфяных и

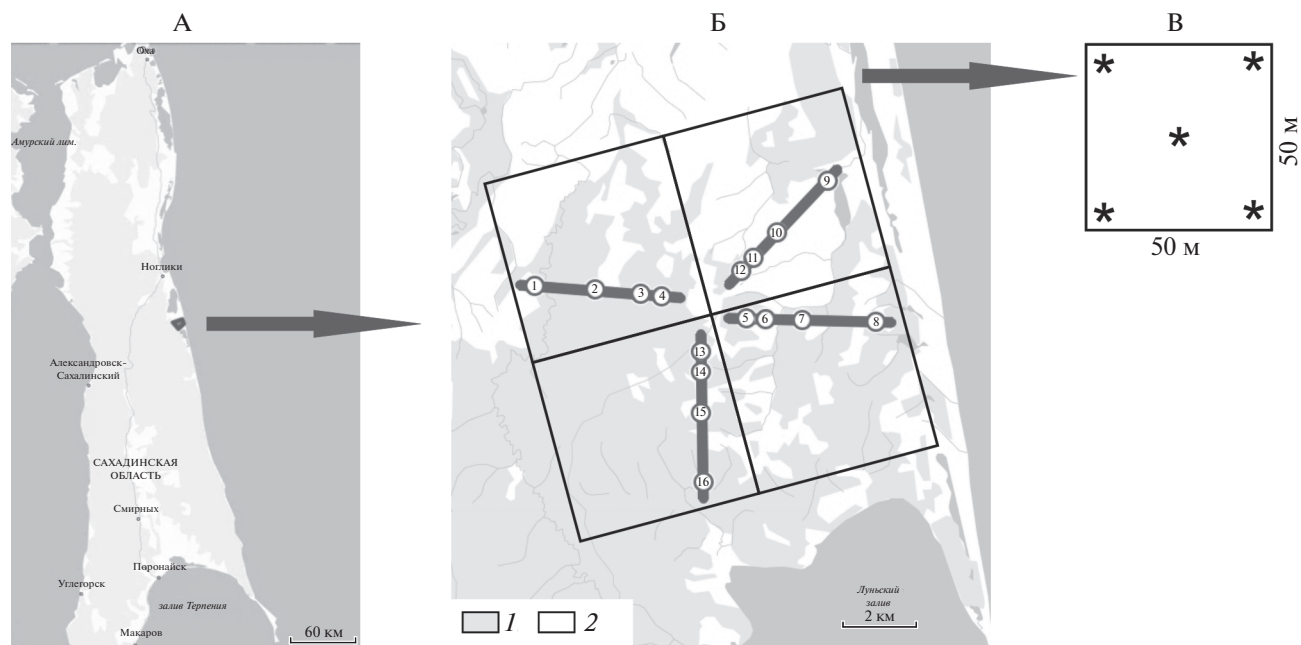


Рис. 1. Местоположение района исследования на о. Сахалин (А) и иерархическая схема почвенного опробования: на территории площадью 100 км^2 4 трансекты в квадратных участках $5 \times 5 \text{ км}$ (Б: 1 – заболоченные лесные угодья, 2 – болотные угодья), вдоль которых по 4 площадки $50 \times 50 \text{ м}$ с пятью почвенными разрезами в каждой (В).

минеральных горизонтах, по следующему выражению:

$$3C = 0.37M_0 + 0.1 \left(\sum_{i=1}^n C_i \rho_i h_i + \sum_{j=1}^m C_j \rho_j h_j \right), \quad (2)$$

где $3C$ – запасы углерода для всего почвенного профиля $\text{кг}/\text{м}^2$; M_0 – масса сухого вещества подстилки, $\text{кг}/\text{м}^2$; 0.37 – доля углерода в сухом веществе подстилки; n – число торфяных горизонтов; m – число минеральных горизонтов в почвенном профиле; C_i и C_j – содержание органического углерода в отдельных торфяных и минеральных горизонтах, %; ρ_i и ρ_j – плотность отдельных торфяных и минеральных горизонтов, $\text{г}/\text{см}^3$; h_i и h_j – мощность отдельных торфяных и минеральных горизонтов, см; 0.1 – коэффициент для перевода единиц.

Следует отметить, что ни в одном из исследованных горизонтов торфяных почв и глееземов не отмечена каменистость, поэтому этот параметр в расчет запасов углерода не включали. Относительная погрешность оценки запасов углерода по формуле (2) формируется величинами аналитических ошибок измерения содержания углерода, плотности сложения и мощности горизонтов почвы, а также уровнями неопределенности используемых пересчетных коэффициентов. Установленные в ряде исследований, значения относительной погрешности оценок запасов углерода составляли в различных почвенных профилях от 2 до 25% [18, 20, 29]. В нашей работе относитель-

ную погрешность определения запасов углерода в почве с помощью представленных методов и расчетов принимали равной 20%.

Для характеристики распределения запасов в профилях дополнительно рассчитывали показатель, оценивающий массу углерода в объеме отдельных почвенных горизонтов. В нашем исследовании этот показатель обозначен как объемная концентрация углерода – масса элемента, отнесенная к объему почвы [10]:

$$OC = 10C\rho, \quad (3)$$

где OC – объемная концентрация углерода для отдельного горизонта (или слоя) почвы, $\text{кг}/\text{м}^3$; C – содержание органического углерода в горизонте, %; ρ – плотность горизонта, $\text{г}/\text{см}^3$; 10 – коэффициент для перевода единиц.

Определение запасов органического углерода для профилей почв проводили с помощью расчета (формула (2)) на основе полученных значений зольности в подстилке и торфяных горизонтах, содержания гумуса в нижележащих минеральных горизонтах, а также их глубин и плотностей сложения. Анализ профильного распределения включал оценки запасов для отдельных горизонтов, вычисление их вклада в суммарный запас и рассмотрение вертикального варьирования объемной концентрации органического углерода в исследованных почвах.

Статистическая обработка результатов включала оценку средних значений и показателей ва-

Таблица 1. Характеристика биогеоценозов и почв на исследованных пробоотборных площадках

Биогеоценоз	Строение почвенных профилей	Название почвы [8] (согласно WRB [24])	Номера пробоотборных площадок
Пушицево-кустарничково-сфагновое болото	O–TO–TT–(G)	Торфяная олиготрофная среднемощная (Dystric Fibric Histosol)	5, 11, 15
	O–TO–TT–Ghi–CG	Торфяная олиготрофная глеевая мало-мощная (Dystric Fibric Histosol)	6, 10
	O–Tpyr–Ghi–CG	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый пирогенный (Dystric Histic Gleysol)	12
Лиственничный лес (слово-лиственничный) осоково-кустарничково-моховый	O–Tmr–Ghi,f–CG	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый (Dystric Histic Gleysol)	1, 2, 3, 4, 7
	O–Tmr,h–Ghi,f–CG	Торфяно-глеезем перегнойно-торфяной потечно-гумусовый (Dystric Histic Gleysol)	9, 13, 14
Пихтово-лиственничный лес осоково-кустарничковый	O–Tmr–Ghi,e–Gf–CG	Торфяно-глеезем потечно-гумусовый глубокоосветленный (Dystric Histic Gleysol)	8
Пихтово-лиственничный лес кустарничково-моховый	Oh–Ghi,f–CG	Глеезем перегнойный потечно-гумусовый (Histic Gleysol)	16

рырования на каждой площадке. Проверку гипотезы о нормальном законе распределения проводили с помощью критерия Уилка–Шапиро. Рассчитывали необходимый объем выборок для оценки средних (при относительной погрешности $P_{0.05} = 20\%$) с помощью t -критерия Стьюдента. Проводили сравнение средних и расчет наименьшей значимой разности при малых объемах выборок и установленных стандартных отклонениях на основе критерия Дункана. Выполняли регрессионный анализ и иерархический трехфакторный дисперсионный анализ [4].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Профильное распределение и запасы органического углерода в исследованных почвах. В ходе проведенных исследований выявлено несколько типов и подтипов торфяных почв и глееземов (табл. 1). В болотных угодьях на площадках 5, 11, 15 под пушицево-кустарничково-сфагновой растительной ассоциацией зафиксированы торфяные олиготрофные среднемощные почвы, имеющие мощность органогенной толщи 100–150 см. Самый верхний слой этих почв представлен подстильным горизонтом O, который состоит из очеса растительных остатков, корней мхов и кустарничков, под ним залегают олиготрофно-торфяные горизонты TO1, TO2, TO3 слабой и средней степени разложения. В торфяной олиготрофной среднемощной почве, исследованной на площадке 15, зольность верхних органогенных горизонтов составляет менее 3.5%, но в нижнем торфяном горизонте TT достигает 10.2% (табл. 2). Плотность торфяных горизонтов в этой почве

постепенно увеличивается вниз по профилю: от 0.07 г/см³ в горизонте O до 0.23 г/см³ в горизонте TT, и затем резко возрастает при переходе к минеральному глеевому потечно-гумусовому горизонту Ghi. Увеличение плотности и зольности в торфяном горизонте на границе с минеральной толщей связано с его большей минерализацией и сильной степенью разложения. При этом именно в нижнем торфяном горизонте TT отмечен наибольший запас органического углерода, составивший 40% от суммарного в профиле, а также наблюдается увеличение объемной концентрации углерода до 114 кг/м³ (рис. 2). Еще 39% запаса органического углерода сосредоточено в средней части торфяной толщи, включающей горизонты TO2 и TO3. Наименьшая доля запаса выявлена в горизонте O, при объемной концентрации углерода лишь 25 кг/м³. В верхнем минеральном слое, представленном глеевым потечно-гумусовым горизонтом Ghi, запас углерода составляет 9% от суммарного в профиле и сформирован органическими веществами, мигрировавшими из вышележащей торфяной толщи.

В болотных угодьях на площадках 6 и 10 выявлены торфяные олиготрофные глеевые почвы, которые характеризуются мощностью органогенной толщи 50–100 см. В торфяной олиготрофной глеевой почве, изученной на площадке 6, наименьшая зольность отмечена для горизонта TO1, наибольшая – для горизонта T3, в котором она достигает 34.2%. Плотность торфяных горизонтов в этой почве постепенно увеличивается вниз по профилю: от 0.08 г/см³ в горизонте O до 0.36 г/см³ в горизонте T3, и затем резко возрастает при переходе к минеральному глеевому потечно-гуму-

Таблица 2. Распределение зольности, плотности и запасов углерода в профилях почв

Горизонт	Глубина, см	Зольность, %	Содержание гумуса, %	Плотность, г/см ³	Запасы углерода, кг/м ²	Доля запаса в профиле, %
Торфяная олиготрофная среднemocная почва (площадка 15)						
O	0–12	3.5	–	0.07	3.1	2.8
TO1	12–30	3.1	–	0.10	10.2	9.1
TO2	30–65	2.3	–	0.11	20.9	18.6
TO3	65–90	3.2	–	0.17	22.9	20.4
TT	90–130	10.2	–	0.23	45.4	40.4
G1hi	130–150	–	5.36	1.25	9.9	8.9
Суммарно в профиле:					112.4	100.0
Торфяная олиготрофная глеевая маломocная почва (площадка 6)						
O	0–10	8.3	–	0.08	3.0	3.9
TO1	10–39	2.8	–	0.16	25.1	33.4
TO2	39–58	4.6	–	0.21	21.3	28.4
T3	58–70	34.2	–	0.36	16.5	22.0
G1hi	70–92	–	3.22	1.32	6.9	9.3
CG	92–110	–	1.15	1.44	2.2	3.0
Суммарно в профиле:					75.0	100.0
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый пирогенный (площадка 12)						
O	0–8	6.9	–	0.06	1.8	5.2
T1pyr	8–28	4.3	–	0.18	19.7	57.5
G1hi,pyr	28–40	–	7.55	0.73	4.9	14.3
G2hi	40–58	–	2.74	1.16	4.2	12.4
G3f	58–75	–	1.19	1.12	1.7	4.9
CG	75–105	–	0.80	1.09	1.9	5.7
Суммарно в профиле:					34.2	100.0
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый (площадка 2)						
O	0–11	6.5	–	0.07	2.8	6.7
T1	11–20	9.4	–	0.15	6.8	15.9
T2mr	20–45	22.3	–	0.26	28.8	67.5
G1hi	45–58	–	3.16	0.77	2.3	5.5
G2f	58–82	–	0.52	1.34	1.2	2.9
CG	82–110	–	0.29	1.42	0.7	1.6
Суммарно в профиле:					42.6	100.0
Торфяно-глеезем перегнойно-торфяный потечно-гумусовый (площадка 13)						
O	0–9	9.5	–	0.06	2.1	8.9
Tmr,h	9–21	29.8	–	0.20	9.4	40.0
G1hi	21–30	–	10.57	0.62	4.4	18.6
G2hi	30–42	–	4.87	0.93	4.0	17.1
G3f	42–65	–	0.92	1.18	1.9	7.9
CG	65–110	–	0.41	1.30	1.8	7.5
Суммарно в профиле:					23.6	100.0
Торфяно-глеезем потечно-гумусовый глубокоосветленный (площадка 8)						
O	0–9	7.6	–	0.10	3.2	10.9
Tmr	9–31	37.3	–	0.22	16.8	58.0
G1hi,e	31–43	–	3.59	0.92	2.9	10.1
G2hi	43–57	–	3.50	1.08	3.9	13.6
G3f	57–85	–	0.59	1.32	1.6	5.6
CGf	85–100	–	0.32	1.44	0.5	1.8
Суммарно в профиле:					28.9	100.0

Таблица 2. Окончание

Горизонт	Глубина, см	Зольность, %	Содержание гумуса, %	Плотность, г/см ³	Запасы углерода, кг/м ²	Доля запаса в профиле, %
Глеезем перегнойный потечно-гумусовый (площадка 16)						
O	0–5	19.9	–	0.07	1.2	7.3
Oh	5–10	20.6	–	0.16	3.6	21.7
G1hi	10–19	–	5.33	0.83	3.0	17.8
G2hi,f	19–35	–	3.25	0.74	2.8	17.2
G3f	33–65	–	1.82	1.13	3.8	23.1
CG	65–100	–	0.55	1.32	2.2	13.0
Суммарно в профиле:					16.6	100.0

совому горизонту G1hi. Наибольший запас углерода зафиксирован в верхних олиготрофно-торфяных горизонтах TO1, TO2, составляя для них более 60% от суммарного в профиле торфяной олиготрофной глеевой почвы. При этом максимальная объемная концентрация углерода наблюдалась в нижнем торфяном горизонте T3, достигая 136 кг/м³ (рис. 2). Низкие запасы и объемная концентрация углерода отмечены в подстилочном горизонте O и нижнем глеевом горизонте CG, тогда как в глеевом потечно-гумусовом горизонте G1hi запас углерода составляет 9% от суммарного в профиле.

В болотном угодье на площадке 12 описан торфяно-глеезем потечно-гумусовый пирогенный, имеющий укороченный органогенный профиль вследствие частичного сгорания верхних горизонтов в результате пожаров. В этой почве основной запас углерода сосредоточен в горизонте T1rug, который является единственным торфяным горизонтом, сохранившимся в профиле. Запасы углерода в верхних минеральных горизонтах G1hi,руг и G2hi пирогенного торфяно-глеезама меньше, чем в горизонте G1hi торфяной олиготрофной почвы, но их доля существеннее и составляет 27% от суммарных значений в профиле.

В заболоченных лиственничных и елово-лиственничных лесах на площадках 1, 2, 3, 4, 7 почвенный покров представлен торфяно-глееземами потечно-гумусовыми с мощностью органогенной толщи 20–50 см. В торфяно-глееземе потечно-гумусовом, исследованном на площадке 2, зольность органогенных горизонтов увеличивается вниз по профилю, достигая 22.3% в горизонте Tmr, который характеризуется сильной степенью разложения торфа. Плотность горизонтов в этой почве увеличивается вниз по профилю в пределах как торфяной, так и нижележащей минеральной толщи. Основной запас углерода в профиле торфяно-глеезама потечно-гумусового сосредоточен в горизонте T2mr, который имеет и большую мощность – 25 см. Объемная концентрация углерода в горизонте T2mr достигает 115 кг/м³, тогда как в других горизонтах значительно меньше.

В заболоченных лиственничных и елово-лиственничных лесах на площадках 9, 13, 14 зафиксированы торфяно-глеезема перегнойно-торфяные потечно-гумусовые. В почве на площадке 13 отмечена высокая зольность перегнойно-торфяного горизонта Tmr,h и увеличение содержания гумуса в глеевом потечно-гумусовом горизонте G1hi по сравнению с аналогичными горизонтами торфяных почв и других торфяно-глееземов. Плотность горизонтов в торфяно-глееземе перегнойно-торфяном потечно-гумусовом постепенно увеличивается вниз по профилю. Наибольший запас углерода в этой почве сосредоточен в горизонте Tmr,h, в ко-

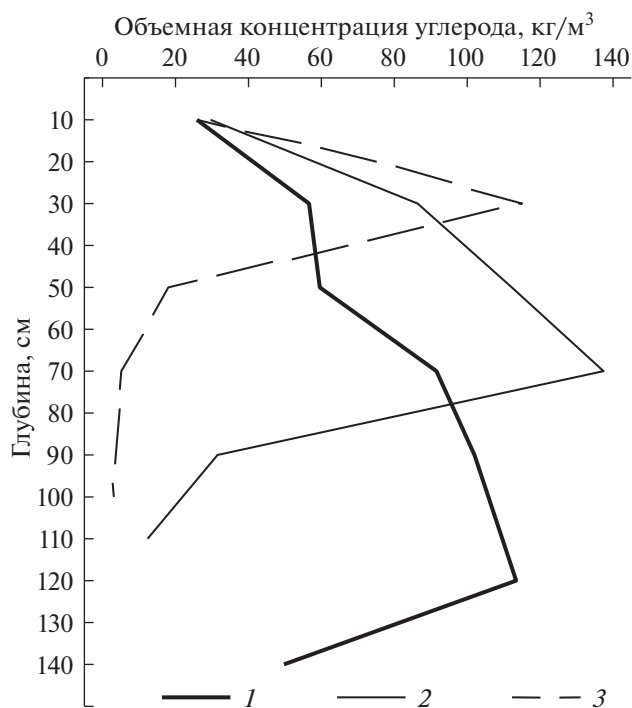


Рис. 2. Распределение объемной концентрации органического углерода в профилях почв: 1 – торфяной олиготрофной среднемощной, 2 – торфяной олиготрофной глеевой маломощной, 3 – торфяно-глееземе потечно-гумусовом.

тором он составляет 40% от суммарного в профиле. Следует отметить, что более половины запаса углерода в торфяно-глееземе перегнойно-торфяном потечно-гумусовом отмечено в минеральной толще, сформированной горизонтами G1hi, G2hi, G3f, CG. Объемная концентрация углерода в горизонте Tmr,h составляет 78 кг/м³, уменьшаясь в G1hi и G2hi в 1.5–2.5 раза (рис. 3).

В слабозаболоченном пихтово-лиственничном лесу на площадке 8 выявлен торфяно-глеезем потечно-гумусовый глубокоосветленный. Зольность горизонта Tmr в этой почве достигает наибольшего значения (37.3%), при этом содержание гумуса в нижележащем минеральном горизонте G1hi,e невелико вследствие развития в нем элювиального процесса. Основной запас углерода в торфяно-глееземе потечно-гумусовом глубокоосветленном сосредоточен в горизонте Tmr, который является единственным торфяным горизонтом в этом профиле. Объемная концентрация углерода в горизонте Tmr составляет 76 кг/м³, уменьшаясь в горизонтах G1hi,e и G2hi в 3 раза.

На умеренно дренированной территории в пихтово-лиственничном лесу описаны глееземы. В профиле глеезема перегнойного потечно-гумусового, изученного на площадке 16, проявляется оторфованность только в нижней части подстилочного горизонта Oh, зольность такой постилки составляет около 20%. Для исследованного глеезема характерно постепенное уменьшение содержания гумуса вглубь минеральной толщи, что свидетельствует о выраженной вертикальной миграции органических веществ, связанной, по-видимому, с корневыми системами деревьев. Плотность в глееземе увеличивается вниз по профилю неравномерно, отмечено ее уменьшение в горизонте G2hi,f. В органогенной части профиля, включавшей подстилочные горизонты, сосредоточено лишь 29% запаса углерода, но в горизонте Oh отмечена его наибольшая объемная концентрация – 72 кг/м³. Основная часть запасов углерода в глееземе зафиксирована в верхних и средних минеральных горизонтах G1hi, G2hi,f, G3f.

Полученные результаты показывают, что зольность верхних торфяных горизонтов увеличивается в ряду исследованных почв: торфяные олиготрофные среднеспособные < торфяные олиготрофные глеевые < торфяно-глееземы. В торфяных почвах и торфяно-глееземах увеличение значений зольности приурочено к нижним горизонтам TГ, TЗ, T2mr, характеризующимся средней и сильной степенью разложения торфа. В большинстве исследованных профилей плотность увеличивается постепенно вниз по органогенной толще и резко при переходе к минеральным горизонтам. При анализе вертикального распределения углерода выявлено, что его основные запасы сосредоточены в торфяных горизонтах исследованных почв. В торфяно-

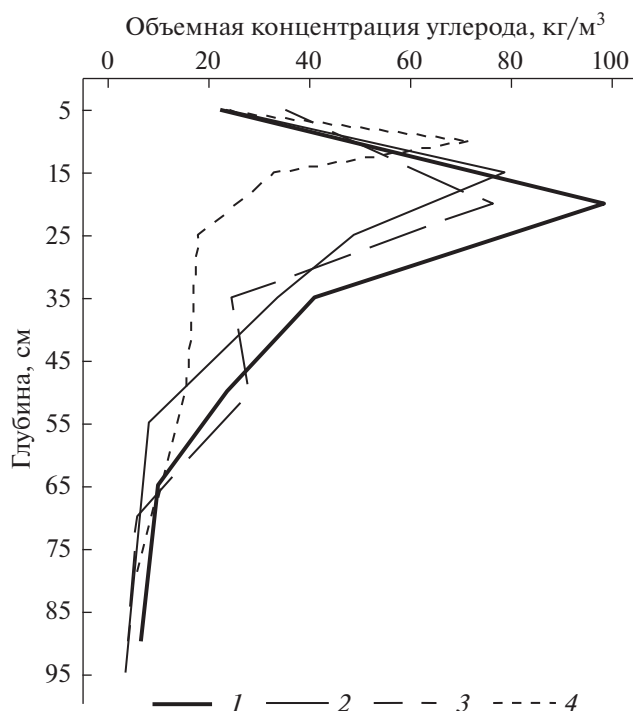


Рис. 3. Распределение объемной концентрации органического углерода в профилях почв: 1 – торфяно-глееземе потечно-гумусовом пирогенном, 2 – торфяно-глееземе перегнойно-торфяном потечно-гумусовом, 3 – торфяно-глееземе потечно-гумусовом глубокоосветленном, 4 – глееземе перегнойном потечно-гумусовом.

глееземах существенная доля запасов углерода отмечается также в верхней части минеральной толщи, а в глееземах ее роль превалирует. Вклад подстилки мал, в торфяных олиготрофных почвах она содержит всего 2–4%, в торфяно-глееземах и глееземах – 5–10% от суммарных запасов в профиле. При этом наибольшая объемная концентрация углерода наблюдается в нижней части торфяной толщи всех исследованных почв.

Пространственное распределение запасов органического углерода в исследованных почвах. Пространственное варьирование запасов углерода в почвах исследовано на 16 пробоотборных площадках. Проверка с помощью критерия Уилка–Шапиро показала, что распределение значений запасов углерода в почве на каждой из площадок удовлетворяло нормальному закону ($p = 0.05$). Используемые площадки имеют стандартные размеры 50 × 50 м и применяются для различных задач почвенного мониторинга. В нашей работе определены средние уровни и диапазоны варьирования запасов углерода в почвах (табл. 3), показывающие слабую пространственную неоднородность на отдельных площадках, но значительные различия этого показателя между биогеоценозами. Следует отметить, что полученные стандартные отклонения

Таблица 3. Статистические характеристики варьирования и расчетные значения необходимого объема выборки для оценки среднего запаса углерода (кг/м²) в почвах исследованных площадок 50 × 50 м

Номер площадки	Объем выборки	Среднее	Минимум	Максимум	Стандартное отклонение	Коэффициент вариации, %	Необходимый объем выборки для оценки среднего при $P_{0.05} = 20\%$
1	5	50.2	44.3	55.6	5.0	10.0	4
2	5	30.2	23.8	37.7	5.6	18.5	6
3	5	48.8	42.6	53.6	4.5	9.2	4
4	5	47.8	36.5	57.0	7.5	15.7	5
5	5	109.7	106.4	114.4	3.4	3.1	3
6	5	70.4	57.0	77.4	9.1	12.9	5
7	5	36.5	30.4	43.2	5.1	14.0	5
8	5	28.6	23.2	33.2	3.6	12.6	5
9	5	25.5	22.4	29.5	3.3	12.9	5
10	5	81.2	77.6	84.6	2.7	3.3	3
11	5	106.3	102.1	110.7	4.1	3.9	3
12	5	38.3	29.5	48.6	8.3	21.7	8
13	5	20.5	16.0	24.3	4.1	20.0	7
14	5	16.6	13.3	20.7	3.0	18.1	6
15	5	113.4	102.4	125.6	8.3	7.3	3
16	5	15.3	10.6	18.9	3.5	22.9	8

и коэффициенты вариации отражают микроварибельность, зафиксированную в пределах исследованных пробоотборных площадок, включая неопределенность, обусловленную методической погрешностью оценок запасов углерода в почвенных профилях.

Коэффициенты вариации запасов углерода для торфяных олиготрофных среднемошных почв (площадки 5, 11, 15) низкие — от 3.1 до 7.3%. Для торфяных олиготрофных глеевых почв (площадки 6, 10) коэффициенты вариации составляют от 3.3 до 12.9%. Для изученных подтипов торфяно-глеоземов коэффициенты вариации запасов углерода возрастают до 9.2–21.7%. Наибольший коэффициент вариации зафиксирован для глееземов (площадка 16) и составляет 22.9%. Увеличение коэффициентов вариации запасов углерода в торфяно-глеоземах и глееземах указывает на более выраженную пространственную неоднородность этого показателя в заболоченных лесных биогеоценозах по сравнению с торфяными почвами болотных угодий. В других регионах мира отмечены сходные и более высокие уровни пространственного варьирования запасов углерода в отдельных типах болотных почв [17, 23, 26].

Полученные статистические характеристики варьирования запасов углерода в почвах использованы для планирования объемов выборок. Необходимые объемы выборок для статистически достоверных (при $P_{0.05} = 20\%$) оценок средних запасов углерода в почвах составляют от 3 до 8 вертикальных профилей на исследованных площадках 50 × 50 м. При этом для торфяных олиготрофных почв доста-

точно трех, для торфяных олиготрофных глеевых почв 3–5 профилей. Для торфяно-глеоземов и глееземов объем выборки для оценки среднего запаса углерода следует увеличить до 5–8 вертикальных профилей на площадке.

Сравнение средних значений запасов углерода в различных типах и подтипах исследованных почв проведено для объединенных выборок с разных площадок (рис. 4, А). Исследованные почвы формируют следующий ряд по уменьшению средней величины запасов углерода: торфяные олиготрофные среднемошные > торфяные олиготрофные глеевые > торфяно-глеоземы потечно-гумусовые > торфяно-глеоземы потечно-гумусовые пирогенные > торфяно-глеоземы потечно-гумусовые глубокоосветленные > торфяно-глеоземы перегнойно-торфяные потечно-гумусовые > глееземы перегнойные потечно-гумусовые. При этом почти для всех сравниваемых групп отмечены статистически значимые различия ($p = 0.05$). Не выявлены статистически значимые различия запасов углерода только между торфяно-глеоземами потечно-гумусовыми и торфяно-глеоземами потечно-гумусовыми пирогенными, а также между торфяно-глеоземами перегнойно-торфяными потечно-гумусовыми и глееземами перегнойными потечно-гумусовыми. Полученные результаты свидетельствуют, что на исследованной территории северо-восточного Сахалина наибольшими запасами органического углерода обладают торфяные олиготрофные почвы болотных угодий, их среднее значение составило 109.8 кг/м². В тор-

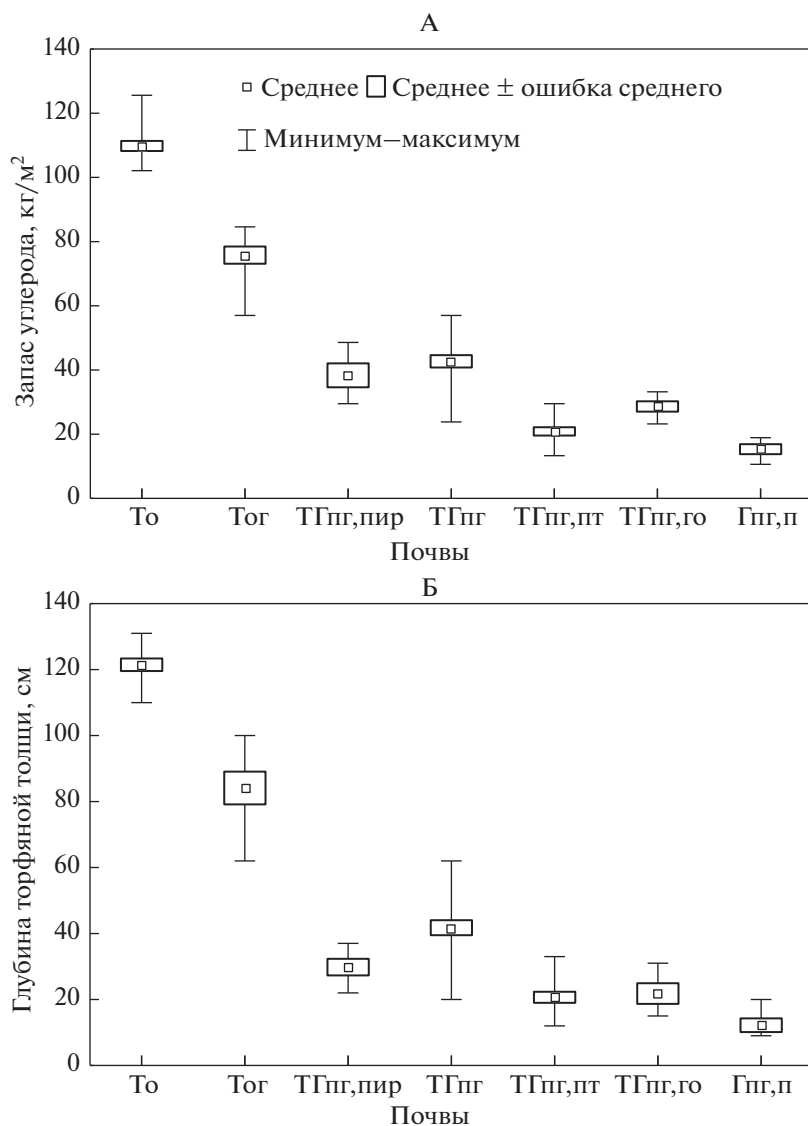


Рис. 4. Вариирование запасов углерода (А) и глубины торфяной толщи (Б) в различных типах и подтипах исследованных почв: То – торфяные олиготрофные; Тог – торфяные олиготрофные глеевые; ТПг,пир – торфяно-глееземы потечно-гумусовые пирогенные; ТПг – торфяно-глееземы потечно-гумусовые; ТПг,пт – торфяно-глееземы перегнойно-торфяные потечно-гумусовые; ТПг,го – торфяно-глееземы потечно-гумусовые глубокоосветленные; Гпг,п – глееземы перегнойные потечно-гумусовые.

фяных олиготрофных глеевых почвах запасы углерода составляют 75.8 кг/м². В различных подтипах торфяно-глееземов средняя величина запасов углерода составляет от 20.9 до 42.7 кг/м², что в несколько раз меньше, чем в торфяных олиготрофных почвах. Однако в заболоченных лесах северо-восточного Сахалина именно торфяно-глееземы занимают большую площадь, поэтому в них также сосредоточены значительные запасы органического углерода этого региона.

Главным параметром, который определяет вариирование запасов органического углерода в исследованных почвах, является суммарная мощ-

ность их торфяных горизонтов. Этот показатель варьирует в торфяных олиготрофных почвах от 110 до 132 см, в торфяных олиготрофных глеевых – от 62 до 100 см, в различных подтипах торфяно-глееземов – от 12 до 60 см, в глееземках – от 9 до 20 см (рис. 4, Б). Проверка с помощью критерия Уилка–Шапиро показала, что распределение значений мощности торфяной толщи в почвах удовлетворяло нормальному закону ($p = 0.05$). Результаты проведенного регрессионного анализа подтверждают, что величины запасов углерода достоверно связаны с глубиной торфяной толщи почв. На основе данных по всем проанализированным профилям торфяных почв, торфяно-глее-

земов и глееземов получено статистически значимое ($n = 80, p = 0.05$) уравнение регрессии следующего вида:

$$3C = 7.75 + 0.83h, R^2 = 0.95, \quad (4)$$

где $3C$ – запасы углерода в почве, $\text{кг}/\text{м}^2$; h – мощность торфяной толщи (от 9 до 132 см).

Для торфяных олиготрофных среднемощных и торфяных олиготрофных глеевых почв статистически значимое ($n = 25, p = 0.05$) уравнение регрессии имеет следующий уточненный вид:

$$3C = 16.12 + 0.75h, R^2 = 0.81, \quad (5)$$

где $3C$ – запасы углерода в почве, $\text{кг}/\text{м}^2$; h – мощность торфяной толщи (от 62 до 132 см).

В ходе регрессионного анализа для запасов в торфяно-глееземах и глееземах выявлено статистически значимое ($p = 0.05$) влияние еще одного параметра – содержания органического углерода в верхнем минеральном глеевом потечно-гумусовом горизонте G_{hi} , залегающем непосредственно под торфяной толщей. Поэтому для торфяно-глееземов и глееземов статистически значимое ($n = 55, p = 0.05$) уравнение регрессии имеет следующий уточненный вид:

$$3C = 4.08 + 0.83h + 0.63C_{G_{hi}}, R^2 = 0.78, \quad (6)$$

где $3C$ – запасы углерода для всего почвенного профиля, $\text{кг}/\text{м}^2$; h – мощность торфяной толщи (от 9 до 60 см); $C_{G_{hi}}$ – содержание углерода в горизонте G_{hi} (от 0.8 до 9.2%).

Подобные линейные регрессионные модели с целью предварительной оценки запасов углерода в зависимости от глубины торфяной толщи использовались для почв болотных экосистем Ирландии [30].

Важной практической задачей является планирование опробования при проведении многолетнего мониторинга запасов органического углерода в почвах. Как правило, подобные исследования выполняются на площадках мониторинга в различные сроки и основаны на почвенном пробоотборе по нескольким контрольным точкам. Такое планирование необходимо для того, чтобы выявить изменения показателя во времени на фоне его пространственного варьирования. Полученные в нашей работе, значения стандартных отклонений запасов органического углерода в торфяных почвах, торфяно-глееземах и глееземах использованы с целью планирования многолетних исследований. Построены номограммы для малых объемов сравниваемых выборок, представляющие значения наименьшей значимой разности, вычисляемой по критерию Дункана, между оценками средних запасов углерода в почве при различных

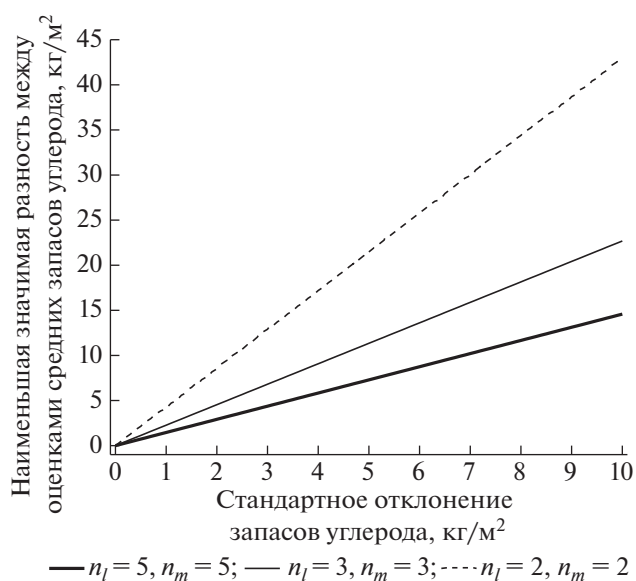


Рис. 5. Номограммы определения наименьшей значимой разности, вычисляемой по критерию Дункана, между оценками средних значений запасов углерода в почве ($\text{кг}/\text{м}^2$) в зависимости от их стандартного отклонения при различных объемах (n_l, n_m) сравниваемых выборок.

стандартных отклонениях (рис. 5). Так, для большинства исследованных почв стандартное отклонение запасов углерода на площадках не превышает $4.5 \text{ кг}/\text{м}^2$, поэтому при использованной схеме опробования с пятью контрольными вертикальными профилями можно статистически достоверно ($p = 0.05$) зафиксировать наименьшую значимую разность $6.7 \text{ кг}/\text{м}^2$ и больше. Однако статистически значимое различие не будет выявлено в случае недостаточных изменений средних запасов углерода за период мониторинга, так как оно превышает пространственным варьированием. Наименьшая значимая разность существенно возрастает при увеличении стандартного отклонения запасов углерода и использовании очень малых объемов выборок, включающих всего 2–3 контрольных вертикальных профиля.

Пространственное варьирование запасов органического углерода в почвах при различных масштабах исследования. Представленные результаты были использованы для оценки варьирования запасов углерода в почвах на различных пространственных масштабах. При этом вариабельность между контрольными точками в пределах площадок $50 \times 50 \text{ м}$ рассматривали в качестве микроварьирования, между площадками вдоль трансекты квадратного участка $5 \times 5 \text{ км}$ – в качестве мезоварьирования, между квадратными участками на территории $10 \times 10 \text{ км}$ – макроварьирования. Реализованная в нашей работе, схема почвенного опробования формирует трехфакторный иерархический дисперсионный комплекс, в

Таблица 4. Результаты трехфакторного иерархического дисперсионного анализа для оценки варьирования запасов углерода в почвах (кг/м²) на различных пространственных масштабах

Масштаб варьирования	Число степеней свободы	Сумма квадратов центральных отклонений	Средний квадрат	F-критерий Фишера	Составляющие дисперсии	Доля дисперсии, %
На территории 10 × 10 км	3	683005	227668	11.7*	3471	72.5
В квадрантах 5 × 5 км	12	232630	19386	217.8**	1287	26.9
На площадках 50 × 50 м	64	5718	89	6.8**	17	0.35
Методическая погрешность	160	2054	13		13	0.25
Факторы в целом	239	923407			4788	

* $F > F_{0.05}$.** $F > F_{0.01}$.

котором каждый пространственный масштаб варьирования соответствует отдельному фактору (табл. 4). При проведении иерархического дисперсионного анализа значения запасов углерода в каждой контрольной точке задавали с учетом выбранной методической погрешности 20%. Для этого наряду с экспериментально установленным значением этого показателя в каждой точке были смоделированы еще две его реализации (–10 и +10%).

Результаты показывают значимое ($p = 0.05$) влияние всех трех факторов на варьирование запасов углерода в почвах. Следовательно, в каждом пространственном масштабе наблюдается статистически достоверное приращение дисперсии этого показателя. Рассчитанная доля дисперсии, обусловленная методической погрешностью оценок запасов углерода в почвенных профилях, составляет 0.25%. Доля дисперсии, соответствующая микроварьированию в пределах площадок 50 × 50 м, оказалась также достаточно мала – 0.35%. Доля, отражающая мезоварьирование в квадрантах 5 × 5 км, составляет 26.9% от общей дисперсии. Наибольшая доля дисперсии, составившая 72.5%, зафиксирована для макроварьирования при переходе от квадрантов ко всей исследованной территории 100 км² и обусловлена резкими изменениями запасов углерода между рассмотренными ландшафтами: болотными угольями с торфяными олиготрофными почвами и заболоченными лесными биогеоценозами с преобладанием торфяно-глееземов и глееземов.

Приведенные результаты показывают, что оценки, полученные на отдельных пробоотборных площадках, отражают лишь очень малую долю варьирования запасов углерода в почвенном покрове болотных и заболоченных территорий на северо-востоке о. Сахалин. Поэтому региональный мониторинг запасов углерода следует проводить для преобладающих типов и подтипов почв в различных биогеоценозах по всей протяженности района исследования.

ВЫВОДЫ

1. На северо-востоке о. Сахалин в торфяных олиготрофных почвах, имеющих мощность органической толщи 110–130 см, средние запасы углерода составляют 109.8 кг/м², из которых 40% сосредоточено в горизонте ТТ (90–130 см) и еще 40% суммарно в горизонтах ТО2 (30–65 см) и ТО3 (65–90 см). В торфяных олиготрофных глеевых почвах с мощностью органической толщи 50–100 см запасы углерода составляют 75.8 кг/м². В исследованных почвах запасы углерода проявляют линейную зависимость от мощности торфяной толщи.

2. В различных подтипах торфяно-глееземов, имеющих мощность органической толщи менее 50 см, средние запасы углерода варьируют от 20.9 до 42.7 кг/м², а в глееземе уменьшаются до 16.6 кг/м², при этом их существенная доля сосредоточена в минеральных горизонтах. Запасы углерода в торфяно-глееземах и глееземах проявляют линейную зависимость от мощности торфяной толщи и содержания этого элемента в верхнем минеральном глеевом потечно-гумусовом горизонте G1hi.

3. Коэффициенты вариации запасов углерода увеличиваются в следующем ряду почв: торфяные олиготрофные среднемощные (3.1–7.3%) < торфяные олиготрофные глеевые (3.3–12.9%) < торфяно-глееземы (9.2–21.7%) < глееземы (22.9%), что указывает на более выраженную пространственную неоднородность этого показателя в заболоченных лесных биогеоценозах по сравнению с болотными угольями.

4. Микроварьирование запасов углерода в пределах площадок 50 × 50 м формирует малую долю дисперсии – 0.35%, мезоварьирование на участках 5 × 5 км – 26.9%. Наибольшая доля дисперсии, составившая 72.5%, характерна для макроварьирования при переходе ко всей исследованной территории 100 км² и обусловлена резкими изме-

нениями запасов углерода между болотными угодьями с торфяными олиготрофными почвами и заболоченными лесными биогеоценозами с преобладанием торфяно-глееземов и глееземов.

5. На контрольной площадке 50 × 50 м планируемые объемы выборок для получения статистически достоверных (при $P_{0.05} = 20\%$) оценок средних запасов углерода в торфяных олиготрофных почвах составляют 3 вертикальных профиля, в торфяных олиготрофных глеевых — 3–5, в торфяно-глееземах и глееземах — 5–8 профилей. При проведении мониторинга по схеме опробования с пятью вертикальными профилями на контрольной площадке можно статистически достоверно ($p = 0.05$) зафиксировать многолетние изменения запасов углерода, превышающие наименьшую значимую разность 6.7 кг/м².

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев В.А., Бердси Р.А. Углерод в экосистемах лесов и болот России. Красноярск: ВЦ СО РАН, 1994. 224 с.
2. Базин Е.Т., Копенкин В.Д., Косов В.И., Корчунов С.С., Петрович В.М. Технический анализ торфа / Под ред. Е.Т. Базина. М.: Недра, 1992. 431 с.
3. Властова Н.В. Торфяные болота Сахалина. Л.: Изд-во АН СССР, 1960. 167 с.
4. Дмитриев Е.А. Математическая статистика в почвоведении. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1995. 320 с.
5. Инишева Л.И. Болотоведение. Томск: Изд-во ТГПУ, 2009. 210 с.
6. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
7. Козут Б.М., Фрид А.С. Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
8. Липатов Д.Н., Щеглов А.И., Манахов Д.В., Завгородняя Ю.А., Розанова М.С., Брехов П.Т. Пространственное варьирование свойств торфяных почв в нефтегазодобывающем регионе на северо-востоке о. Сахалин // Почвоведение. 2017. № 7. С. 874–885. <https://doi.org/10.7868/S0032180X1707005X>
9. Пастухов А.В., Каверин Д.А. Запасы почвенного углерода в тундровых и таежных экосистемах северо-восточной Европы // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1084–1094. <https://doi.org/10.7868/S0032180X13070083>
10. Смагин А.В., Садовникова Н.Б., Смагина М.В., Глаголев М.В., Шевченко Е.М., Хайдапова Д.Д., Губер А.К. Моделирование динамики органического вещества почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2001. 120 с.
11. Теория и методы физики почв / Под ред. Е.В. Шенина, Л.О. Карпачевского. М.: Гриф и К, 2007. 616 с.
12. Akumu C.E., McLaughlin J.W. Regional variation in peatland carbon stock assessments, northern Ontario, Canada // Geoderma. 2013. V. 209–210. P. 161–167. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.06.021>
13. Astiani D., Mujiman, Rafiastanto A. Forest type diversity on carbon stocks: Cases of recent land cover conditions of tropical lowland, swamp, and peatland forests in West Kalimantan, Indonesia // Biodiversitas. 2017. V. 18. № 1. P. 137–144. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d180120>
14. Ausseil A.G.E., Jamali H., Clarkson B.R., Golubiewski N.E. Soil carbon stocks in wetlands of New Zealand and impact of land conversion since European settlement // Wetlands Ecology and Management. 2015. V. 23. № 5. P. 947–961. <https://doi.org/10.1007/s11273-015-9432-4>
15. Beilman D.W., Vitt D.H., Bhatti J.S., Forest S. Peat carbon stocks in the southern Mackenzie River Basin: Uncertainties revealed in a high-resolution case study // Global Change Biology. 2008. V. 14. P. 1221–1232. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01565.x>
16. Conen F., Zerva A., Arrouays D., Jolivet C., Jarvis P.G., Grace J., Mencuccini M. The carbon balance of forest soils: detectability of changes in soil carbon stocks in temperate and boreal forests // The carbon balance of forest biomes / Eds. H. Griffith, P.G. Jarvis. Oxford: Garland Science/BIOS Scientific, 2004. P. 233–247.
17. Garnett M.H., Ineson P., Stevenson A.C., Howard D.C. Terrestrial organic carbon storage in a British moorland // Global Change Biology. 2001. V. 7. № 4. P. 375–388.
18. Goidts E., Van Wesemael B., Crucifix M. Magnitude and sources of uncertainties in soil organic carbon (SOC) stock assessments at various scales // Eur. J. Soil Sci. 2009. V. 60. № 5. P. 723–739. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2009.01157.x>
19. Griffiths N.A., Hanson P.J., Ricciuto D.M., Iversen C.M., Jensen A.M., Malhotra A., McFarlane K.J., Norby R., Sargsyan K., Sebesteyen S.D., Shi X., Walker A.P., Ward E.J., Warren J.M., Weston D.J. Temporal and spatial variation in peatland carbon cycling and implications for interpreting responses of an ecosystem-scale warming experiment // Soil Sci. Soc. Am. J. 2017. V. 81. № 6. P. 1668–1688. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0422>
20. Hoffmann U., Hoffmann T., Johnson E.A., Kuhn N.J. Assessment of variability and uncertainty of soil organic carbon in a mountainous boreal forest (Canadian Rocky Mountains, Alberta) // Catena. 2014. V. 113. P. 107–121. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2013.09.009>
21. Howie S.A., van Meerveld H.J. Are point measurements in a bog representative of their surrounding area? // Mires and Peat. 2019. V. 24. Article 09. P. 1–16. <https://doi.org/10.19189/MaP.2018.OMB.364>
22. IUSS Working Group WRB. 2015. World reference base for soil resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. Word Soil Resources Report 106. FAO. Rome.
23. Kauffman J.B., Arifanti V.B., Basuki I., Kurnianto S., Novita N., Murdiyarso D., Donato D.C., Warren M.W. Protocols for the measurement, monitoring, and reporting of structure, biomass, carbon stocks and green-

- house gas emissions in tropical peat swamp forests. 2016. Center for International Forestry Research Working paper 221. Bogor, Indonesia. 44 p. <https://doi.org/10.17528/cifor/006429>
24. *Maillard É., McConkey B.G., Angers D.A.* Increased uncertainty in soil carbon stock measurement with spatial scale and sampling profile depth in world grasslands: a systematic analysis // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. 2017. V. 236. P. 268–276. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.024>
 25. *Mitra S., Wassmann R., Vlek P.L.* An appraisal of global wetland area and its organic carbon stock // *Current Sci*. 2005. V. 88. № 1. P. 25–35.
 26. *Parry L.E., Charman D.J.* Modelling soil organic carbon distribution in blanket peatlands at a landscape scale // *Geoderma*. 2013. V. 211–212. P. 75–84. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.07.006>
 27. *Penman J., Gytarski M., Hiraishi T., Krug T., Kruger D., Pipatti R., Buendia L., Miwa K., Ngara T., Tanabe K., Wagner F.* Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Intergovernmental Panel on Climate Change, National Greenhouse Gas Inventories Programme (IPCC-NGGIP). Kanagawa, Japan, 2003.
 28. *Schrumpf M., Schulze E.D., Kaiser K., Schumacher J.* How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? // *Biogeosciences*. 2011. V. 8. № 5. P. 1193–1212. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1193-2011>
 29. *Weissert L.F., Disney M.* Carbon storage in peatlands: a case study on the Isle of Man // *Geoderma*. 2013. V. 204–205. P. 111–119. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.04.016>
 30. *Wellock M.L., Reidy B., Laperle C.M., Bolger T., Kiely G.* Soil organic carbon stocks of afforested peatlands in Ireland // *Forestry*. 2011. V. 84. № 4. P. 441–451. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpr046>
 31. *Wüst-Galley C., Mössinger E., Leifeld J.* Loss of the soil carbon storage function of drained forested peatlands // *Mires and Peat*. 2016. V. 18. Article 07. <https://doi.org/10.19189/MaP.2015.OMB.189>
 32. *Xing W., Bao K., Gallego-Sala A.V., Charman D.J., Zhang Z., Gao C., Lu X., Wang G.* Climate controls on carbon accumulation in peatlands of Northeast China // *Quatern. Sci. Rev.* 2015. V. 115. P. 78–88. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2015.03.005>
 33. *Yu Z.C.* Northern peatland carbon stocks and dynamics: a review // *Biogeosciences*. 2012. V. 9. № 10. P. 4071–4085. <https://doi.org/doi:10.5194/bg-9-4071-2012>
 34. *Zauft M., Fell H., Glaßer F., Roszkopf N., Zeitz J.* Carbon storage in the peatlands of Mecklenburg-Western Pomerania, north-east Germany // *Mires and Peat*. 2010. V. 6. Article 04.
 35. *Zerva A., Ball T., Smith K.A., Mencuccini M.* Soil carbon dynamics in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) chronosequence on a peaty gley // *Forest Ecol. Managem.* 2005. V. 205. № 1–3. P. 227–240. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.10.035>
 36. *Zhang Y., Hartemink A.E.* Sampling designs for soil organic carbon stock assessment of soil profiles // *Geoderma*. 2017. V. 307. P. 220–230. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.013>

Spatial Variation of Organic Carbon Stocks in Peat Soils and Gleyzems in the Northeast of Sakhalin Island

D. N. Lipatov^{1,*}, A. I. Shcheglov¹, D. V. Manakhov¹, and P. T. Brekhov²

¹*Lomonosov Moscow State University, Moscow, 119991 Russia*

²*Voronezh State Agrarian University, Voronezh, 394087 Russia*

*e-mail: dlip@soil.msu.ru

Stocks of organic carbon in the northeast of Sakhalin Island average 109.8 kg/m² in oligotrophic medium-deep peat soils, 75.8 kg/m² in oligotrophic peat gley soils, 20.9–42.7 kg/m² in peat gleyzems, and 16.6 kg/m² in gleyzems. The vertical distribution of volumetric concentrations and stocks of carbon in different subtypes of peat soils and gleyzems have been studied. Linear regression equations for estimating carbon stocks depending on the depth of the peat layer have been developed. The coefficients of variation of carbon stocks on test plots of 50 × 50 m in size increase in the following order: oligotrophic medium-deep peat soils (3.1–7.3%) < oligotrophic peat gley soils (3.3–12.9%) < peat gleyzems (9.2–21.7%) < gleyzems (22.9%). The ratio of carbon stock variances has been estimated for three spatial scales (50 × 50 m, 5 × 5 km, and 10 × 10 km) using a hierarchical analysis of variance. The required number of sampled profiles for adequate data on the average carbon stocks in peat soils and gleyzems has been estimated. Nomograms for determining the least significant difference between the estimates of average soil carbon stocks are proposed for studies with a small number of samples.

Keywords: bog soils, soil profile, sampling, soil monitoring, Fibric Histosols, Histic Gleysols