Сибирский экологический журнал, 6 (2023) 854-871

УДК 551.89+631.4 (571.5) DOI 10.15372/SEJ20230611

Вариации состава стабильных изотопов углерода органического вещества почв в горно-котловинных условиях Прибайкалья

В. А. ГОЛУБЦОВ^{1*}, А. А. ЧЕРКАШИНА¹, Ю. В. ВАНТЕЕВА¹, Н. Н. ВОРОПАЙ^{1, 2}, С. М. ТУРЧИНСКАЯ³

¹Институт географии им. В. Б. Сочавы СО РАН 664033, Иркутск, ул. Улан-Баторская, 1

²Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН 634055, Томск, просп. Академический, 10/3

> ³Институт географии РАН 119017, Москва, пер. Старомонетный, 29 ^{*}E-mail: tea_88@inbox.ru

> > Статья поступила 28.11.2022 После доработки 07.02.2023 Принята к печати 09.02.2023

аннотация

Представлен анализ внутрипочвенных и пространственных вариаций состава стабильных изотопов углерода органического вещества почв для выявления основных факторов, определяющих динамику органического углерода в горно-котловинных условиях Прибайкалья. Органическое вещество исследуемых почв характеризуется значениями δ^{13} С от -29,6 до -24,9 %. Изменения значений δ^{13} С в высотном профиле хорошо соотносятся со сменами ландшафтов и отражают влияние климатических факторов на дискриминацию¹³С в ходе фотосинтеза С3-растений. Наиболее тяжелым составом стабильных изотопов углерода характеризуются почвы подгольцовых и степных ландшафтов. В таежных почвах наблюдается снижение доли тяжелых изотопов. Анализ различий интенсивности оборота углерода, выраженной через наклон линейной регрессии (β) значений δ^{13} С от содержания общего углерода в почве, изменяющихся с глубиной, дает основание предполагать сниженную интенсивность оборота углерода в почвах степей и подгольцового пояса в силу лимитированности данных почв по условиям влаго- и теплообеспеченности соответственно. В условиях таежных ландшафтов при более благоприятном соотношении температур и увлажнения динамика органического вещества почв контролируется преимущественно качественным составом опада и доступностью азота.

Ключевые слова: экология почв, δ^{13} С, оборот углерода, Юго-Западное Прибайкалье.

введение

Исследования динамики органического вещества в почвах в настоящее время привлекают повышенное внимание, так как являются важным звеном в оценке углеродного баланса в экосистемах и их отклика на климатические изменения [Пулы..., 2007; Zhao et al., 2021]. Запасы почвенного органического углерода значительно превышают количество углерода как в атмосфере, так и в наземной рас-

© Голубцов В. А., Черкашина А. А., Вантеева Ю. В., Воропай Н. Н., Турчинская С. М., 2023

тительности [Lal, 2018]. Предполагается, что CO_2 , выделяющийся при разложении почвенного органического вещества (ПОВ), вносит значительный вклад в наблюдаемые изменения климата [Lal, 2018; Zhao et al., 2021]. При этом прогнозируемое потепление будет усиливать эмиссию CO_2 из почв в атмосферу за счет ускорения минерализации ПОВ [Pries et al., 2017].

Находящийся на юге Восточной Сибири Байкальский регион является одним из наиболее подверженных глобальному потеплению регионов планеты [Шимараев и др., 2002; Mackay et al., 2016], что не может не отразиться, в частности, на изменении баланса углерода в региональных ландшафтах [Mackay et al., 2016]. В условиях относительно слабой изученности поведения углерода в почвах региона представляется важной оценка основных факторов, определяющих его динамику в различных экологических условиях.

Одним из важных подходов к решению подобных задач является анализ состава стабильных изотопов углерода (δ^{13} C). δ^{13} C рассматривается в качестве интегрального показателя процессов трансформации ПОВ [Dawson et al., 2002] и имеет значительный потенциал для оценки динамики почвенного углерода [Acton et al., 2013].

Основными внешними факторами, определяющими состав стабильных изотопов углерода ПОВ, являются температура и влагообеспеченность [Diefendorf et al., 2010; Xu et al., 2015; Rao et al., 2017]. Их ведущая роль обусловлена влиянием температуры на ферментативную активность и интенсивность фотосинтетических реакций и влиянием влажности на устьичную проводимость [Dawson et al., 2002; Seibt et al., 2008; Diefendorf et al., 2010]. Кроме того, соотношение данных параметров в различных экологических условиях определяет качество поступающего растительного опада, микробную активность и почвенные физико-химические свойства (плотность сложения, pH, общее содержание углерода и азота, отношение C/N, гранулометрический состав и др.), которые также оказывают опосредованное влияние на фракционирование изотопов углерода и значения δ^{13} С ПОВ [Nel et al., 2018; Zhao et al., 2020].

Влияние этих факторов на δ^{13} С ПОВ наилучшим образом прослеживается в условиях широкой амплитуды климатических изменений [Diefendorf et al., 2010: Rao et al., 2017]. Однако вариации δ^{13} C не столь изучены для экологических градиентов в пределах одного типа климата. Заполнение этого пробела особенно актуально для слабо изученных в изотопно-геохимическом отношении территорий, так как будет способствовать лучшему пониманию отклика почв на климатические изменения. Горно-котловинные условия Прибайкалья представляют собой подходящий объект для решения подобных задач ввиду вариативности биоклиматических факторов на достаточно близких расстояниях и, как следствие, контрастных условий почвообразования.

Цель работы – оценка изменчивости состава стабильных изотопов углерода органического вещества почв, формирующихся в горно-котловинных условиях Прибайкалья, в зависимости от сочетания различных биоклиматических факторов.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Тункинская котловина расположена на юго-западном фланге Байкальской рифтовой зоны (рис. 1). Среди всех котловин Тункинской ветви здесь отмечается наибольшая амплитуда высот (1300-2300 м) между днищем и горным обрамлением. На севере цепь Тункинских Гольцов круто (до 30-40°) обрывается в направлении впадины, опираясь на наклонную предгорную равнину с выраженным переломом профиля. С юга котловину ограничивает массивный платообразный хр. Хамар-Дабан, который снижается без резких изломов профиля. Аккумулятивная часть Тункинской котловины неоднородна и представлена рядом морфологических элементов, отличающихся по рельефу, высоте и условиям увлажнения [Нагорья..., 1974; Черкашина, Голубцов, 2016].

Климат территории резко-континентальный, характеризуется большими суточными и годовыми (до 35–43 °C) амплитудами температур и отличается высокой пространственной неоднородностью с заметным градиентом температур и осадков между периферическими и центральной частями котловины [Василенко, Воропай, 2015]. Средняя годовая температура воздуха на исследуемой территории отрицательная (табл. 1). По данным метеостан-



Puc. 1. Территория исследования и положение исследуемых площадок в пределах Тункинской котловины и ее горного обрамления.

1 - метеостанции; 2 - площадки полевых исследований; 3 - горизонтали с высотой сечения 200 м; 4 - реки

ций Тунка и Кырен в днище котловины (см. рис. 1) она варьирует от -2,2 до -2,4 °C (см. табл. 1). Однако по данным мониторинговых микроклиматических наблюдений с помощью сети датчиков установлено, что этот показатель в пределах котловины сильно варьирует: в днище котловины составляет -2,6 °C, а на северном и южном склонах котловины он

выше (-1,6 и -1,2 °С соответственно) [Василенко, Воропай, 2015].

Рассматриваемая территория неоднородна и по среднегодовому количеству осадков. Так, в днище котловины оно минимально по всему Восточному и Центральному Саяну и составляет 350-400 мм, в Тункинских гольцах – 500-600 мм, на склонах Хамар-Дабана – до

Таблица 1 Основные климатические показатели по данным метеостанций

	Абсолютная	I	Среднегодовое				
Название метеостанций	высота, м	Среднегодовая	Средняя за июль	Средняя за январь	количество осадков, мм		
Тунка* (1934–2021)	721	-2,4	17,2	-26,1	385		
Кырен* (1952–2021)	755	-2,2	16,9	-25,0	356		
Аршан (закрыта в 1997) [Василенко, Воропай, 2015; Научно-прикладной справочник, 1991]	885	-0,9	13-15	-2023	506		

*Климатические показатели рассчитаны по данным архива погоды (Тунка – http://www.pogodaiklimat.ru/ history/30811_2.htm, Кырен -http://www.pogodaiklimat.ru/history/30806.htm)

1000 мм. Во внутригодовом распределении осадков также отмечается существенная неоднородность: первая половина вегетационного периода (май – июнь) отличается засушливостью, для июля – августа увлажнение оптимально. При этом основная масса осадков (75 %) выпадает летом [Василенко, Воропай, 2015]. Зима с отрицательными температурами начинается в середине ноября и длится около семи месяцев. В высокогорной части Тункинского хребта в конце августа – начале сентября устанавливается снежный покров, который сохраняется до конца мая - середины июня. В центре котловины продолжительность залегания снежного покрова значительно меньше (146 дней). Запасы снежного покрова становятся больше с увеличением абсолютной высоты в горах [Воропай и др., 2019].

Контрастность климата и орографические условия обусловили формирование поясности, характерной для полугумидного сектора гор Южной Сибири с лесостепным, подтаежным, горно-таежным и подгольцовым, гольцовым и нивальным поясами [Холбоева, Намзалов, 2000].

Отмечается большое разнообразие почв и неоднородность их пространственного распределения [Черкашина, Голубцов, 2016; Черкашина и др., 2021]. Естественный почвенный покров предгорных наклонных равнин представлен серыми почвами (Luvic Greyzemic Phaeozems) на легко- и среднесуглинистых отложениях под сосново-мелколиственными лесами. Подбуры (Folic Entic Podzols), дерновоподбуры (Entic Podzols), серогумусовые (Haplic Phaeozem, Haplic Phaeozem (Siltic)) и серые метаморфические (Eutric Cambisols) почвы приурочены к супесчаным и легкосуглинистым отложениям под сосновыми и березово-сосновыми лесами. Пологие склоны и седловины заняты лесными лугами с темногумусовыми почвами (Haplic Umbrisols).

В днище котловины под лугово-степной растительностью на высоких речных террасах почвенный покров представлен серогумусовыми, светлогумусовыми (Calcaric Phaeozems) и темногумусовыми (Haplic Umbrisols, Calcaric Phaeozems) почвами. Под влажными лугами на низких террасах и поймах формируются аллювиальные почвы (Eutric Fluvisols) с серогумусовыми, темногумусовыми или перегнойными горизонтами. Под пойменными еловыми лесами распространены глееземы перегнойные криотурбированные (Gleyic Cryosols), перегнойно-глеевые мерзлотные (Histic Cryosols) и грубогумусовые (Haplic Cryosols) почвы [Черкашина, Голубцов, 2016; Черкашина и др., 2021].

Для выявления пространственной неоднородности состава стабильных изотопов углерода органического вещества почв исследуемой территории заложен ландшафтный профиль, охватывающий горное обрамление котловины (южный макросклон хр. Тункинские Гольцы и предгорья северного макросклона хр. Хамар-Дабан) и ее центральную часть. Он закладывался с учетом максимального охвата ландшафтно-климатических условий и включал горно-тундровые, горно-таежные, подтаежные и степные ландшафты. Профиль включает в себя 13 площадок (10 × 10 м), расположенных в интервале высот от 723 м (котловинная часть) до 2063 м (хр. Тункинские гольцы).

На каждой площадке выполнено описание фитоценозов (тип, ярусная структура, видовой состав, проективное покрытие каждого вида), определены литолого-геоморфологические условия (абсолютная высота, геоморфологическое положение, экспозиция и крутизна склона), проведен морфогенетический анализ почв (табл. 2). Классификационное положение почв определено с учетом принципов, предложенных в [Классификация..., 2004] и [IUSS..., 2015].

Растительный опад на поверхности почвы отобран на каждой из площадок в пяти местах (четыре угла и центральная точка). Образцы опада и подстилок были высушены и гомогенизированы до состояния тонкой пыли. Горизонты почв высушены до воздушно-сухого состояния. Пробы, отобранные из минеральных горизонтов почв, просеяны через сито диаметром 2 мм (удалены камни и растительные остатки), обработаны 1М (1 моль/л) раствором HCl, промыты до нейтральной реакции среды, высушены и гомогенизированы [Wang et al., 2015].

Общее содержание органического углерода и азота (%) ПОВ и опада определено методом пиролиза проб на элементарном анализаторе CHNS Vario Isotope Cube (Elementar, Германия). Состав стабильных изотопов углерода (δ¹³C) измерен на комплексе оборудования CHNS-анализатор Vario ISOTOPE Cube масс-спектрометр Isoprime precisION IRMS (Elementar, Великобритания), соединенных в режиме непрерывного потока. Измерения проводили в ЦКП "Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии" Института географии РАН. Изотопный состав углерода (δ^{13} С) выражен в промилле (%) относительно международного стандарта белемнита Vienna Pee Dee (VPDB, CША):

$$\delta X_{\text{образец}} (\% c) = \frac{(R_{\text{образец}} - R_{\text{стандарт}})}{R_{\text{стандарт}}} \cdot 1000,$$

где X – это элемент (C), а R – отношение тяжелого изотопа к более легкому в анализируемом образце и стандарте.

Образцы анализировались с использованием газа высокой чистоты (CO₂), откалиброванного по эталонным материалам МАГАТЭ (IAEA-CH-7-Polyethylene, IAEA-600-Caffeine). В качестве рабочих лабораторных стандартов и для построения калибровочной кривой использовали стандарты Casein B2155, Urea B2174 и Sorghum Flour B2159 (Elemental Microanalysis, UK). Стандартные отклонения для измерения концентраций δ^{13} С составили <0,1 ‰. Значения pH почвенных суспензий определены потенциометрически.

Наблюдения за температурой воздуха и почв на территории котловин Тункинской ветви ведутся с 2007 г. с помощью программируемых электронных датчиков - термохронов [Василенко, Воропай, 2015]. Точность измерения температуры 0,1 °C, измерения проводятся с периодичностью 1 ч. С помощью методов описательной статистики на каждой площадке для температуры воздуха и поверхности почв рассчитаны средние годовые и средние за вегетационный период (с мая по сентябрь); определены даты устойчивого перехода температуры воздуха и почвы на поверхности через 0 и 10 °С в начале и конце теплого сезона, рассчитаны суммы температур за периоды с температурой выше заданных пределов, определена продолжительность этих периодов.

Для выявления факторов, оказывающих влияние на фракционирование стабильных изотопов углерода в ПОВ гумусовых горизонтов, применялся парный регрессионный анализ. Проведенная проверка выборок анализируемых параметров на соответствие нормальному распределению по критериям Шапиро – Уилка и Андерсона – Дарлинга дала положительный результат. В качестве дополнительных параметров помимо перечисленных выше микроклиматических показателей также рассматривались: абсолютная высота местности (м), рН, общее содержание азота (%) и С/N гумусовых горизонтов. Статистические расчеты выполнялись в программе PAST 4.03 [Hammer et al., 2001]. Для оценки интенсивности оборота углерода (β) в исследуемых почвах рассчитаны линейные регрессии $\delta^{13}C$ от изменений содержания органического углерода с глубиной.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Температурные условия исследуемых площадок. Для площадок, расположенных на южном макросклоне хр. Тункинские гольцы, отмечается рост средних температур за год и вегетационный период от верхних к нижним гипсометрическим уровням (рис. 2, *a*).

13,5 - 23,56	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	$\begin{array}{rrrr} -2.5 & -23,566 \\ 13,5 & -27,53 \\ 15,50 & -27,06 \\ 13,00 & -24,67 \\ 13,00 & -24,67 \\ 12,86 & -25,52 \\ 11,56 & -25,03 \\ 24,38 & -28,11 \\ 16,49 & -27,02 \\ 16,95 & -25,31 \\ 17,56 & -25,31 \\ 31,01 & -28,75 \\ 14,83 & -28,19 \\ 14,14 & -26,63 \\ 13,08 & -25,30 \end{array}$
9 0,23	9 0,23 1 0,55 3 0,60 8 0,37 1 0,71	9 0,23 1 0,55 3 0,60 8 0,37 1 0,71 1 1,13 5 2,11 5 0,88 9 0,39 9 0,39	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$
7,1 15,8 7,3 2,9	7,1 15,8 7,3 2,9 5,5 46,1 6,1 9,3 6,7 4,8 6,7 9,1	$\begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	7,1 15,8 7,3 2,9 6,1 9,3 6,7 4,8 6,7 4,8 6,7 4,8 6,7 4,8 6,1 51,5 5,1 51,5 5,1 7,1 5,1 6,9 4,6,5 7,1 6,9 5,3 39,1 5,2 21,8 5,7 5,0
АН Chi	АН Chi AH1 AH1 AH2 AH2	AH Chi AH1 AH1 AH1 AH2 AH2 AH3 AC AO BHF	АН Сhi АН1 АН1 АН1 АН2 АН2 АН2 АН2 АН2 АН3 ОL ОL АН СС
12-25(35)	$\begin{array}{ccc} & & & & & & & & & & & & & & & & & &$	$\begin{array}{cccc} & & & & & & & & & & & & & & & & & $	$\begin{array}{cccc} & & & & & & & & & & & & & & & & & $
Jlитозем перегной- но-темногумусовый (Hypereutric Some- rimollic Orthoskele- tic Leptosols)	Литозем перегной- но-темногумусовый (Нурегецтіс Some- rimollic Orthoskele- tic Leptosols) Перегнойно-темно- гумусовая с погре- бенными гумусо- выми горизонтами (Leptic Phaeozems (Hyperhumic))	Литозем перегной- но-темногумусовый (Hypereutric Some- rimollic Orthoskele- tic Leptosols) Перегнойно-темно- гумусовая с погре- бенными гумусо- выми горизонтами (Leptic Phaeozems (Hyperhumic)) (Hyperhumic)) (Hyperhumic)) мусовый иллюви- ально-гумусовый (Skeletic Folic Leptic Entic Podzols)	Литозем перегной- но-темногумусовый (Hypereutric Some- rimollic Orthoskele- tic Leptosols) Перегнойно-темно- гумусовая с погре- бенными гумусо- выми горизонтами (Leptic Phaeozems (Hyperhumic)) (Hyperhumic)) пробур грубогу- мусовый иллюви- ально-гумусовый (Skeletic Folic Leptic Entic Podzols) Перегнойно-тем- ногумусовая (Hy- pereutric Someri- mollic Folic Skeletic Leptosols)
	Ветошь зла- ков и осоки и	Ветошь зла- Ветошь зла- ков и осоки ков и осоки (преимущест- венно лист- венница) с примесью ве- тоши вейника	Ветошь зла- ков и осоки ков и осоки преимущест- венно лист- венница) с примесью ве- тоши вейника Хвоя Тоши вейника Хвоя Тоши вейника Злаков ветоши
(V1IL.) Ғіогі тұңда	(VIII.) F10г1) тундра Кустарниковая (Dasiphora fruticosa В (L.) Rydb, Caragana jubata (Pall.) к Poir.) злаково-осоковая (Helic- totrichon altaicum Tzvelev, Carex petricosa Dewey) тундра	 (VIII.) FJORT) ТУНДРА Кустарниковая (Dasiphora fruticosa В (L.) Rydb., Caragana jubata (Pall.) к Poir.) злаково-осоковая (Helic- totrichon altaicum Tzvelev, Carex petricosa Dewey) тундра Кедрово (Pinus sibirica Du Tour)- Тиственничный (Larix sibirica Ledeb) разногравно (Thalictrum minus L., Trollius sajanensis (Malyschev) Sipliv.)-вейниковый (Calamagrostis arundinacea (L.) Roth) лес т 	 (VIII.) FJORT) ТУНДРА (VIII.) FJORT) ТУНДРА Кустарниковая (Dasiphora fruticosa B (L.) Rydb, Caragana jubata (Pall.) Poir.) злаково-осоковая (Helic- totrichon altaicum Tzvelev, Carex petricosa Dewey) тундра Кедрово (Pinus sibirica Du Tour)- Tuncrbeнничный (Lariz sibirica Ledeb) (празнотравно (Thalictrum minus L., Trollius sajanensis (Malyschev) El., Trollius sajanensis (Malyschev) El., Trollius sajanensis (Malyschev) Sipliv.)-вейниковый (Calamagrostis arundinacea (L.) Roth) лес to agrostis sipp., Agrostis gigan- to agrustifolium (L.) Scop, parasenecio hastatus (L.) H. Koyama) лес местами зеленомошный (Pleuro- zium schreberi (Willd. ex Brid.) Mitt.)
	N 51°56'31,77", Kycr. E 102°26'25,04"; (L.) R 1932 M Poir.) totri petri	N 51°56'31,77"; Куст, E 102°26'25,04"; (L.) F 1932 м Poir.) totric petria E 102°26'16,69"; Кедр E 102°26'24,58"; лист 1712 м L, 77 L, 77 Sipli arun arun	N 51°56'31,77"; Kycri E 102°26'25,04"; (L.) R 1932 M Poir: petrid petrid norre 1712 M 51°56'16,69"; Kedp E 102°26'24,58"; marer 1712 M 51°56'16,69"; Kedp E 102°26'24,58"; Stepli arunu N 51°56'06,27"; Jucr E 102°26'15,86"; (Spir 1493 M (Cala arunu N 51°56'06,27"; Tucr E 102°26'15,86"; (Spir tea R tea R tea R tea R tea R
113 N.	E 1 192	E 1 196 114 N	E 1 114 E 1 17: 14/1 N 1 14/1 E 1 14/1 E 1

Таблица

5 л. 2	12	-28,08	-27,79	-25,12	-24,86	-23,77	-24,87	-23,28	-29,07	-27,98	-27, 22	-26,01	-25,81	-25,46	-24,31	-23,23	-29,61	-29,10	-27, 12	-26,98	-24,68	-23, 22	-29,51	-28,69	-25,47	-23,87	
Та	11	23,99	12,16	10,23	13,68	10,92	16,77	9,67	22,61	14,94	12,34	13,68	13,62	13, 22	13,41	12,0	34,80	24,15	22,92	22,80	23, 20	16,00	36,72	21, 29	15,18	11,00	
ение	10	1,74	0,51	0,43	0, 34	0,13	0,57	0,12	2, 21	2,37	1,26	0,78	0,68	0,36	0, 17	0,16	1,17	1,71	0,36	0,30	0,05	0,03	1,36	1,53	0, 22	0,12	
жго	6	41,8	6,2	4,4	4,7	1, 4	9'6	1,2	50,0	35,4	15,6	10,7	9,3	4,8	2, 3	1,9	40,7	41,3	8,3	6, 8	1,2	0,5	50,0	32,6	3,3	1, 3	
род	œ	6,7	5, 3	4,9	5,1	5,1	5,4	5,6	I	6,1	5,4	5,2	5,5	5,7	6,2	6, 8	5,5	6,1	5, 5	5,8	6, 3	6, 6	6,4	6,8	6, 8	7,2	
	7	OL	AY1pyr, tu	AY2pyr, tu	AYBpyr, tu	C[A-Bpyr, tu]	IJ	C	OL	НО	AYpyr	AYpyr, e	AYpyr, e	AY-BHF	BHF	BHF	OL	НО	AY	Aye	Bfi	BCg	OL	AO	AYpa	BFpyr, tu	
	9	1 - 3	3 - 10	10 - 18	18 - 30	30 - 40	40 - 50	50 - 70	0 - 1	1 - 2	2-4	4 - 9	9 - 15	15 - 20	20 - 30	30 - 50	0 - 1	1 - 2	2 - 6	6 - 8	8 - 25	25 - 42	0 - 1	1 - 2	2 - 16	22 - 30	
	5	Серогумусовая пи-	рогенная турбиро- ванная (Umbrisols	(Siltic, Hyperdys-					Дерново-подбур оподзоленный, пи- рогенный с серией погребенных пиро- генных горизонтов (Someriumbric Entic Podzols (Arenic, Albic))								Дерново-подбур оподзолен– ный глинисто– иллювиированный глееватый (Someri- umbric Entic Podzols (Arenic, Albic))							Дерново-подбур ил- лювиально-желези- стый, постагроген- ный, пирогенный, остаточно-карбо- натный			
	4	Листья осины	с примесью ветоши осок						Листья бере- зы с приме- сью хвои							Листья бере-	зы с приме- сыо хвои			Листья бере- зы с ветошью трав смешан- ного состава							
	S	Елово (<i>Picea obovata</i> Ledeb.)-	осиновый (Populus tremula L.) с пихтой (Abies sibirica Ledeb.)	и кедром в подросте высокотравно (Aconitum muhicundum (Ser) Risch	ex C. Young, J. Young & P. Young,	Cimicifuga foetida L.) – осоковый (Carex spp.) лес			Кедрово-сосново-березовый (Betula pendula Roth) с елью и оснной кустарниковый (Rosa davurica Hult, nom. illeg., Spirea media) злаково (Schizachne callosa (Turcz. ex Griseb) Ohwi)-осоково (Carex lanceolata Boott)-разнотравный (Pyrola asarifolia Michx, Iris ruthenica Ker Gawl.) лес								Лиственнично-березово-сосновый	с кедром в подросте рододендровый (Rhododendron dauricum) разно-	травно (Rubus saxatilis L., Iris ru- thenica)-боуснично-зеленомоппылй	(Dicranum polysetum Sw., Pleuro-	zum schrebert)		Злаково (Calamagrostis spp.)-разно- травная (Chamaenerion angustifo- lium) луговина с подростом березы в окружении сосново-березового леса				
	2	N 51°41′19,60″;	E 102°40′52,39″; 918 м						N 51°38'56,55″; Е 102°16'06,10″; 785 м							N 51°40'54,95"; 5102°13'42,11"; 44 M							N 51°44'24,80"; E 102°35'17,30″; 763 m				
	1	Зактуй							Хари- бяты						357						293						

5 л. 2	12	-23,68	-28,03	-27,59	-26,93	-25,41	-25,18	-26,12	-25,50	-25,15	-25,58	-24,49	-27, 87	-27,74	-26,42	-24,17	-25,18	-26,70	-25,54	-25,12	-24,78	-24,38	-23,68
A T a	11	12,45	54, 55	52,88	43,88	37, 14	22,75	17,91	8,77	10,06	11,25	8,00	57,02	28,51	27,62	11, 17	29,67	47, 21	23,17	14,95	10,67	9,93	8,55
ание	10	0,11	0,98	0,93	0,16	0,07	0,04	1,49	0,57	0,68	0,57	0, 27	0,92	0,95	0,13	0,06	0,03	1,12	0,35	0,38	0,15	0,15	1,10
ннох	6	1,4	53, 52	49,18	7,0	2,6	0,9	26,61	5,0	6,8	6,4	2,2	52, 34	27,1	3,6	0,7	0,9	52,9	8,1	5,7	1,6	1,5	9,4
0	8	7,3	4,7	5,4	4,9	5,6	6,5	6,2	7,5	7,8	7,9	8,5	5,3	5,2	6,2	6,7	6,8	5,3	5,3	5,1	5,9	6,9	7,5
	7	BFpyr, tu	OL	НО	AY	AY	BF	OL	AU	AU	AUB	Bi	OL	Aao	AY	BF	BF	OL	Aao	AYe	ΑY	BFi	BF ic
	9	30–38	0 - 0.5	0.5 - 1	1 - 2	2 - 10	10 - 30	0 - 1	1 - 3	3 - 17	17 - 35	35 - 55	0 - 1	1 - 4	4 - 10	10 - 34	34 - 46	0 - 3	3-6	6 - 10	10 - 19	19 - 29	29 - 37
	5	(Vitric Anthroum- bric Leptic Entic Podzols (Loamic, Aric, Endoeutric))	Дерново-подбур иллювиально-же- лезистый (Entic Podzols (Arenic, Endoeutric))				Чернозем криоген- но-мицеллярный (Hypocalic Cher- nozemes (Arenic, Aric))				Дерново-подбур иллювиально-желе- зистый, грубогуму- сированный (Entic Podzols (Arenic, Endoeutric))					Дерново-подбур оподзоленный, гли- нисто-иллювииро- ванный, остаточно- карбонатный (Vitric Skeletic Folic Leptic Entic Podzols (Loamic, Endoeu- tric))							
	4		Хвоя сосны					Преиму- щественно ветошь зла- ковых				Хвоя сосны с примесью листьев ко- стяники					Хвоя сосны						
	33		Сосновый мертвопокровный лес					азнотравно (Scabiosa comosa lisch. ex Roem. & Schult., Schizonepeta multifida (L.) Briq.)- лаковая (Agrostis trinii Turcz, ilytrigia repens (L.) Nevski) луговелая степь					Сосновый рододендрово (Rho-	dodendron dauricum)-бруснич- но-разнотравный (Rubus saxatilis,	Лиственнично-сосновый с подро- стом кедра кустарниковый (Spirea media, Cotoneaster melanocar- pus Fisch. ex Blytt) разнотравно (Fragaria vesca L, Polygonatum odoratum (Mill.) Druce)-зелено- woumый (Dicranum polysetum, Pleurozium schreberi) лес								
	2		N 51°43'10,10'';	E 102°35′18,50″; 739 m				N 51°42′14,20′′; E 102°24′44,60′′; 723 м					N 51°44'22,25''; E 102°19'44,40''; 764 M					N 51°49'24,63"; E 102°29'18,85"; 773 M					
	1		179					278					501/1					185/1					



Puc. 2. Дифференциация площадок по температурным условиям воздуха и поверхности почвы.

 а – средние годовые температуры воздуха и средние температуры за вегетационный период; б – суммы температур выше 0 и 10 °С; в – длительность периодов с положительными температурами

Вниз по ландшафтному профилю растет продолжительность периодов с положительными температурами и их суммы. Примечательно, что для т. 115/1, расположенной на высоте 1255 м, среднегодовые температуры заметно выше таковых даже для точек в днище котловины. Ранее отмечалось [Василенко, Воропай, 2015], что подобные эффекты на исследуемой территории связаны с инверсиями температур, т. е. повышения температуры воздуха с высотой вместо обычно наблюдаемого падения, и ярко проявляются, в частности, на высотах около 1200 м. Для т. 115/1 также характерна максимальная продолжительность периодов с положительными температурами. Однако отмечаются относительно низкие суммы температур выше 0 и 10 °С для поверхности почвы, что обусловлено наличием сомкнутого древесного яруса и густого подлеска. Данная тенденция характерна и для площадок, заложенных в подтаежных (т. 501/1) и таежных (т. 357) лесах в днище котловины (рис. 2, б).

В целом площадки, расположенные в котловинной части, а также в предгорьях хр. Хамар-Дабан, не демонстрируют выраженных различий в термических условиях. Несколько меньшей теплообеспеченностью характеризуются точки 501/1 и 357. Наиболее прогреваемой является т. 278, заложенная в пределах степного ландшафта центральной части котловины. Примечательно, что при высоких суммах положительных температур и средних температурах за год и вегетационный период длительность периода с положительными температурами здесь заметно ниже, чем, например, для т. 115/1 (рис. 2, в). Это свидетельствует, в частности, о том, что степные почвы здесь формируются в довольно контрастных условиях, при жарком и довольно коротком вегетационном периоде со значительными амплитудами температур.

Физико-химические свойства почв. рН. Гумусовые горизонты почв, формирующихся в верхней части ландшафтного профиля (точки 110 и 113) на южном макросклоне хр. Тункинские гольцы, характеризуются близкими к нейтральным значениями pH (рис. 3). С понижением абсолютной высоты местности и сменой ландшафтов с подгольцовых на горно-таежные реакция среды гумусовых горизонтов становится слабокислой. Это характерно также для почв, формирующихся в предгорьях хр. Хамар-Дабан, и таежных и подтаежных почв в котловинной части (точки 185/1, 357 и 179). Тем не менее значения рН для точек 293 и 501/1 близки к нейтральным. В первом случае такой сдвиг наиболее вероятно связан с подщелачиванием в результате пирогенного воздействия, а также карбонатностью почвообразующих пород. В случае с т. 501/1 небольшое подщелачивание вызвано привносом карбонатов на поверхность почвы при перевевании подстилающих отложений в результате эоловых процессов, активно протекающих в данной части котловины. Последнее справедливо и для чернозема, формирующегося под степью в центральной части котловины (т. 278).

Реакция среды горизонтов опада в целом близка к таковой для гумусовых горизонтов. В большинстве случаев она немного более кислая. Однако горизонты опада почв в предгорьях хр. Хамар-Дабан демонстрируют более высокие значения pH, что связано с недавними пирогенными событиями, о которых свидетельствуют многочисленные углистые включения. Практически для всех исследуемых почв отмечается рост значений pHc глубиной (см. табл. 2). Исключением является подбур, сформированный в т. 114.

Общий органический углерод, общий азот, С/N. Для всех исследуемых почв отмечается в различной степени выраженное внутрипрофильное снижение содержания органического



Рис. 3. Некоторые химические свойства почв (a) и коэффициенты наклона линейной регрессии (β) (б). Гумусовые горизонты подгольцовых (1), таежных (2), подтаежных (3) и степных (4) почв; 5 – горизонты опада. Римскими цифрами обозначены различные части высотного профиля: I – южный склон хр. Тункинские гольцы; II – северный склон хр. Хамар-Дабан; III – Тункинская котловина

углерода (см. табл. 2). Наиболее резкий градиент наблюдается при переходе от органогенных к минеральным горизонтам. Повышенное содержание органического углерода наблюдается в погребенных гумусовых горизонтах. Содержание Сорг в гумусовых и органогенных горизонтах почв исследуемого ландшафтного профиля довольно близкое. Выраженных изменений по данному показателю с уменьшением высоты местности и сменой ландшафтов не происходит (см. рис. 3). Тем не менее для почв, формирующихся в точках 114, 114/1, 115/1, 293 и Харибяты, отмечаются максимальные значения Сорг в верхних частях профилей, что связано с более выраженным органопрофилем данных почв. Содержание органического углерода в горизонтах опада не показывает каких-либо выраженных изменений с высотой, колеблясь от точки к точке в интервале 40-55 %. Минимальное содержание Сорг отмечается в степном войлоке (т. 278).

Содержание общего азота, как правило, максимально в горизонтах опада и постепенно снижается с глубиной. Однако для опада в точках 113, 114/1 и 115/1 оно несколько ниже, чем в подстилающих гумусовых и органогенных горизонтах почв. На ландшафтном профиле наибольшие содержания общего азота в поверхностных органогенных и гумусовых горизонтах характерны для горнотаежных почв хр. Тункинские гольцы (114, 114/1 и 115/1) и предгорий хр. Хамар-Дабан (Зактуй и Харибяты). Почвы, формирующиеся в верхней (110, 113) и нижней (185/1, 278) частях высотного профиля, характеризуются меньшими количествами азота в органическом веществе (см. рис. 3).

Отношение C/N в гумусовых горизонтах большинства исследуемых почв довольно близко. Расширение соотношения наблюдается в разрезах таежных (точки 115/1, 357) и подтаежных (точки 501/1, 179) почв. Гораздо большей вариативностью по данному показателю характеризуются горизонты подстилки и опада. В целом для рассматриваемых таежных почв отмечается общая тенденция к расширению отношения C/N со снижением абсолютной высоты местности. При этом отмечаются значительные вариации между отдельными точками. Наиболее низкие значения C/N характерны для чернозема (т. 278), наиболее высокие – для ветоши на поверхности почвы, формирующейся в т. 113.

Состав стабильных изотопов углерода. Значения δ^{13} С органического вешества гумусовых горизонтов почв варьируют от -24,9 до -28,19 ‰. Для горизонтов подстилки и опада вариации значений δ^{13} C укладываются в диапазон от -26,1 до -29,6 %. Наиболее высокими значениями δ^{13} C характеризуются почвы, формирующиеся в условиях подгольцовых и степных ландшафтов (рис. 4). Близкие значения отмечаются и в отдельных подтаежных почвах в котловинной части (точки 185/1 и 293). Для органического вещества остальных почв, формирующихся под тайгой, отмечается облегчение изотопного состава. Вне зависимости от условий и характера почвообразования для почв характерен рост значений $\delta^{13}C$ с глубиной.

обсуждение

Органическое вещество исследуемых почв существенно варьирует по изотопному составу углерода (от -29,6 до -24,9 %), охватывая значительную часть диапазона значений δ¹³С, характерных для фитоценозов с С3-типом фотосинтеза [Diefendorf et al., 2010]. При анализе видового состава фитоценозов на тестовых площадках растений с С4-типом фотосинтеза также не было выявлено. Изменения изотопного состава углерода с высотой на исследуемой территории носят нелинейный характер (полиномиальная зависимость второй степени, $r^2 = 0.52$, уровень значимости p = 0.02). Степные почвы исследуемой территории формируются в относительно засушливых условиях (особенно в первой половине вегетационного периода), при значительной теплообеспеченности (см. рис. 2). Для почв подгольцового пояса характерна существенная ограниченность тепловых ресурсов, что сказывается и на формировании здесь приспособленных к подобным условиям растительных сообществ (см. табл. 2). Несмотря на принципиальные различия в условиях почвообразования, ПОВ верхней (подгольцовой) и нижней (степной) частей ландшафтного профиля имеет схожие величины δ^{13} C и наиболее обогащено тяжелыми изотопами углерода¹³С.

Логично предположить, что наблюдаемые вариации изотопных соотношений ${}^{13}C/{}^{12}C$ верхней и нижней частей исследуемого профиля отражают влияние климатических факторов на дискриминацию ${}^{13}C$ в ходе фотосинтеза С3-растений. Основными из них являются температура и влагообеспеченность [Dawson et al., 2002; Seibt et al., 2008; Diefendorf et al., 2010; Rao et al., 2017] в силу их определяющего влияния на интенсивность обмена СО₂ между растением и атмосферой. Сниженная влагообеспеченность растений контролирует уменьшение устьичной проводимости [Загирова и др., 2019] и, следовательно, повышенную эффективность фотосинтеза. Это приводит к уменьшению фракционирования изотопов углерода и повышению значений δ^{13} C (накоплению тяжелого изотопа) в растениях [Seibt et al., 2008; Xu et al., 2015; Rao et al., 2017]. С учетом ранее выявленной региональной зависимости состава стабильных изотопов углерода ПОВ от влагообеспеченности [Голубцов и др., 2021], наиболее вероятно, что данный механизм лежит в основе обогащения органического вещества степных почв исследуемой территории изотопом¹³С.

Косвенно подтверждает важную роль влагообеспеченности в формировании состава стабильных изотопов углерода ПОВ и тенденция к росту значений δ^{13} С (на 2,01 ± 0,73 ‰) в опаде при смене таежных условий (т. 115/1) на более засушливые подтаежные (точки 185/1, 501/1, 179) (см. табл. 2, рис. 4). Опад в указанных точках практически полностью сложен сосновой хвоей, что позволяет не рассматривать видовые различия и физиологические особенности растений в качестве основных факторов, обусловивших такие изменения в изотопном составе.

Дополнительным фактором, обусловившим повышенные значения $\delta^{13}C$ в степных почвах, может быть температура. Однако данная зависимость носит несколько более сложный характер [Xu et al., 2015; Rao et al., 2017]. Как низкие, так и высокие температуры существенно ограничивают активность фотосинтетических ферментов и обусловливают снижение устьичной проводимости, что приводит к уменьшению дискриминации изотопов углерода и проявляется в росте значений δ¹³С в растительных тканях и продуцируемом ими ПОВ. Учитывая температурные условия площадок верхней части ландшафтного профиля, мы рассматриваем ограниченную теплообеспеченность в качестве ведущего фактора, обусловливающего высокие значения δ¹³С ПОВ в подгольцовом поясе.



Рис. 4. Вариации изотопного состава углерода в исследуемых почвах. Гумусовые горизонты подгольцовых (1), таежных (2), подтаежных (3) и степных (4) почв; 5 – горизонты опада. Римскими цифрами обозначены различные части высотного профиля: I – южный склон хр. Тункинские гольцы; II – северный склон хр. Хамар-Дабан; III – Тункинская котловина

В то же время достаточная теплообеспеченность в сочетании с повышенным увлажнением в таежных ландшафтах Тункинской котловины и ее горного обрамления благоприятны для поддержания оптимального водного баланса растений, формирующих органическое вещество таежных почв. Их фотосинтетическая активность поддерживается на высоком уровне, что в сочетании с высокой устьичной проводимостью обусловливает максимальное смещение изотопных соотношений в сторону снижения содержания тяжелого изотопа углерода и накоплению легкого ¹²С в ПОВ рассматриваемой части ландшафтного профиля. При этом снижение температур с высотой нивелируется температурными инверсиями, которые особенно выражены до высот около 1200 м (т. 115/1), а также преимущественно южной экспозицией площадок на хр. Тункинские гольцы, что, среди прочего, повышает продолжительность периода с положительными температурами, который здесь превышает таковой даже в котловине.

Примечательно, что описываемое распределение значений δ^{13} С ПОВ в ландшафтном профиле Тункинской котловины и ее горного обрамления во многом повторяет описанные нами ранее вариации состава стабильных изотопов углерода органического вещества почв западного побережья оз. Байкал [Голубцов и др., 2022]. Учитывая ранее опубликованные данные [Ковда и др., 2016; Du et al., 2014; Xu et al., 2015; Zhang et al., 2020], мы предполагаем, что подобный тип распределения значений δ^{13} С в высотном профиле широко распространен как в горно-котловинных районах Прибайкалья, так и в горных районах в целом.

Несмотря на значительное влияние климатических факторов на состав стабильных изотопов углерода ПОВ, объяснить ими все наблюдаемые вариации значений δ^{13} C затруднительно. Так, в пределах таежных ландшафтов наблюдаются выраженные вариации данного показателя при близких климатических параметрах. На наш взгляд, одним из основных факторов такой вариативности может служить различное соотношение хвойных и лиственных пород в структуре биоценоза. Для хвойных пород в целом характерны более высокие значения δ^{13} C, что связано с большей эффективностью использования воды хвойными породами по сравнению с лиственными [Dawson et al., 2002; Меняйло и др., 2014; Ковда и др., 2016]. Так, например, на площадке Зактуй в предгорьях Хамар-Дабана, где наблюдается снижение значений δ^{13} C в гумусовом горизонте, лес представлен старовозрастной сукцессией, и в опаде преобладают лиственные породы (преимущественно Populus tremula). Однако на площадках 114/1 и 115/1, где доминируют хвойные породы (Larix sibiriса и Pinus sylvestris), мы наблюдаем снижение доли тяжелых изотопов углерода в ПОВ гумусовых горизонтов по сравнению с остальными почвами, формирующимися под хвойными ле-

Таблица 3 Результаты парной корреляции для δ¹³С, коэффициенты Пирсона

	δ ¹³ 0	C
Фактор	r	р
pH	0,63	0,02
N,~%	-0,61	0,02
$T_{\Pi, \text{ cr}}, \ ^{\circ}\mathrm{C}$	-0,85	0,03

 Π римечание.
 $T_{\Pi,\ {\rm cr}}$ – температура поверхности почвы среднегодовая. сами. Такие различия, вероятнее всего, также определяются сукцессионной динамикой на точках 114/1 и 115/1, связанной, с одной стороны, с развитием опасных экзогенных процессов (обе исследуемые площадки расположены на довольно крутых склонах $20-30^{\circ}$), а с другой – пирогенным фактором. Формирование верхней части органопрофиля здесь, вероятно, происходило при другом составе растительного сообщества и, соответственно, других микроклиматических условиях.

В результате парного регрессионного анализа выявлена положительная средняя статистически значимая корреляция значений δ^{13} С гумусовых горизонтов почв с их кислотностью (табл. 3) и обратная – с общим содержанием азота. Среди микроклиматических параметров обнаружена довольно высокая обратная корреляция со среднегодовой температурой поверхности почвы (см. табл. 3), что подтверждает влияние теплообеспеченности на фракционирование стабильных изотопов углерода. С остальными показателями достоверных связей не выявлено.

Вариации значений δ^{13} C в пределах отдельно взятых почвенных профилей демонстрируют общую тенденцию к утяжелению изотопного состава углерода ПОВ с глубиной. Фракционирование изотопов углерода в ходе микробного разложения органического вещества почв является одной из наиболее распространенных гипотез для объяснения данного явления [Garten et al., 2000; Acton et al., 2013; Brunn et al., 2014]. Большинство биологических реакций происходит с дискриминацией изотопов, т.е. в ходе ферментативных реакций используются легкие изотопы, что приводит к остаточной аккумуляции тяжелых. Утяжеление изотопного состава углерода ПОВ связывают в основном с фракционированием изотопов в процессах микробного дыхания (эмиссия СО₂). Кроме того, степень обогащения ПОВ ¹³С повышается по мере увеличения циклов микробной утилизации [Werth, Kuzyakov, 2010]. Одним из показателей, позволяющих оценить интенсивность данного процесса и его роль в изотопной дифференциации почв, является наклон линейной регрессии (β) между значениями δ¹³С и изменением содержания органического углерода (в логарифмическом масштабе) с глубиной [Garten et al., 2000; Acton et al., 2013; Wang

et al., 2018]. Данный показатель служит индикатором интенсивности оборота углерода в почвах, формирующихся в широком спектре климатических условий [Acton et al., 2013; Wang et al., 2018; Голубцов и др., 2022]. При этом больший наклон регрессии (более отрицательные значения $\beta \delta_{13C}$) указывает на более выраженное обогащение ПОВ ¹³С в почвенном профиле и высокую скорость оборота углерода [Acton et al., 2013; Wang et al., 2018].

Один из наименее выраженных наклонов регрессии в отмечается в верхней и нижней частях профиля (см. рис. 3, б). Учитывая зависимость β от ландшафтно-климатических условий [Brunn et al., 2014; Wang et al., 2018; Голубцов и др., 2022], мы можем предполагать сниженную интенсивность оборота углерода в почвах степей и подгольцового пояса исследуемой территории в силу лимитированности данных почв по условиям влагои теплообеспеченности соответственно. Такая трактовка хорошо согласуется с представлениями о том, что скорость минерализации ПОВ в условиях низких температур [Craine et al., 2010; Wang et al., 2016] и иссушения почвы [Тулина, Семенов, 2015; Wang et al., 2016] существенно снижается, в частности, из-за снижения микробной активности. В т. 113 наблюдается более выраженный наклон регрессии, что, наиболее вероятно, связано с более благоприятным температурным режимом почвы, формирующейся здесь. Данная площадка расположена более чем на 130 м ниже т. 110. благодаря чему ее теплообеспеченность более оптимальна.

В таежных ландшафтах наблюдаются значительные колебания значений β, которые довольно слабо увязываются с климатическими параметрами. Данные ландшафты наиболее благоприятны на исследуемой территории с точки зрения соотношения тепло- и влагообеспеченности. В подобных условиях динамика органического углерода и скорость разложения растительного опада определяется преимущественно качеством поступающего органического материала [Cotrufo et al., 2009; Bradford et al., 2016]. Одним из показателей интенсивности разложения органических материалов в зависимости от их биохимического состава является отношение C/N [Zhang et al., 2008]. Во многих экспериментах показано снижение интенсивности минерализации органических остатков с ростом С : N [Cotrufo et al., 2009; Семенов и др., 2019]. Низкие значения этого показателя, как правило, коррелируют с высокой активностью минерализации органического вещества почв, поскольку увеличивается доступность азота для гетеротрофных микроорганизмов [Cotrufo et al., 2009; Меняйло и др., 2014].

Сопоставление вариаций значений β с C : N опада и гумусовых горизонтов таежных почв показало, что при расширении отношения C : N выраженность коэффициента β падает, при сужении C : N происходит рост наклона линейной регрессии. Это подтверждается и результатами парного регрессионного анализа (r = 0.8; $r^2 = 0.6$; p = 0.03). Принимая β в качестве индикатора интенсивности оборота углерода в почве, мы можем предполагать замедление такового в почвах, органическое вещество которых обеднено азотом (высокие значения C : N).

Таким образом, есть основания предполагать, что оборот углерода в таежных почвах исследуемой территории контролируется в основном качественным составом опада и внутрипочвенными факторами, влияющими на интенсивность его разложения. Основные ограничения для микробиологической активности при этом, вероятно, связаны с доступностью азота. Данная трактовка хорошо согласуется с тем, что леса умеренного пояса характеризуются закрытым азотным циклом [Rennenberg et al., 2009], когда потери азота низки вследствие высокой конкуренции за этот важный для питания растений и микробиоты ресурс, что характерно и для лесных почв Сибири [Меняйло и др., 2014]. Формирование органического вещества исследуемых таежных почв при поступлении преимущественно хвойного опада, обогащенного лигноцеллюлозными соединениями, требующими высокой энергии активации для разложения [Cotrufo et al., 2009], делает еще более выраженной зависимость интенсивности минерализации органического вещества от качества опада.

При этом наибольшая корреляция (r = 0,87; $r^2 = 0,75$; p = 0,005) отмечается именно с C/N опада, нежели чем гумусовых горизонтов почв. Данное обстоятельство подтверждает ранее высказанное предположение о том, что субстратная неоднородность изотопного состава играет важную роль в оценке и моделировании состава стабильных изотопов ПОВ [Camino-Serrano et al., 2019] и его внутрипрофильных вариаций в контексте оборота углерода.

Отдельного внимания заслуживает т. 115/1, характеризующаяся наиболее выраженным наклоном линейной регрессии при довольно широком отношении C/N. C одной стороны, подобные значения в могут быть связаны с особыми климатическими условиями. Благодаря температурным инверсиям данная площадка характеризуется среднегодовыми температурами заметно выше таковых в котловине, а также максимальной продолжительностью периодов с положительными температурами. С другой стороны, высокая интенсивность оборота углерода может быть связана со сменой произрастающего здесь растительного сообщества. В профиле почвы подобная смена хорошо читается по неоднородности органопрофиля почвы и ряду химических свойств на глубине 11 см (см. табл. 2). Лесные ландшафты схожих экспозиций на данных высотах зачастую замещены лугами, на которых при этом заметны следы ранее произраставшего древесного яруса (вывалы, одиноко стоящие деревья со следами гари). Такие смены происходят, в частности, в результате пожаров. Периодические смены растительных сообществ могут способствовать активному обороту углерода, что неоднократно отмечалось для лесов различных климатических зон [DeLuca, Boisvenue, 2012; Мамкин идр., 2019; Xiong et al., 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Состав стабильных изотопов углерода органического вещества почв Тункинской котловины и ее горного обрамления демонстрирует значительную вариативность, охватывая значительную часть диапазона значений δ^{13} С, характерных для С3-фотосинтеза. Наблюдаемые вариации отражают влияние климатических факторов на дискриминацию¹³С в ходе фотосинтеза С3-растений, что отчетливо проявляется в лимитированных по увлажнению степных почвах и почвах подгольцовых ландшафтов, формирующихся в условиях ограниченной теплообеспеченность. В то же время достаточная теплообеспеченность в сочетании с повышенным увлажнением в таежных ландшафтах исследуемой территории обеспечивает выраженную дискриминацию¹³С в растительных тканях при фиксации углерода и обусловливает накопление¹²С в составе стабильных изотопов углерода ПОВ в этой части ландшафтного профиля. Подобный нелинейный тип распределения значений δ^{13} С в высотном профиле, по-видимому, широко распространен как в горно-котловинных районах Прибайкалья, так и в других горных районах.

Климатические факторы оказывают значительное влияние и на внутрипочвенное фракционирование изотопов углерода и динамику ПОВ. Наименее выраженные наклоны perpecсии β в верхней и нижней частях ландшафтного профиля указывают на сниженную интенсивность оборота углерода в почвах степей и подгольцового пояса в силу лимитированности данных почв по условиям влаго- и теплообеспеченности соответственно. В более благоприятных климатических условиях таежных ландшафтов динамика органического вещества в почвах контролируется преимущественно внутрипочвенными факторами. Наиболее вероятно, что оборот углерода в таежных почвах исследуемой территории контролируется в основном качественным составом опада и внутрипочвенными факторами, влияющими на интенсивность его разложения. Основные ограничения для микробиологической активности при этом, вероятно, связаны с доступностью азота.

Несмотря на намеченные общие закономерности, многие локальные факторы изотопной неоднородности почв остались за рамками настоящего исследования. Одним из первоочередных вопросов, с точки зрения антропогенной нарушенности ландшафтов Тункинской котловины [Черкашина, Голубцов, 2016; Черкашина и др., 2021], является оценка влияния возраста растительных сообществ и связанных с ним изменений в циклах углерода [Мамкин и др., 2019] на динамику ПОВ. Его решение позволит более обоснованно подойти к оценке баланса углерода в региональных ландшафтах.

Работа выполнена в рамках государственных заданий АААА-А21-121012190055-7; АААА-А21-121012190056-4 и АААА-А21-121012190059-5 при финансовой поддержке РФФИ (проект № 20-04-00142).

Авторы благодарны канд. биол. наук Н. В. Степанцовой за определение и уточнение таксономической принадлежности отдельных видов растений.

- Василенко О. В., Воропай Н. Н. Особенности формирования климата котловин Юго-Западного Прибайкалья // Изв. РАН. Сер. геогр. 2015. № 2. С. 104–111.
- Воропай Н. Н., Киселев М. В., Черкашина А. А. Мониторинг температуры почв на многолетнемерзлых породах в естественных и антропогенно нарушенных условиях Тункинской котловины // Лед и снег. 2019. Т. 59, № 4. С. 517-528.
- Голубцов В. А., Вантеева Ю. В., Воропай Н. Н. Влияние влагообеспеченности на состав стабильных изотопов углерода органического вещества почв Байкальского региона // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1182–1194. [Golubtsov V. A., Vanteeva Yu. V., Voropay N. N. Effect of humidity on the stable carbon isotopic composition of soil organic matter in the Baikal region // Eurasian Soil Science. 2021. Vol. 54, N 10. P. 1463–1474.]
- Голубцов В. А., Вантеева Ю. В., Воропай Н. Н., Василенко О. В., Черкашина А. А., Зазовская Э. П. Состав стабильных изотопов (δ¹³C) как показатель динамики органического углерода в почвах западного побережья озера Байкал // Почвоведение. 2022. № 12. С. 1489–1504. [Golubtsov V. A., Vanteeva Yu. V., Voropay N. N., Vasilenko O. V., Cherkashina A. A., Zazovskaya E. P. Stable carbon isotopic composition (δ¹³C) as a proxy of organic matter dynamics in soils on the western shore of lake Baikal // Eur. Soil Sci. 2022. Vol. 55, N 12. P. 1688–1701.]
- Загирова С. В., Михайлов О. А., Елсаков В. В. Обмен диоксида углерода и влаги между ельником и атмосферой в весенне-летний период при разных погодных условиях // Сиб. экол. журн. 2019. Т. 26, № 1. С. 55– 70. [Zagirova S. V., Mikhailov O. A., Elsakov V. V. Carbon dioxide and water exchange between spruce forest and atmosphere in spring-summer under different weather conditions // Contemporary problems of ecology. 2019. Vol. 12, N 1. P. 45–58.]
- Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
- Ковда И. В., Моргун Е. Г., Гонгальский К. Б., Баландин С. А., Ерохина А. И. Изотопный состав углерода компонентов ландшафта и его изменения в различных экологических условиях // Изв. РАН. Сер. биол. 2016. № 2. С. 216–224. [Kovda I. V., Morgun E. G., Gongalskii K. B., Balandin S. A., Erokhina A. I. Carbon isotope composition in landscape components and its changes under different ecological conditions // Biology bulletin. 2016. Vol. 43, N 2. P. 177–184].
- Мамкин В. В., Авилов В. К., Иванов Д. Г., Ольчев А. В., Курбатова Ю. А. Потоки СО₂ на сплошной вырубке в южной тайге европейской территории России // Сиб. экол. журн. 2019. Т. 26, № 5. С. 598-611. [Матkin V. V., Avilov V. K., Ivanov D. G., Olchev A. V., Kurbatova J. A. CO₂ fluxes at the clear-cut in the southern taiga of european Russia // Contemporary problems of ecology. 2019. Vol. 12, N 5. P. 491-501.]
- Меняйло О. В., Макаров М. И., Ченг Ш.-К. Изотопный состав углерода (δ¹³C) и азота (δ¹⁵N) в хвое/листьях и почве в модельных древостоях разных пород // Докл. АН. 2014. Т. 456. С. 738–740.
- Меняйло О. В., Матвиенко А. И., Макаров М. И., Ченг Ш.-К. Положительный отклик минерализации углерода на внесение азота в лесных почвах Сибири // Докл. АН. 2014. Т. 456, № 1. С. 117–120.

- Нагорья Прибайкалья и Забайкалья. М.: Наука, 1974. 359 с.
- Научно-прикладной справочник по климату СССР. Сер. 3. Многолетние данные. Ч. 1-6. Вып. 22. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 605 с.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Семенов В. М., Паутова Н. Е., Лебедева Т. Н., Хромычкина Д. П., Семенова Н. А., Лопес де Гереню В. О. Разложение растительных остатков и формирование активного органического вещества в почве инкубационных экспериментов // Почвоведение. 2019. № 10. С. 1172–1184. [Semenov V. M., Pautova N. B., Lebedeva T. N., Khromychkina D. P., Semenova N. A., Lopes de Gerenyu V. O. Plant residues decomposition and formation of active organic matter in the soil of the incubation experiments // Eur. Soil Sci. 2019. Vol. 52, N 10. P. 1183–1194.]
- Тулина А.С., Семенов В. М. Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению температуры и влажности // Почвоведение. 2015. № 8. С. 952–962. [Tulina A. S., Semenov V. M. Evaluation of the sensivity of the mineralizable pool of soil organic matter to changes in temperature and moisture // Eurasian Soil Science. 2015. Vol. 48, N 8. P. 831–840].
- Холбоева С. А., Намзалов Б. Б. Степи Тункинской котловины (Юго-Западное Прибайкалье). Улан-Удэ: Издво Бурят. ун-та, 2000. 114 с.
- Черкашина А. А., Голубцов В. А. Структура почвенного покрова Тункинской котловины // География и природ. ресурсы. 2016. № 3. С. 130–140.
- Черкашина А. А., Голубцов В. А., Бережная Е. В. Применение методики оценки качества почв для горнокотловинных территорий Прибайкалья // Почвоведение. 2021. № 11. С. 1376–1391. [Cherkashina A. A., Golubtsov V. A., Berezhnaya E. V. Application of methodology for soil quality assessment in intermontane depressions of the Cis-Baikal region // Eur. Soil Sci. 2021. Vol. 54, N 11. P. 1732–1745.]
- Шимараев М. Н., Куимова Л. Н., Синюкович В. Н., Цехановский В. В. О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // Докл. AH. 2002. Т. 383, № 3. С. 397–400. [Shimaraev M. N., Kuimova L. N., Sinyukovich V. N., Tsekhanovskii V. V. Manifestation of global climate change in Lake Baikal during the 20th century // Doklady Earth Sciences. 2002. Vol. 383A. P. 288–291].
- Acton P., Fox J., Campbell E., Rowe H., Wilkinson M. Carbon isotopes for estimating soil decomposition and physical mixing in well-drained forest soils // J. Geophys. Res. Biogeosci. 2013. Vol. 118 (4). P. 1532– 1545.
- Bradford M., Berg B., Maynard D., Wieder W., Wood S. Understanding the dominant controls on litter decomposition // J. Ecol. 2016. Vol. 104. P. 229–238.
- Brunn M., Spielvogel S., Sauer T., Oelmann Y. Temperature and precipitation effects on δ^{13} C depth profiles in SOM under temperate beech forests // Geoderma. 2014. Vol. 235–236. P. 146–153.
- Camino-Serrano M., Tifafi M., Balesdent J., Hatté C., Pecuelas J., Cornu S., Guenet B. Including stable carbon isotopes to evaluate the dynamics of soil carbon in the land-surface model ORCHIDEE // J. Adv. Model. Earth Systems. 2019. Vol. 11. P. 3650-3669.

- Cotrufo M. E., del Galdo I., Piermatteo D. Litter decomposition: concepts, methods and future perspectives / Soil Carbon Dynamics: An Integrated Methodology. Cambridge University Press, 2009. P. 76-90.
- Craine J. M., Fierer N., McLauchlan K. K. Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay // Nat. Geosci. 2010. Vol. 3. P. 854-857.
- Dawson T. E., Mambelli S., Plamboeck A. H., Templer P. H., Tu K. P. Stable isotopes in plant ecology // Annual Rev. of Ecol. and Systemat. 2002. Vol. 33. P. 507–559.
- DeLuca T., Boisvenue C. Boreal forest soil carbon: distribution, function and modelling // Forestry. 2012. Vol. 85, N 2. P. 161–184.
- Diefendorf A. F., Mueller K. E., Wing S. L., Koch P. L., Freeman K. H. Global patterns in leaf¹³C discrimination and implications for studies of past and future climate // PNAS. 2010. Vol. 107. P. 5738-5743.
- Du B., Liu C., Kang H., Zhu P., Yin S., Shen G., Hou J., Ilvesniemi H. Climatic Control on Plant and Soil δ^{13} C along an Altitudinal Transect of Lushan Mountain in Subtropical China: Characteristics and Interpretation of Soil Carbon Dynamics // PLoS ONE. 2014. Vol. 9 (1). e86440.
- Garten C. T., Cooper L. W., Post W. M., Hanson P. J. Climate Controls on Forest Soil C Isotope Ratios in the Southern Appalachian Mountains // Ecology. 2000. Vol. 81 (4). P. 1108-1119.
- Hammer Ø., Harper D. A. T., Ryan P. D. Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // Palaeontologia Electronica. 2001. Vol. 4 (1). 4. http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- IUSS Working Group WRB. World Reference Base for Soil Resources 2014, update 2015. International soil classification system for naming soils and creating legends for soil maps. World Soil Resources Reports. N 106. Rome, 2015. 192 p.
- Lal R. Digging deeper: a holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems // Global Change Biology. 2018. Vol. 24(8). P. 3285– 3301.
- Mackay A. W., Seddon A., Leng M. J., Heumann G., Morley D. W., Piotrowska N., Rioual P., Roberts S., Swann G. Holocene carbon dynamics at the forest-steppe ecotone of southern Siberia // Global Change Biol. 2016. https:// doi.org/10.1111/gcb.13583
- Nel J. A., Craine J. M., Cramer M. D. Correspondence between δ^{13} C and δ^{15} N in soils suggests coordinated fractionation processes for soil C and N // Plant Soil. 2018. Vol. 423. P. 257–271.
- Pries C., Castanha C., Porras R., Torn M. The whole-soil carbon flux in response to warming // Science. 2017. Vol. 355. P. 1420–1423.

- Rao Z., Guo W., Cao J., Shi F., Jiang H., Li C. Relationship between the stable carbon isotopic composition of modern plants and surface soils and climate: A global review // Earth-Sci. Rev. 2017. Vol. 165. P. 110–119.
- Rennenberg H., Dannenmann M., Gessler A., Kreuzwieser J., Simon J., Papen H. Nitrogen balance in forest soils nutritional limitation of plants under climate change stresses // Plant Biol. 2009. Vol. 11. P. 24–33.
- Seibt U., Rajabi A., Griffiths H., Berry J. Carbon isotopes and water use efficiency: sense and sensitivity // Oecologia. 2008. Vol. 155. P. 441–454.
- Wang C., Houlton B., Liu D., Hou J., Cheng W., Bai E. Stable isotopic constraints on global soil organic carbon turnover // Biogeosciences. 2018. Vol. 15. P. 987–995.
- Wang D., He N., Wang Q., Leu Y., Wang Q., Xu Z., Zhu J. Effects of temperature and moisture on soil organic matter decomposition along elevation gradients on the Changbai mountains, Northeast China // Pedosphere. 2016. Vol. 26, N 3. P. 399-407.
- Wang G., Jia Y., Li W. Effects of environmental and biotic factors on carbon isotopic fractionation during decomposition of soil organic matter // Sci. Rep. 2015. Vol. 5, N 11043. P. 1–16.
- Werth M., Kuzyakov Y. ¹³C fractionation at the root-microorganisms-soil interface: a review and outlook for partitioning studies // Soil Biol. Biochem. 2010. Vol. 42 (9). P. 1372–1384.
- Xiong X., Liu J., Zhou G., Deng Q., Zhang H., Chu G., Meng Z., Zhang D. Reduced turnover rate of topsoil organic carbon in old-growth forests: a case study in subtropical China // Forest Ecosystems. 2021. Vol. 8. P. 58.
- Xu M., Wang G., Li X., Cai X., Li X., Christie P., Zhang J. The key factor limiting plant growth in cold and humid alpine areas also plays a dominant role in plant carbon isotope discrimination // Front. Plant Sci. 2015. Vol. 6. P. 961.
- Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G. Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // J. Plant Ecol. 2008. Vol. 1 (2). P. 85–93.
- Zhang D., Yang Y., Ran M. Variations of surface soil δ^{13} C_{org} in the different climatic regions of China and paleoclimatic implication // Quaternary International. 2020. Vol. 536. P. 92–102.
- Zhao F., Wu Y., Hui J., Sivakumar B., Meng X., Liu S. Projected soil organic carbon loss in response to climate warming and soil water content in a loess watershed // Carbon Balance and Management. 2021. 16:24. https:// doi.org/10.1186/s13021-021-00187-2
- Zhao X., Xu X., Wang F., Greenberg I., Liu M., Che R., Zhang L., Cui X. Climatic, edaphic and biotic controls over soil δ^{13} C and δ^{15} N in temperate grasslands // Forests. 2020. Vol. 11. P. 433.

Variations of stable carbon isotopic composition of soil organic matter in mountain-depression environments of Fore-Baikal region

V. A. GOLUBTSOV^{1*}, A. A. CHERKASHINA¹, Yu. V. VANTEEVA¹, N. N. VOROPAY^{1, 2}, S. M. TURCHINSKAYA³

¹V.B. Sochava Institute of Geography SB RAS 664033, Irkutsk, Ulan-Batorskaya str., 1

²Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems SB RAS 634055, Tomsk, Akademichesky av., 10/3

> ³Institute of Geography RAS 119017, Moscow, Staromonetny per., 29 *E-mail: tea 88@inbox.ru

An analysis of depth-profile and spatial variations of the stable carbon isotopic composition of soil organic matter is presented to identify the main factors that determine the dynamics of organic carbon in the mountain-depression environments of the Baikal region. Soil organic matter is characterized by δ^{13} C values from -29,6 to -24,9 ‰. Changes in δ^{13} C values in the altitudinal profile correlate well with changes in landscapes and reflect the influence of climatic factors on¹³C discrimination during photosynthesis of C3 plants. The heaviest stable carbon isotopic composition characterizes the soils of subalpine and steppe landscapes. In taiga soils, depletion of the isotopic composition by¹³C is observed. To compare the soil carbon turnover intensity δ^{13} C values were regressed linearly against log-transformed carbon contents yielding absolute values of these slopes (β). The distribution of β values in the altitudinal profile suggests a reduced intensity of carbon turnover in the soils of the steppes and the subalpine belt due to the limitation of these soils in terms of moisture and temperature, respectively. Under the taiga conditions characterized by more favorable ratio of temperatures and humidity the dynamics of soil organic matter is controlled mainly by the litter quality and the nitrogen availability.

Key words: soil ecology, δ^{13} C, carbon turnover, south-western Casbaikalia.