

ГЕНЕЗИС
И ГЕОГРАФИЯ ПОЧВ

УДК 551.89+631.4(571.5)

СОСТАВ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА ($\delta^{13}\text{C}$)
КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ДИНАМИКИ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА
В ПОЧВАХ ЗАПАДНОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ОЗЕРА БАЙКАЛ¹

© 2022 г. В. А. Голубцов^{a, *}, Ю. В. Вантеева^a, Н. Н. Воропай^{a, b}, О. В. Василенко^a,
А. А. Черкашина^a, Э. П. Зазовская^c

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

^bИнститут мониторинга климатических и экологических систем СО РАН,
Академический пр-т, 10/3, Томск, 634055 Россия

^cИнститут географии РАН, Старомонетный пер., 29, Москва, 119017 Россия

*e-mail: tea_88@inbox.ru

Поступила в редакцию 19.04.2022 г.

После доработки 27.06.2022 г.

Принята к публикации 29.06.2022 г.

Оценка основных факторов, определяющих динамику углерода в почвах, является актуальной проблемой в контексте современных климатических изменений. Один из подходов к оценке этой динамики – анализ состава стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$). Исследования проведены в ландшафтах юго-восточного макросклона Приморского хребта и его предгорий, характеризующихся контрастными физико-географическими условиями. Проанализированы климатические параметры, внутрипочвенные и пространственные вариации состава стабильных изотопов углерода, а также физико-химические свойства почв, определяющие его динамику. Наибольшими значениями $\delta^{13}\text{C}$ (-24.72 и $-23.97\dots-24.75\%$) характеризуются гумусовые горизонты почв, формирующихся в условиях гольцовых и степных ландшафтов, наименьшими ($-25.61\dots-27.18\%$) – почвы горной тайги. На основе расчета линейной зависимости значений $\delta^{13}\text{C}$ от содержания общего углерода в почве, изменяющихся с глубиной, определена интенсивность оборота углерода через наклон линейной регрессии. Выявлено, что в контрастных условиях гольцовых и степных ландшафтов климат (дефицит тепла и влаги) оказывает значительное влияние на интенсивность трансформации органического вещества, перекрывая действие внутрипочвенных факторов. В более благоприятных климатических условиях горно-таежных ландшафтов динамика органического вещества в почвах контролируется преимущественно внутрипочвенными факторами.

Ключевые слова: круговорот углерода, Приморский хребет, Приольхонское плато

DOI: 10.31857/S0032180X22600597

ВВЕДЕНИЕ

Исследования динамики почвенного органического вещества (ПОВ) являются одной из важнейших составляющих в оценке влияния климатических изменений на процессы почвообразования, циклы элементов питания и углеродный баланс в ландшафтах [23, 51, 54]. Однако оценка соотношения между поступлением органических остатков и их последующей трансформацией в различных ландшафтно-климатических условиях до сих пор остается одним из наиболее дискуссионных вопросов [10, 38, 47, 51]. Это связано с самой природой ПОВ, представляющего гетероген-

ную смесь остатков растительной и микробной биомассы разной степени деструкции и разложения, продуктов распада и синтеза, частично или полностью стабилизированных, гумусовых веществ [3, 23, 47, 54]. Устойчивость ПОВ зависит от комплекса взаимодействий между широким кругом абиотических, биотических и физико-химических факторов, которые контролируют скорость его разложения и стабилизации [3, 23, 38, 59]. Существенно усложняет эту картину высокая пространственная вариабельность ландшафтно-климатических условий [38, 60].

Одним из важных методологических подходов к исследованию пространственно-временной вариабельности ПОВ является анализ состава стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) [41, 55]. Вели-

¹ Дополнительные материалы к этой статье доступны по doi 10.31857/S0032180X22600597 для авторизованных пользователей.

чина $\delta^{13}\text{C}$ часто рассматривается в качестве интегрального показателя процессов трансформации органического вещества [39] и, таким образом, имеет значительный потенциал для оценки динамики почвенного углерода [35, 50].

Так как большая часть органического вещества поступает в почву с растительными остатками, то значение $\delta^{13}\text{C}$ ПОВ отражает состав стабильных изотопов углерода растительных тканей и результаты последующего фракционирования изотопов в ходе их трансформации [35, 40, 50, 57]. Широко известно явление обогащения ПОВ ^{13}C с глубиной, совпадающее с уменьшением количества общего углерода в автоморфных почвах разных климатических зон [12, 31, 55]. При этом выраженность изменений величин $\delta^{13}\text{C}$ обусловлена фракционированием изотопов углерода, а зависимость между обогащением ПОВ ^{13}C и интенсивностью оборота углерода подтверждена измерениями минерализации ПОВ [42], моделированием массового баланса изотопов углерода и метаанализом [31]. Установлена линейная зависимость увеличения значений $\delta^{13}\text{C}$ от снижения содержания органического углерода (в логарифмическом масштабе) с глубиной, а наклон линейной регрессии (β) предложен в качестве индикатора скорости оборота углерода в почвах [31, 42].

Выраженность наклона вышеописанной линейной регрессии в значительной степени зависит от ландшафтно-климатических условий [36, 42, 55] и часто демонстрирует высокую пространственную вариабельность, в связи с чем важно понимание регионального отклика почв.

Находящийся на юге Восточной Сибири Байкальский регион является одним из наиболее подверженных глобальному потеплению мест планеты [49]. За последнее столетие средняя годовая температура воздуха здесь возросла на 1.2°C , что вдвое больше, чем ее прирост в общемировом масштабе [30]. Подобные климатические изменения не могут не отразиться на изменении баланса углерода в региональных ландшафтах [49].

Цель работы – оценка основных факторов, определяющих динамику углерода в почвах, формирующихся при различных сочетаниях факторов почвообразования. Одной из наиболее подходящих для реализации данной цели территорий является центральная часть Западного Прибайкалья, горный рельеф которой обуславливает вариативность климата и растительности на близких расстояниях и, как следствие, контрастные условия почвообразования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Исследуемая территория расположена в зоне сочленения Приморского хребта с Приольхон-

ским плато (рис. 1). Рельеф среднегорно-низкогорный, отличается глубокой расчлененностью. Ландшафтная структура территории формируется в соответствии с высотно-поясными закономерностями, но под воздействием климатических и орографических факторов (барьерный, подгорный и котловинный эффекты) приобретает специфические черты и отличается значительным разнообразием. Здесь представлены гольцовые и подгольцовые кустарниковые; темнохвойные и светлохвойные горно-таежные, подтаежные, горные и подгорные сухостепные геосистемы [5, 19]. Важнейшим следствием взаимодействия барьерного влияния Приморского хребта и ландшафтной ярусности считается формирование таежно-степного ландшафтного экотона: сочетание типичных геосистем подтаежных светлохвойных лесов с литоэдафическими вариантами степей экстразонального облика [19].

Средняя многолетняя температура воздуха в январе -17.3°C , в июле $+14.4^\circ\text{C}$. Большая часть территории характеризуется низким атмосферным увлажнением. Годовое количество атмосферных осадков на Приольхонском плато варьирует в пределах 190–260 мм, что является абсолютным минимумом для Прибайкалья. Около двух третей этой суммы выпадает в летний период. В горной части количество осадков увеличивается до 400–500 мм. Суммарный приход солнечной радиации высокий и составляет 4400–4600 мДж/м². Сумма активных температур ($>10^\circ\text{C}$) уменьшается при удалении от берега Байкала с 1400–1600 до 1000–1200 $^\circ\text{C}$ в гольцовом поясе [19].

Водная масса оз. Байкал также оказывает влияние на формирование мезоклиматических условий территории. Выделяется 3 зоны влияния оз. Байкал [7]. Зона сильного климатического влияния: прибрежная полоса шириной до 2 км (иногда до 5–10 км) и высотой 200–300 м над уровнем озера с максимальной засушливостью, сглаженным ходом температуры воздуха. Зона умеренного влияния охватывает центральную часть Приольхонского плато с речными долинами и отличается более высокими температурами воздуха в летний период. Зона слабого влияния оз. Байкал охватывает юго-восточный склон Приморского хребта в пределах абсолютных отметок 800–1000 м, характеризуется повышенным атмосферным увлажнением и пониженной теплообеспеченностью вследствие влияния высоты.

Охлаждающее влияние водной массы на температуру воздуха по вертикали распространяется до 0.5 км от уровня озера в период с апреля по июль, когда температура воды ниже температуры окружающей суши, а обогревающее воздействие – в период с октября по декабрь до высоты 1–2 км над уровнем озера [7].

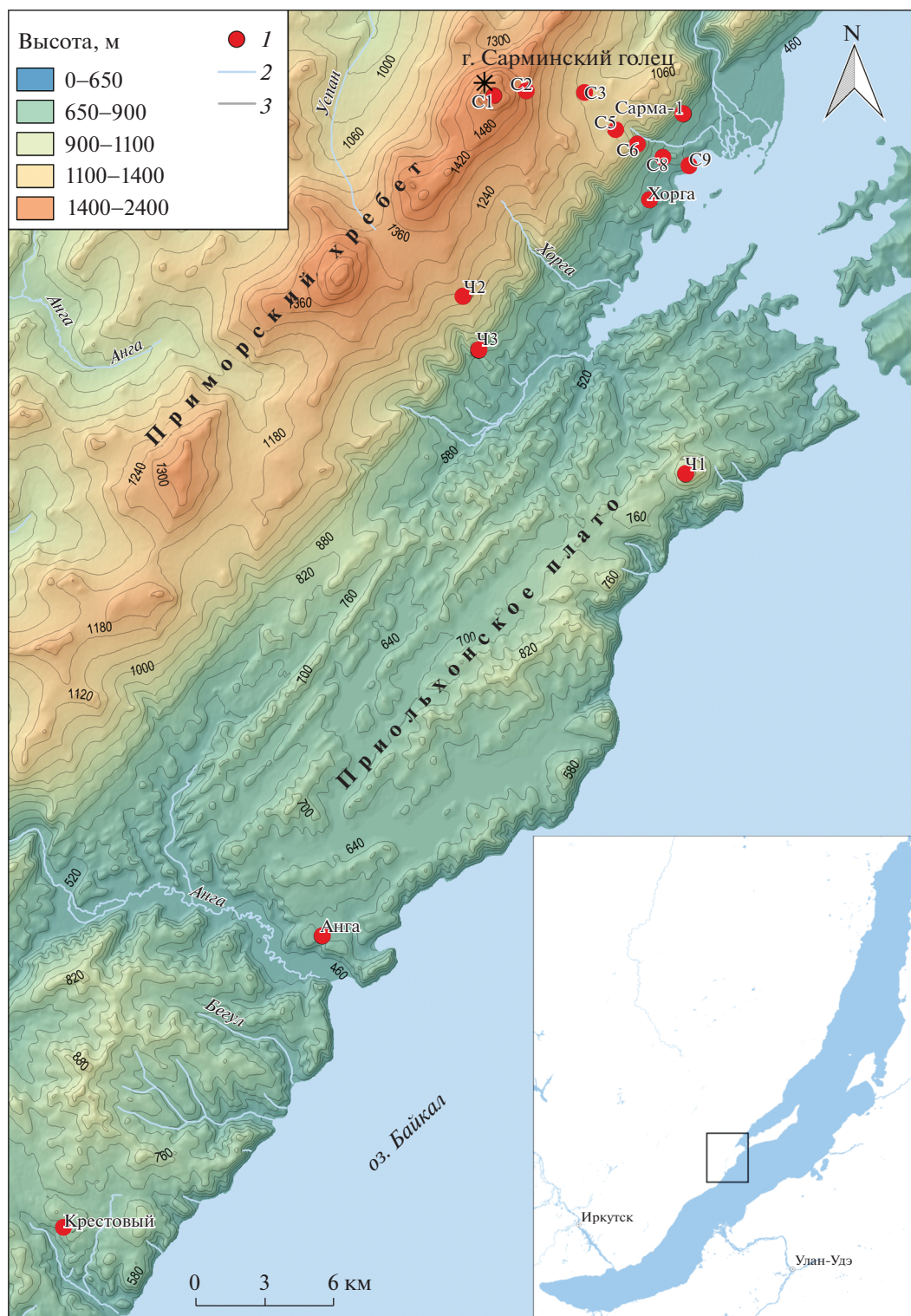


Рис. 1. Положение исследуемой территории: 1 – исследуемые площадки; 2 – гидросеть; 3 – горизонтали. Подложка – цифровая модель рельефа SRTM (разрешение – 30 м).

Экстремальный гидротермический режим определяет относительно низкую интенсивность почвенно-геохимических процессов, что проявляется, в частности, в слабой дифференциации про-

филя почв [19]. Сказанное справедливо, в первую очередь, для почв прибрежных ландшафтов и предгорий Приморского хребта, формирующихся в условиях засушливого климата и испытывающих

глубокое промерзание в зимний период, что определяет преимущественно криоаридный тип почвообразования в Приольхонье. В среднегорных и низкогорных таежных лесах с увеличением количества осадков, поступающего растительного опада происходит смена ведущих почвообразовательных процессов, проявляется дифференциация профилей почв по ряду подвижных компонентов. Это находит отражение в широком распространении здесь почв альфегумусового отдела, а также органо-аккумулятивных почв с признаками иллювиальной дифференциации по гумусу и железу [19].

Для выявления особенностей изотопного состава углерода компонентов ландшафтов на юго-восточном макросклоне Приморского хребта и в его предгорьях с учетом максимального охвата физико-географических условий заложены ландшафтные профили. Сарминский профиль (8 площадок), протяженностью около 10 км, заложен от берегов Хужир-Нугайского залива (471 м) до Сарминского гольца (1652 м). Профиль Черноруд (3 площадки) заложен от возвышенных прибрежных частей Приольхонского плато (915 м) до склонов Приморского хребта (1160 м). Для повышения участия доли степных ландшафтов в общей выборке на Приольхонском плато заложены дополнительные площадки (Крестовый, Анга и Сарма-1).

На каждой площадке фиксировали характеристики фитоценозов, литолого-геоморфологические условия, проводили морфогенетический анализ почв (табл. S1). Для оценки влияния климатических факторов на ландшафтные характеристики на территории исследования с 2013 г. организованы микроклиматические наблюдения [34]. С помощью автоматических регистраторов Elitech RC-51H и RC-4HC оценивали температуру и относительную влажность воздуха на высоте 2 м от поверхности и температуру поверхности почвы. Точность измерения температуры 0.1°C, относительной влажности – 3%. Измерения проводили с периодичностью 1 ч. С помощью методов описательной статистики на каждой площадке для температуры и влажности воздуха, температуры почв рассчитывали средние годовые и средние за вегетационный период (май–сентябрь), определяли даты устойчивого перехода температуры воздуха и почвы на поверхности через 0 и 10°C в начале и конце теплого сезона, определяли продолжительность этих периодов, рассчитывали суммы температур за периоды с температурой выше заданных пределов.

Полевые работы проводили в июле. На основе анализа описаний видового состава растительности отбирали надземные части (свежие зрелые листья) доминирующих видов, составляющих 80% биомассы на каждой площадке. Раститель-

ный опад на поверхности почвы отбирали на каждой площадке в пяти местах (четыре угла и центральная точка). Образцы листьев, подстилки и почв высушивали до воздушно-сухого состояния. Листья дополнительно просушивали при 70°C в течение 60 ч и затем растирали. Образцы минеральных горизонтов почв просеивали через сито диаметром 1 мм с последующим удалением корней. Значения рН почвенных суспензий определяли потенциометрически при соотношении почва : вода 1 : 5 для минеральных горизонтов и 1 : 25 для органических. Определение содержания органического углерода и его изотопного состава ($\delta^{13}\text{C}$), а также общего азота в листьях, опаде и почвах выполняли методом сухого сжигания на анализаторе Vario Isotope (Elementar, Германия), соединенного с масс-спектрометром Isoprime precisION IRMS (Elementar, UK). Измерения проводили в ЦКП “Лаборатория радиоуглеродного датирования и электронной микроскопии” Института географии РАН. Полученные результаты выражали в ‰ по отношению к стандарту VPDB. Точность измерений 0.1‰.

Статистические расчеты выполняли в программах MO Excel и PAST 4.03 [45]. В качестве дополнительных параметров помимо перечисленных ранее микроклиматических показателей рассматривали величины рН и C/N гумусовых горизонтов, абсолютную высоту местности (м). Проведенная проверка выборок всех анализируемых параметров на соответствие нормальному распределению по критериям Шапиро–Уилка и Андерсона–Дарлинга дала положительный результат. Это позволило использовать параметрические методы для обработки данных – парный и множественный регрессионный анализ. Для оценки интенсивности оборота углерода (β) в исследуемых почвах рассчитывали линейные зависимости $\delta^{13}\text{C}$ от изменений содержания органического углерода с глубиной (рис. S1).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Климатическая дифференциация исследуемой территории. В направлении от побережья оз. Байкал к верхней части ландшафтного профиля средние температуры как за год, так и за вегетационный период снижаются (рис. 2а). Средняя годовая температура поверхности почвы выше температуры воздуха на всех площадках. В течение вегетационного периода температуры поверхности почвы в таежных (С2, С3, С5, Ч2) и подтаежных (С6, Ч1, Ч3) лесах становятся ниже температур воздуха, что связано с влиянием сомкнутого растительного покрова. При наличии древесного яруса и плотного травянистого покрова в начале лета и в первые осенние дни почвы на этих площадках защищены от заморозков и утреннего выхолаживания, однако и прогрев поверхности поч-

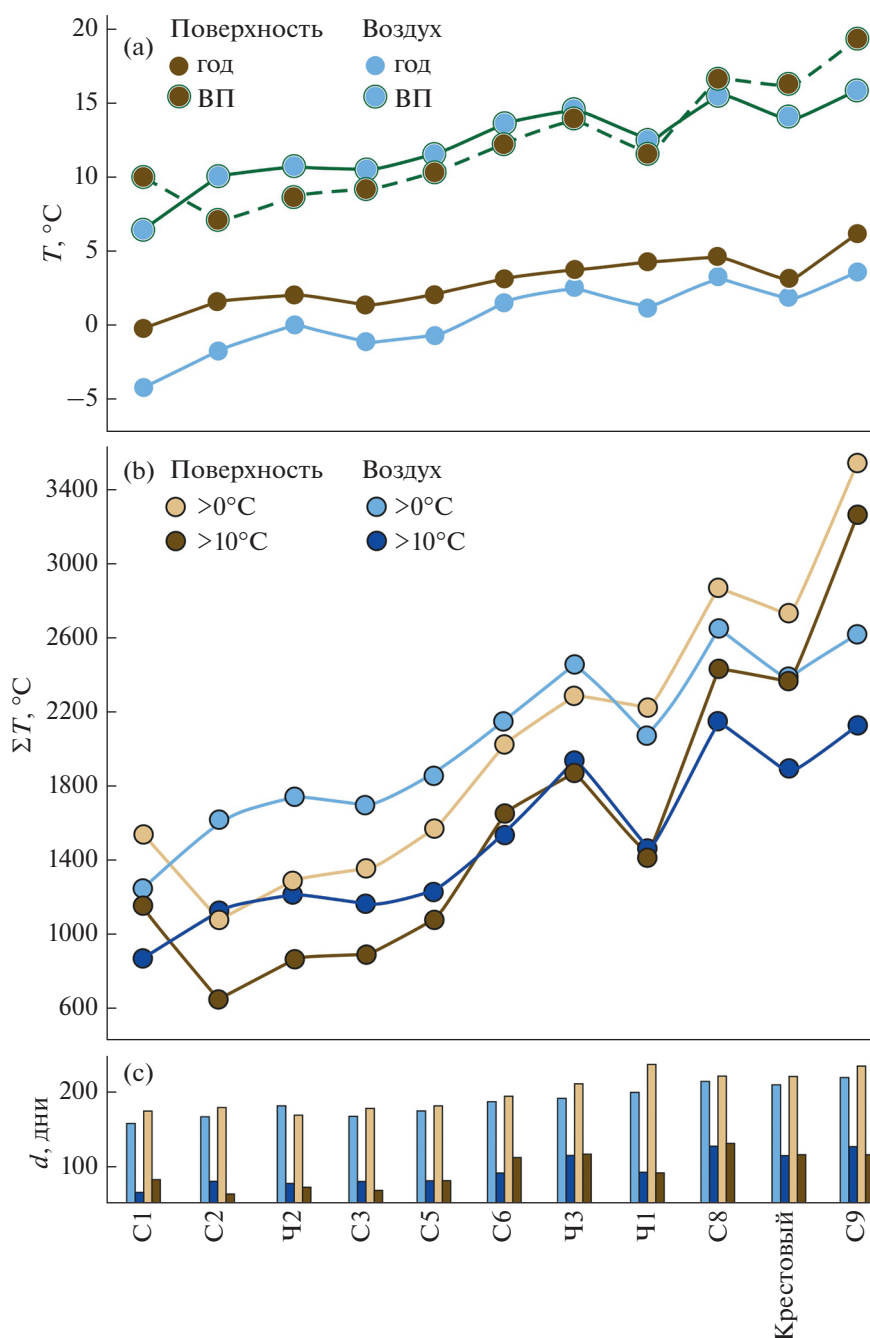


Рис. 2. Дифференциация исследуемых площадок по температурным условиям воздуха и поверхности почвы: а – средние годовые температуры воздуха и средние температуры за вегетационный период; б – суммы температур >0 и 10°C; в – длительность периодов с положительными температурами.

вы в дневные часы на этих площадках меньше, чем на открытых. В связи с чем суммы положительных температур поверхности почвы наибольшие на открытых площадках в верхней части ландшафтного профиля – гольцовых горно-тундровых ландшафтах (С1), в подгорной части на площадках с редкостойными лесами (С8, Ч1, Ч3) и в степных ландшафтах (Крестовый и С9). Распределение сумм температур >10°C демонстрирует сходные закономерности (рис. 2б).

Более низкие показатели температур воздуха среди подтаежных и степных ландшафтов характерны для площадок С6, Ч1 и Крестовый. Такие различия связаны с локальными особенностями местоположения и свойствами подстилающей поверхности. Для осиново-лиственничного леса (С6), расположенного в верхней части юго-восточного склона уступа-эскарпа Приморского хребта, и лиственничного леса на северо-западном склоне холма (Ч1) определяющим фактором в формиро-

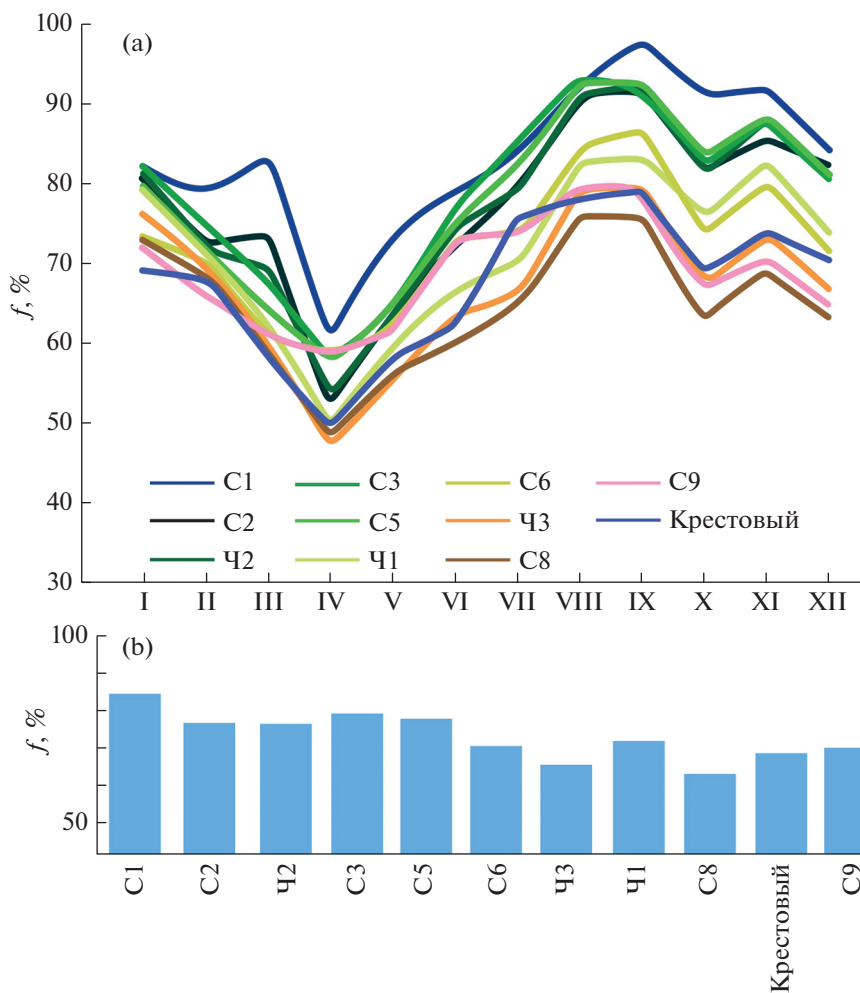


Рис. 3. Годовой ход влажности воздуха исследуемых площадок (а) и средние годовые значения влажности воздуха (б).

вании микроклимата в первую очередь является абсолютная высота местности (810 и 915 м соответственно). Однако юго-восточная экспозиция склона на С6 обеспечивает лучший прогрев воздуха в течение всего года и почвы в вегетационный период. Для площадки Крестовый более низкие температурные показатели обусловлены особенностями циркуляции воздушных масс в речных долинах, попадающих в зону влияния оз. Байкал. Долина р. Крестовой расположена практически перпендикулярно береговой линии, что благоприятствует проникновению холодного воздуха с озера летом преимущественно с ветрами южных румбов. Ранее на такой эффект указывали [6]. По мере продвижения вверх от уреза воды наблюдается уменьшение длительности периодов с температурами >0 и 10°C (рис. 2с).

Оценка влагообеспеченности территории основывается на данных об относительной влажности воздуха. Минимальные ее значения на всех площадках фиксируются в апреле (рис. 3а). Максимальная влажность наблюдается в августе—

сентябре. Наиболее контрастен этот переход в гольцах (С1) и горной тайге (С2, Ч2, С3, С5), наиболее сглаженный годовой ход влажности отмечается в точке С9. Наибольшей средней годовой влажностью воздуха характеризуются гольцовые ландшафты (С1), несколько меньшее увлажнение отмечено в горно-таежных (С3, С5, С2 и Ч2) (рис. 3б). Минимальной влажностью характеризуются подтайга и степи, за исключением площадки Ч1, что связано с ее расположением на северо-западном склоне. Также отмечается несколько повышенное увлажнение на С9 за счет влияния оз. Байкал и на площадке Крестовый из-за особенностей долинной циркуляции в зоне влияния Байкала [6].

Вариации физико-химических свойств почв. рН. Отмечается снижение кислотности почв и опад с уменьшением абсолютной высоты местности. Наиболее кислой реакцией среды (рН 3.9) характеризуются гумусовые горизонты почв гольцового и подгольцового поясов (С1 и С2) (рис. 4). Гумусовые и органогенные горизонты почв гор-

ной тайги характеризуются большими значениями рН, варьирующими от 4.1 (Ч2) до 4.9 (С3). Гумусовые горизонты подтаежных почв предгорий Приморского хребта и Приольхонского плато (С6, С8, Ч1, Ч3, Хорга) характеризуются близкими к нейтральным рН. Для степных почв (С9, Анга, Крестовый) отмечаются слабощелочные рН.

Во всех исследуемых почвах кислотность вниз по почвенному профилю снижается. Однако при анализе опада отмечаются отклонения от данной закономерности. Так, кислотность опада на площадках С2, С3 и Ч2 возрастает от горизонтов ОL к горизонтам ОН, в то время как на более низких гипсометрических отметках (С5, С6, Ч1, Ч3) наблюдается обратная тенденция.

Общий органический углерод, общий азот, С/N. Отмечается в различной степени выраженное внутрипрофильное уменьшение содержания органического углерода (табл. S1). Наиболее резкий градиент наблюдается при переходе от органогенных к минеральным горизонтам. Повышенное содержание органического углерода наблюдается в погребенных гумусовых горизонтах (С3, С8, Ч1). Как правило, внутрипрофильное уменьшение содержания углерода в минеральных горизонтах почв верхней части ландшафтного профиля более плавное в силу подвижности органического вещества и его иллювирувания в нижележащие горизонты. Отмечается тенденция к уменьшению содержания органического углерода от верхних к нижним гипсометрическим уровням, несколько более выраженная в поверхностных минеральных, нежели органогенных горизонтах (рис. 4).

Азот распределяется несколько иначе. Как правило, опад (OL) характеризуется пониженным содержанием N по сравнению с подстилками (OF, ОН). В минеральных горизонтах содержание общего азота постепенно снижается вниз по почвенному профилю. На ландшафтном профиле варьирование содержания азота в поверхностных органогенных и гумусовых горизонтах не обнаруживает выраженных закономерностей, часто существенно изменяясь от разреза к разрезу.

Вариации отношения С/N в гумусовых и органогенных горизонтах обнаруживают тенденцию к уменьшению вниз по ландшафтному профилю. Наиболее значительные колебания отмечаются для почв средней его части, менее выраженные характерны для почв предгорий Приморского хребта (Ч3–С9). В отдельно взятых почвенных профилях С/N наиболее широкое, как правило, в свежем опаде. Вновь расширение соотношения происходит в кровле минеральной толщи, в гумусовых горизонтах. В остальной части профиля значения С/N уменьшаются.

Состав стабильных изотопов углерода. Диапазон значений $\delta^{13}\text{C}$ в листьях и хвое высших сосудистых растений составил $-25.5\text{...}-32.5\text{‰}$, для

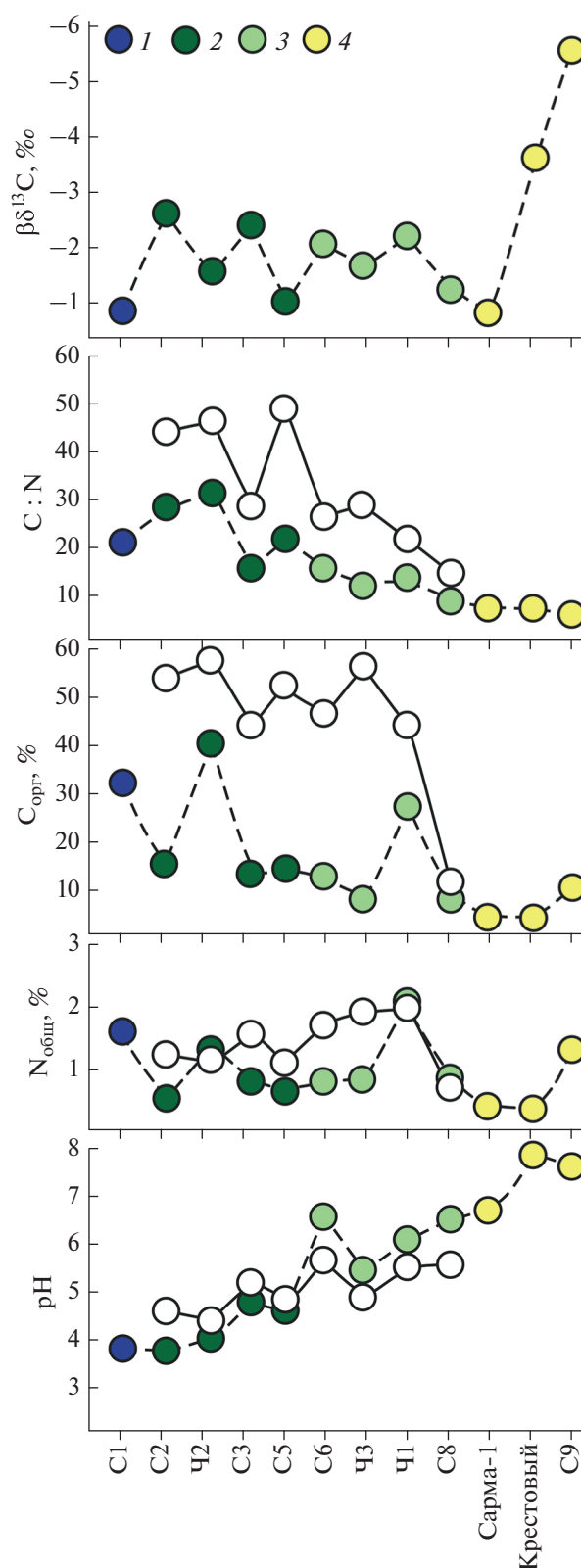


Рис. 4. Некоторые химические свойства почв исследуемых площадок и коэффициенты наклона линейной регрессии (β). Ландшафты: 1 – гольцовые; 2 – таежные; 3 – подтаежные; 4 – степные. Закрашенные круги показывают значения для гумусовых горизонтов, белые круги – для опада.

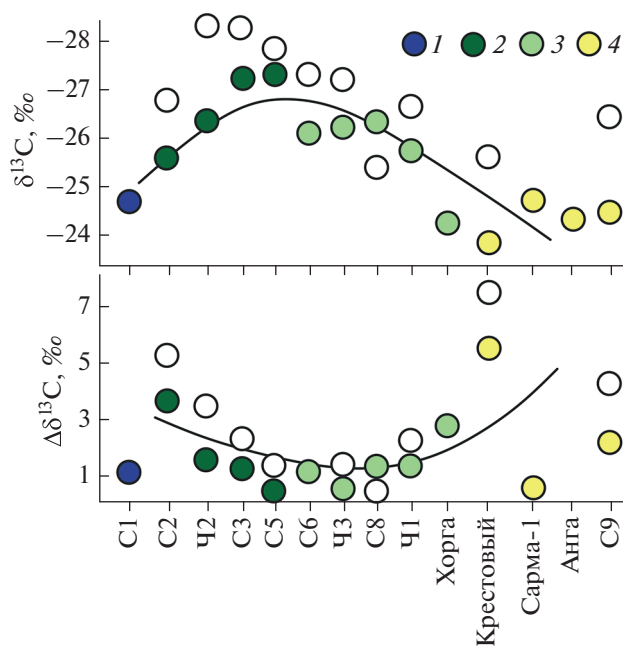


Рис. 5. Вариации изотопного состава углерода в исследуемых почвах. Ландшафты: 1 – гольцовые; 2 – таежные; 3 – подтаежные; 4 – степные. Закрашенные круги показывают значения для верхних гумусовых горизонтов, белые круги – для опада.

лишайников $-23.03...-24.6\%$. Значения $\delta^{13}\text{C}$ опада по сравнению с доминирующей растительностью утяжеляются на $0.1-2.8\%$, минимальная разница значений наблюдается в остепненном листовенничнике (С8), максимальная – в горно-таежном поясе (С2, С3). Величина $\delta^{13}\text{C}$ органического вещества опада варьирует от -25.4 до -28.3% . При переходе от подстилки к гумусовому горизонту во всех почвах горной тайги наблюдается утяжеление изотопного состава углерода на $0.75-1.8\%$, с максимальными значениями в точках С2 и С6.

Значения $\delta^{13}\text{C}$ органического вещества гумусовых горизонтов почв варьируют от -24 до -27.2% . Наибольшими значениями $\delta^{13}\text{C}$ характеризуются почвы, формирующиеся в условиях гольцовых и степных ландшафтов (рис. 5). В центральной части профиля, занятой горно-таежными ландшафтами, наблюдается максимальное облегчение изотопного состава углерода. Вне зависимости от условий и характера почвообразования для почв характерен рост значений $\delta^{13}\text{C}$ с глубиной.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

$\delta^{13}\text{C}$ растительности. Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ органического вещества гумусовых горизонтов почв говорят о поступлении биомассы растений преимущественно с С3-типом фотосинтеза, что в целом согласуется с климатическими условиями территории исследования [13]. Однако

фрагменты степей на Приольхонском плато относятся к монголо-китайскому флорогенетическому типу [4], и по данным [17, 26], в составе таких сообществ встречаются некоторые виды с САМ-фотосинтезом (*Aizopsis aizoon* (L.) Grulich, *Orostachys malacophylla* (Pall.) Fisch., *O. Spinose* (L.) C.A. Mey, [52]) и С4-типом (*Atriplex sibirica* L., *Kochia prostrata* (L.) Schrad., *Spodiopogon sibiricus* Trin., *Cleistogenes kitagawae* Honda, *C. squarrosa* (Trin.) Keng [2]). При анализе геоботанических описаний на площадке С8 выявлен *Orostachys spinose*, представленный единично, а на площадке Крестовый *Kochia prostrata* с проективным покрытием 1%. Тем не менее чернозем, сформированный на площадке Крестовый, характеризуется наибольшими значениями $\delta^{13}\text{C}$ (-23.97%) по сравнению со всеми остальными почвами.

Сравнение значений $\delta^{13}\text{C}$ разных жизненных форм растений (рис. 6а) показало наибольший их разброс у деревьев. У кустарников и кустарничков разброс значений меньше, но первые в среднем тяжелее по изотопному составу углерода. Различия в значениях $\delta^{13}\text{C}$ травянистых растений составили 1.1% . С самыми высокими показателями $\delta^{13}\text{C}$ в отдельную группу выделились лишайники, доминировавшие в напочвенном покрове горной тундры (С1).

Увеличение $\delta^{13}\text{C}$ в лишайниках по сравнению с сосудистыми растениями исследуемой территории связано с особенностями фракционирования углерода в данной группе организмов. Величины $\delta^{13}\text{C}$ в органическом веществе лишайников во многом определяются особенностями фотосинтеза фотобионта-водоросли [8, 46]. В оптимальных для лишайника условиях наблюдается дискриминация ^{13}C , при их ухудшении происходит обогащение этим изотопом как за счет угнетения фотосинтеза, так и за счет усиления дыхания [9]. Имеются данные о наличии отрицательной корреляции между величиной $\delta^{13}\text{C}$ лишайников и относительной влажностью воздуха, а также положительной корреляции с количеством осадков. Увеличение среднегодового количества осадков на 260 мм приводит к росту $\delta^{13}\text{C}$ на 1% , что связано с ухудшением диффузии CO_2 в насыщенных водой слоевищах [8].

Исследованные *Flavocetraria nivalis* (L.) Kärnefelt et A. Thell и *Cladonia rangiferina* (L.) F.H. Wigg. относятся к группе двухбионтных хлоролишайников [28], величина $\delta^{13}\text{C}$ у которых значительно варьирует (от -35 до -17%) [9]. Полученные значения $\delta^{13}\text{C}$ ($-23.03...-24.587\%$) свидетельствуют о неблагоприятных условиях для произрастания лишайников в условиях горной тундры и согласуются с данными, полученными для *Flavocetraria nivalis* в тундре на Западном Ямале ($-24.3...-24.4\%$) [18]. Дополнительно проанализированы различия в

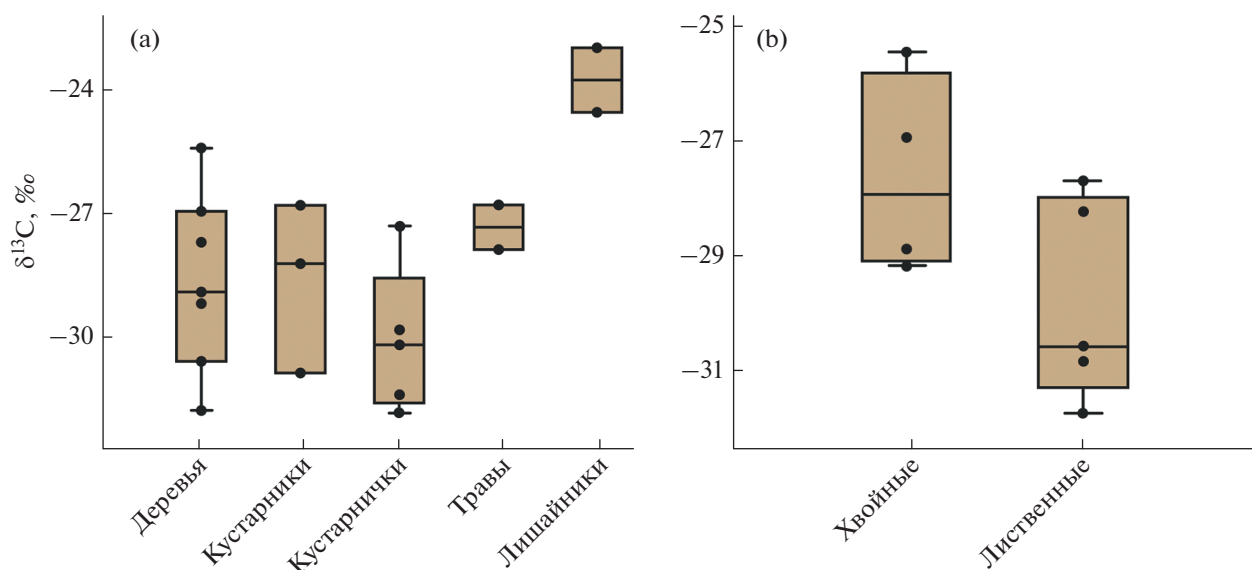


Рис. 6. Диапазоны значений $\delta^{13}\text{C}$ в разных жизненных формах высших сосудистых растений и лишайниках (а). Диапазоны значений $\delta^{13}\text{C}$ для хвойных и лиственных пород (б). Точками показаны фактические значения, черта внутри ящика – среднее, края ящика – квантили.

составе стабильных изотопов углерода хвойных и лиственных пород деревьев и крупных кустарников (рис. 6b). Для хвойных в среднем характерны большие значения $\delta^{13}\text{C}$, чем для лиственных пород, что согласуется с литературными данными. Например, для *Pinus sylvestris* приводятся средние значения $\delta^{13}\text{C}$ $-27.46 \pm 1.13\text{‰}$, *Larix sibirica* $-28 \pm 1.51\text{‰}$, *Populus tremula* $-29.21\text{‰} \dots -32.58\text{‰}$, *Betula pendula* $-29.96\text{‰} \dots -30.55\text{‰}$ [16, 20, 39]. Подобные различия связаны с большей эффективностью использования воды у хвойных пород по сравнению с лиственными. В сложных сообществах горной тайги (С2–С5) наблюдается облегчение изотопного состава углерода с изменением яруса: от хвойных в первом ярусе до кустарничков. В данном случае проявляется эффект лесного полога, связанный с изменениями в процессах фотосинтеза в условиях затенения [27].

$\delta^{13}\text{C}$ опада. Несмотря на тенденцию к утяжелению изотопного состава углерода опада и подстилки с глубиной, в ряде точек (С2, С8, Ч1, Ч3) наблюдаются отклонения от данной закономерности, которые проявляются в утяжелении верхних горизонтов опада по сравнению с подстилкой. Подобные отклонения могут быть объяснены с позиции селективного сохранения трудноминерализуемых компонентов растительных тканей в ходе разложения опада [59]. Одним из наиболее устойчивых компонентов является лигнин, который характеризуется наименьшими значениями $\delta^{13}\text{C}$ по сравнению с $\delta^{13}\text{C}$ общей растительной ткани, целлюлозы, крахмала и сахаров [35]. Остаточное

накопление лигнина может приводить к обеднению ^{13}C нижних горизонтов подстилки. Данная трактовка хорошо согласуется с тем, что описываемое явление наблюдается в точках с преимущественно хвойным опадом, наиболее обогащенным лигнином, по сравнению с мелколиственным и травянистым [3]. Однако данная закономерность не универсальна и проявляется лишь на границах леса в экотонах. Точка С2 находится у верхней границы леса, Ч3, С8, Ч1 в остепненных подтаежных светлохвойных ландшафтах.

Несмотря на сравнительно малую длительность формирования, подстилки являются полигенетичными образованиями, чувствительными к локальной пространственной изменчивости факторов почвообразования [25]. Нарушение экологического равновесия между подстилкой и другими компонентами ландшафтов в результате периодического расширения и сокращения ареала таежных лесов могло стать одним из факторов, вызвавших наблюдаемые различия в изотопном составе углерода верхней части органопрфиля почв.

Очевидно, в рассматриваемых точках такая динамика должна была проявиться наиболее ярко. Так, верхняя граница леса на исследуемой территории варьирует в пределах 1300–1450 м на фоне климатических изменений [11, 19]. Анализ космоснимков за 1985–2019 гг. свидетельствует о вертикальных смещениях границы леса в пределах 10–13 м в районе точки С2 (1420 м). Дополнительное влияние на динамику ландшафтов здесь оказывают криогенно-склоновые процессы [1], а также пирогенный фактор [5].

Таблица 1. Результаты парной корреляции, коэффициенты Пирсона

Фактор	$\delta^{13}\text{C}$			β -коэффициент		
	r	r^2	p	r	r^2	p
pH	0.80	0.64	0.001	-0.54	0.29	0.07
$T_{\text{п}} \text{ Ср г}$	0.48	0.23	0.16	-0.59	0.35	0.05
$T_{\text{пВП}}$	0.64	0.41	0.05	-0.58	0.34	0.06
$\Sigma T_{\text{п}} > 0^\circ\text{C}$	0.64	0.40	0.05	-0.61	0.38	0.04
$\Sigma T_{\text{п}} > 10^\circ\text{C}$	0.66	0.43	0.04	-0.64	0.41	0.03

Примечание. Значения pH и $\delta^{13}\text{C}$ для гумусовых горизонтов, $T_{\text{п}}$ – температура поверхности почвы, Ср г – среднегодовая, ВП – вегетационный период.

Почвы в подгорной части Приморского хребта (С8, Ч1, Ч3) формировались в условиях смен таежных и степных ландшафтов, обусловленных динамикой климатических условий [19]. Анализ отложений торфяников в различных ландшафтных зонах Приольхонья [15] указывает на выраженный отклик таежных и степных геосистем Приольхонья на климатические изменения позднего голоцена. В частности, в интервале 900–350 лет назад предполагается тенденция замещения кедровых лесов сосновыми и лиственничными, расширение степных ксерофитных ценозов. 350–250 лет назад в ответ на увлажнение климата происходит расширение кедровых лесов с участием пихты. Затем в интервале 250–130 лет назад влажная фаза сменяется аридной, вследствие чего вновь расширяются площади степных ландшафтов, возрастает участие светлохвойных и мелколиственно-светлохвойных лесов в горной тайге [15]. Резкие кратковременные колебания климата данного периода в Приольхонье зафиксированы и в ярко выраженном слоистом строении субаэральных отложений [14].

Внутрипрофильные изменения $\delta^{13}\text{C}$ и коэффициента β . Дискриминация изотопов углерода в растительных тканях и, как следствие, в продуцируемом ими органическом веществе почв может обуславливаться многими экологическими факторами. Основными из них являются температура и влагообеспеченность [33, 53, 58]. Их ведущая роль обусловлена влиянием температуры на ферментативную активность и интенсивность фотосинтетических реакций и влиянием влажности на устьичную проводимость [39, 58]. Данные эффекты проявляются в глобальном масштабе [33, 53]. Однако в региональном масштабе их проявления различны. Если для климатических трансектов на равнинах часто обнаруживаются линейные зависимости интенсивности фракционирования изотопов углерода растениями от температуры и влажности [56, 62], то для трансектов в горных условиях чаще всего наблюдается полиномиальная зависимость [16, 40, 58, 61].

Изменения изотопного состава углерода с высотой на исследуемой территории также имеют нелинейный характер (полиномиальная зависимость второго порядка $r^2 = 0.62$, уровень значимости $p = 0.005$). Наибольшими значениями $\delta^{13}\text{C}$ характеризуются почвы, формирующиеся в условиях гольцовых и степных ландшафтов. При этом в климатическом отношении эти части высотного профиля противоположны. Площадки С1 и С2 характеризуются наиболее влажными и холодными условиями, в то время как степные площадки наиболее теплые и сухие. Логично предположить, что сходные значения $\delta^{13}\text{C}$ в верхних и нижних частях исследуемого профиля обусловлены разными причинами. Для нижней части ландшафтного профиля $\delta^{13}\text{C}$ определяются произрастанием растений в условиях влагодефицита, для верхней части – ограниченностью тепловых ресурсов и, соответственно, формированием приспособленных к таким условиям растительных сообществ. Оба фактора могут приводить к уменьшению дискриминации изотопов углерода, обуславливая рост значений $\delta^{13}\text{C}$ [58].

В горно-таежных ландшафтах наблюдается максимальное облегчение изотопного состава углерода, что, вероятно, связано с более благоприятным сочетанием увлажнения и теплообеспеченности. Здесь наблюдается тренд к увеличению дискриминации ^{13}C с ростом высоты и увлажнения, характерный для многих регионов [13, 16, 33, 61].

В результате парного регрессионного анализа выявлена средняя статистически значимая корреляция значений $\delta^{13}\text{C}$ в верхнем гумусовом горизонте почвы с температурными показателями поверхности почвы: средней температурой за вегетационный период, суммой положительных температур и с суммой температур $> 10^\circ\text{C}$ (табл. 1). С остальными микроклиматическими показателями достоверных связей не выявлено. Множественный регрессионный анализ также не дал результатов, что говорит о сложной системе факторов, влияющих на фракционирование изотопов углерода, в том числе, вероятно, связанных с динамикой ландшафтно-климатических условий, поэтому имеющийся набор данных не позволяет описать все варьирование значений $\delta^{13}\text{C}$.

Известно, что температура и влажность оказывают значительное влияние не только на фотосинтетические эффекты С3-растений, но и на активность микробиоты [3, 24, 29, 51, 60]. Повышение температур при благоприятных условиях увлажнения положительно сказывается на фракционировании почвенной микробиоты, ускоряет интенсивность минерализации органического вещества и усиливает фракционирование изотопов углерода [44]. В результате преимущественного использования ^{12}C и остаточного накопления ^{13}C

происходит утяжеление состава стабильных изотопов почвенного органического вещества [31].

Такая зависимость прослеживается не только в пространственном масштабе, но и во внутри-профильных изменениях состава стабильных изотопов углерода в почвах различных природных зон [31, 41, 43, 57]. Рост значений $\delta^{13}\text{C}$ с глубиной характерен для почв исследуемой территории вне зависимости от условий и характера почвообразования. Также в целом прослеживается общий тренд к росту интенсивности минерализации органического вещества (увеличение β по модулю) при переходе от таежных почв к степным, что связано, как показали результаты парного корреляционного анализа, с изменением условий теплообеспеченности почв. Однако данные показатели описывают всего 34–41% варьирования β . Выраженность β в профилях почв разных ландшафтных поясов неоднородна, что может свидетельствовать о различной интенсивности минерализации почвенного органического вещества и оборота углерода под влиянием разного набора факторов [31, 42, 43].

Исследуемая территория условно делится на три участка по условиям минерализации органического вещества и определяющим ее ландшафтно-климатическим условиям. Динамика органического вещества в почвах верхней части высотного профиля ограничивается недостатком тепловых ресурсов. Это относится к гольцовому поясу (С1) и к почвам, формирующимся в подгольцовых ландшафтах (С2). При наиболее высоких параметрах влажности воздуха почвы и опад характеризуются здесь повышенными значениями $\delta^{13}\text{C}$. Тем не менее, если для точки С1 совместно с высокими значениями $\delta^{13}\text{C}$ в почвенном профиле наблюдается слабо выраженный градиент $\Delta\delta^{13}\text{C}$ и один из наименее выраженных наклонов линейной регрессии, то для точки С2 как β , так и значения $\Delta\delta^{13}\text{C}$ существенно возрастают, что может свидетельствовать лишь о частичном влиянии температурного фактора на минерализацию органического вещества. Данные микроклиматического мониторинга подтверждают это предположение. На поверхности почвы С2 развит плотный многоярусный растительный покров, который защищает почвы от заморозков и выхолаживания, что особенно сказывается в начале лета и в первые дни осени.

Почвы и растительность подгольцового (С2) и верхней части таежного пояса (С2, Ч2, С3, С5) формируются в условиях достаточного увлажнения, о чем говорят наименьшие на всем высотном профиле величины $\delta^{13}\text{C}$ гумусовых горизонтов и опада. Несмотря на это, значения изотопного градиента $\Delta\delta^{13}\text{C}$ на данном высотном отрезке постепенно снижаются, что согласуется с уменьшением коэффициента β . Последний значительно

варьирует. Наименее выражен он в точках Ч2 и С5, наиболее – в С2, С3.

Сопоставление данных изменений с С/Н опада и гумусовых горизонтов почв по этим точкам показало, что при расширении отношения С/Н выраженность коэффициента β уменьшается, при сужении С/Н происходит рост выраженности β .

Отношение С/Н является показателем интенсивности разложения органических материалов в зависимости от их биохимического состава [44, 60]. Во многих экспериментах показано уменьшение интенсивности минерализации органических остатков с ростом С/Н [24, 37]. Низкие значения этого показателя, как правило, коррелируют с высокой активностью минерализации органического вещества почв, поскольку увеличивается доступность азота для гетеротрофных микроорганизмов [21, 37]. Принимая β в качестве индикатора интенсивности оборота углерода в почве, можно предполагать замедление такового в почвах, органическое вещество которых обеднено азотом (высокие значения С/Н).

Дополнительные связи обнаруживаются и при сравнении значений рН и С/Н ($r = -0.84$, $r^2 = 0.7$, $p = 0.0001$) в данной части высотного профиля. При низких рН наблюдаются большие значения С/Н, почвы и опад с пониженной кислотностью характеризуются более низкими значениями С/Н и повышенными значениями β . Исходя из данной зависимости и учитывая факт, что высокая кислотность существенно снижает микробную активность и интенсивность разложения органического вещества [48], логично предположить, что рН является одним из значимых параметров, контролирующих использование углерода и азота микроорганизмами в исследуемых почвах и влияющих на интенсивность минерализации органического вещества таежных почв Приморского хребта.

Подобные наблюдения позволяют предполагать, что в данной части высотного профиля оборот углерода в почвах контролируется в основном качественным составом опада и внутрипочвенными факторами, влияющими на интенсивность его разложения. Зависимость изотопного состава углерода от качества опада хорошо объяснима с точки зрения более благоприятного сочетания температурных условий и влажности для данной части профиля, нежели чем для ниже- и вышележащих участков. В зонах с неблагоприятными климатическими условиями разложение растительных остатков лимитировано преимущественно факторами окружающей среды, тогда как при благоприятных гидротермических условиях – качеством органического материала [37]. Основные ограничения для микробиологической активности в горно-таежных почвах Приморского хребта при этом, вероятно, связаны с доступностью азо-

та. Данная трактовка хорошо согласуется с тем, что леса умеренного пояса характеризуются закрытым азотным циклом, когда потери азота низки вследствие высокой конкуренции за этот важный для питания растений и микробиоты ресурс, что характерно и для лесных почв Сибири [21]. Формирование органического вещества почв в данной части высотного профиля при поступлении преимущественно хвойного опада, обогащенного лигноцеллюлозными соединениями, требующими высокой энергии активации для разложения [32, 54], делает еще более выраженной зависимость интенсивности минерализации органического вещества от качества опада.

Несмотря на наиболее благоприятное сочетание температуры и увлажнения в данной части профиля, тепловые ресурсы здесь все же ограничены. С позиции широко обсуждаемой в настоящее время CQT-гипотезы [38], можно предположить, что горно-таежные ландшафты Прибайкалья, формирующиеся в условиях ограниченных тепловых ресурсов на высотах около 1400–800 м, при прогнозируемом потеплении климата испытывают наиболее выраженные изменения в балансе углерода.

Нижняя часть ландшафтного профиля также неоднородна по значениям β . Среди степных почв наибольшая выраженность наклона линейной регрессии (то есть наибольшее значение β -коэффициента по модулю) характерна для точки С9, находящейся в 30 м от оз. Байкал, и Крестовый, заложенной в пади, устье которой выходит к озеру. Наименьший среди всех исследованных почв β -коэффициент обнаружен в точке Сарма-1. Несмотря на формирование указанных почв под степями и сходство состава стабильных изотопов углерода гумусовых горизонтов как в пределах Приольхонья, так и с другими степными почвами Байкальского региона [13], существенные различия в β -коэффициенте на наш взгляд свидетельствуют о дифференциации почв по интенсивности оборота углерода. Наиболее вероятно, что такие различия связаны с неоднородностью гидротермического режима степных почв Приольхонья. При общем низком увлажнении территории, почвы, формирующиеся в непосредственной близости от оз. Байкал, подвержены существенно меньшему иссушению профиля за счет охлаждающего воздействия водных масс Байкала в летний период и особенностей долиной циркуляции (в случае с Крестовым). Данные микроклиматического мониторинга подтверждают это предположение.

Повышенная (по сравнению с другими почвами подтайги) выраженность наклона линейной регрессии в точке Ч1 наиболее вероятно связана с северо-западной экспозицией и высотой пло-

щадки, что обуславливает повышенную влажность воздуха.

Описанные изменения в выраженности β -коэффициента в почвах подтайги и степей не сопровождаются существенными колебаниями в значениях C/N и рН. В сочетании со снижением значений $\delta^{13}\text{C}$ в гумусовых горизонтах почв и опаде подобные изменения в β -коэффициенте могут свидетельствовать о несущественной роли внутрипочвенных факторов и перекрытии их влияния эффектом влагодефицита на интенсивность оборота углерода.

Такая трактовка хорошо согласуется с представлениями о том, что иссушение почвы приводит к уменьшению скорости минерализации ПОВ из-за снижения микробной активности [29]. При этом, исходя из сопоставления радиального прироста лиственниц и сосен, произрастающих на данной территории, с атмосферным увлажнением [22], лимитированы по увлажнению здесь не только степные, но и подтаежные ландшафты. Данное обстоятельство тем более интересно, что с точки зрения интенсивности минерализации ПОВ большинство лесов умеренного климата не ограничены влагодефицитом [32]. Таким образом, в данном случае наблюдается региональная специфика функционирования подтаежных ландшафтов, формирующихся в условиях барьерного эффекта горного обрамления оз. Байкал.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследуемая территория характеризуется контрастной ландшафтной структурой и существенной вариативностью климатических параметров, отражающихся на составе стабильных изотопов растительности и органического вещества почв. Анализ вариаций значений $\delta^{13}\text{C}$ гумусовых горизонтов показал, что наиболее тяжелыми по изотопному составу углерода являются почвы гольцовых и степных ландшафтов (–24.72 и –23.97...–24.75‰ соответственно), наиболее легкими – таежные почвы (–25.61...–27.18‰). Полученные данные об изотопном составе углерода растительности и опада несут важную информацию о факторах, лимитирующих продуктивность растений в различных ландшафтных условиях. Комплексный анализ внутрипочвенных и пространственных вариаций состава стабильных изотопов углерода, а также ряда химических свойств, определяющих его динамику в почвах, позволил выявить отличия в интенсивности оборота органического углерода в почвах западного побережья оз. Байкал.

Несмотря на в целом линейный характер изменений климатических показателей от верхних к нижним гипсометрическим уровням (рост температур и длительности вегетационного периода,

снижение увлажнения), вариации изотопных характеристик носят более сложный характер.

При выявленной средней положительной связи β с температурными показателями почв в подтаежных и степных почвах, характеризующихся наибольшей теплообеспеченностью, наблюдаются одни из наименьших по модулю значений β , что связано с низким увлажнением. Среди прочего об этом свидетельствует то, что степные почвы, формирующиеся в условиях повышенного увлажнения и менее выраженного иссушения профиля в летний период в непосредственной близости от оз. Байкал, характеризуются повышенной интенсивностью оборота углерода.

В почвах верхней части ландшафтного профиля, характеризующихся наибольшей влагообеспеченностью, наблюдается минимальная интенсивность оборота углерода. Это связано с дефицитом тепла и подтверждается утяжелением изотопного состава растительности и ПОВ, наблюдаемым в высокогорных условиях.

Незначительные изменения климатических параметров в горно-таежных ландшафтах не находят отражения в существенных вариациях β . Последний в большей степени сопоставим с резкими изменениями физико-химических свойств почв, контролирующей интенсивность разложения/стабилизации органического вещества.

Таким образом, в контрастных условиях верхней и нижней частей профиля, климат оказывает значительное влияние на интенсивность трансформации органического вещества, перекрывая действие внутрипочвенных факторов. В более благоприятных климатических условиях горно-таежных ландшафтов динамика органического вещества в почвах контролируется преимущественно внутрипочвенными факторами.

Несмотря на наиболее благоприятное сочетание температуры и увлажнения в таежных ландшафтах горного обрамления оз. Байкал на высотах около 800–1400 м, тепловые ресурсы здесь ограничены. Возможное усиление интенсивности оборота углерода при прогнозируемом потеплении климата может обусловить наиболее выраженные изменения в балансе углерода именно в этих ландшафтах. Учитывая их значительный вклад в баланс углерода в Байкальском регионе, необходимы дальнейшие исследования для лучшего понимания этой проблемы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

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).

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

Таблица S1. Основные характеристики исследуемых площадок.

Рис. S1. Коэффициенты наклона линейной регрессии (β) для исследуемых почв.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агафонов Б.П. Экзолигодинамика Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Наука, 1990. 176 с.
2. Анехтонов О.А., Иванова Л.А., Ронжина Д.А., Иванов Л.А., Лю Х. С4-растения во флоре Бурятии // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Биология. Экология. 2019. Т. 30. С. 32–47. <https://doi.org/10.26516/2073-3372.2019.30.32>
3. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. М.: Наука, 1980. 187 с.
4. Белов А.В., Безрукова Е.В., Соколова Л.П. Эволюционно-генетическая основа структурно-ценотического разнообразия современной растительности Предбайкалья // География и природные ресурсы. 2018. № 1. С. 92–102. [https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1\(92-102\)](https://doi.org/10.21782/GIPR0206-1619-2018-1(92-102))
5. Биличенко И.Н., Седых С.А. Картографирование ландшафтов Западного Прибайкалья // Геодезия и картография. 2016. № 9. С. 38–47. <https://doi.org/10.22389/0016-7126-2016-915-9-38-47>
6. Буфал В.В., Линевиц Н.Л., Башалханова Л.Б. Ландшафтно-климатическая обусловленность рекреационного потенциала побережья озера Байкал // География и природные ресурсы. 2004. № 4. С. 50–55.
7. Буфал В.В. Условия формирования современного климатического фона // Природопользование и охрана среды в бассейне Байкала. Новосибирск: Наука, 1990. С. 29–40.
8. Бязров Л.Г. Пространственно-временные тренды соотношения величин стабильных изотопов углерода ($\delta^{13}\text{C}$) в талломах эпифитного лишайника *Nurogymnia physodes* из Подмосковья и ряда районов Москвы // Живые и биокосные системы. 2013. № 3. <http://www.jbks.ru/archive/issue-3/article-1>
9. Бязров Л.Г., Гонгальский К.Б., Пельгунова Л.А., Тиунов А.В. Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) талломов лишайников в лесах вблизи Чернобыльской АЭС // Радиационная биология. Радиоэкология. 2010. Т. 50. №1. С. 98–105.
10. Васильчук Ю.К., Белик А.Д., Буданцева Н.А., Геннадиев А.Н., Васильчук А.К., Васильчук Дж.Ю., Завгородняя Ю.А., Гинзбург А.П., Блудушкина Л.Б. Полициклические ароматические углеводороды и изотопы углерода в торфе миграционного бугра пучения (Большеземельская тундра) // Почвоведение. 2021. № 7. С. 797–805. <https://doi.org/10.31857/S0032180X21070133>

11. *Владимиров И.Н.* Динамика верхней границы леса на Байкальском хребте // Известия Иркутского гос. ун-та. Сер. Науки о земле. 2014. Т. 10. С. 46–56.
12. *Голубцов В.А.* Состав стабильных изотопов углерода органического вещества позднелейстоценовых и голоценовых почв Байкальского региона // Почвоведение. 2020. № 6. С. 673–690.
13. *Голубцов В.А., Вантеева Ю.В., Воронай Н.Н.* Влияние влагообеспеченности на состав стабильных изотопов углерода органического вещества почв Байкальского региона // Почвоведение. 2021. № 10. С. 1182–1194.
14. *Данько Л.В.* Эволюция почв экотона тайги и степи Прибайкалья в голоцене // География и природные ресурсы. 2009. № 4. С. 17–25.
15. *Данько Л.В., Безрукова Е.В., Орлова Л.А.* Реконструкция развития геосистем Приморского хребта во второй половине голоцена // География и природные ресурсы. 2009. № 3. С. 48–55.
16. *Ковда И.В., Моргул Е.Г., Гонгальский К.Б., Баландин С.А., Ерохина А.И.* Изотопный состав углерода компонентов ландшафта и его изменения в различных экологических условиях // Известия РАН. Сер. биологическая. 2016. № 2. С. 216–224. <https://doi.org/10.7868/S0002332916010082>
17. Конспект флоры Иркутской области (сосудистые растения) / Под ред. Л.И. Малышева. Иркутск: Изд-во Иркутского ун-та, 2008. 327 с.
18. *Кузнецова А.О., Иванова А.А., Слагода Е.А., Тихонравова Я.В.* Стабильные изотопы углерода в современных растениях урочищ ключевого участка Марре-Сале (Западный Ямал) // Арктика и Антарктика. 2020. № 1. С. 57–74. <https://doi.org/10.7256/2453-8922.2020.1.32204>
19. *Кузьмин С.Б., Данько Л.В.* Палеоэкологические модели этноприродных взаимодействий. Новосибирск: Гео, 2011. 187 с.
20. *Меняйло О.В., Макаров М.И., Ченг Ш.-К.* Изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$) и азота ($\delta^{15}\text{N}$) в хвое/листьях и почве в модельных древостоях разных пород // Докл. АН. 2014. Т. 456. С. 738–740. <https://doi.org/10.7868/S0869565214180285>
21. *Меняйло О.В., Матвиенко А.И., Макаров М.И., Ченг Ш.-К.* Положительный отклик минерализации углерода на внесение азота в лесных почвах Сибири // Доклады АН. 2014. Т. 456. № 1. С. 117–120. <https://doi.org/10.7868/S0869565214130271>
22. *Осколков В.А., Воронин В.И.* Общая характеристика радиального прироста сосны и лиственницы и их связь с климатическими факторами в различных местообитаниях Западного Прибайкалья // Структура, функционирование и эволюция горных ландшафтов Западного Прибайкалья. Иркутск: Изд-во ИГ СО РАН, 2005. С. 36–52.
23. *Семенов В.М., Козут Б.М.* Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
24. *Семенов В.М., Паутова Н.Б., 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. <https://doi.org/10.1134/S0032180X19100113>
25. *Семенюк О.В., Телеснина В.М., Богатырев Л.Г., Бенедиктова А.И., Кузнецова Я.Д.* Оценка внутрибиогеоценозной изменчивости лесных подстилок и травяно-кустарничковой растительности в еловых насаждениях // Почвоведение. 2020. № 1. С. 31–43. <https://doi.org/10.31857/S0032180X2001013X>
26. *Степанцова Н.В.* Атлас растений западного побережья озера Байкал. Иркутск: Репроцентр А1, 2013. 600 с.
27. *Тунов А.В.* Стабильные изотопы углерода и азота в почвенно-экологической среде // Известия РАН. Сер. биологическая. 2007. № 4. С. 475–489.
28. *Толпышева Т.Ю., Шишконокова Е.А.* Лишайники природного парка “Нумто”. Краткий определитель. Екатеринбург: Ассорти, 2018. 187 с.
29. *Тулина А.С., Семенов В.М.* Оценка чувствительности минерализуемого пула почвенного органического вещества к изменению температуры и влажности // Почвоведение. 2015. № 8. С. 952–962. <https://doi.org/10.7868/S0032180X15080109>
30. *Шимараев М.Н., Куимова Л.Н., Синюкович В.Н., Цехановский В.В.* О проявлении на Байкале глобальных изменений климата в XX столетии // Доклады АН. 2002. Т. 383. № 3. С. 397–400.
31. *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. V. 118 (4). P. 1532–1545. <https://doi.org/10.1002/2013JG002400>
32. *Anderson J.M.* The effect of climate change on decomposition processes in grassland and coniferous forests // Ecological applications. 1991. V. 1(3). P. 326–347.
33. *Basu S., Ghosh S., Sanyal P.* Spatial heterogeneity in the relationship between precipitation and carbon isotopic discrimination in C3 plants: Inferences from a global compilation // Global Planetary Change. 2019. V. 176. P. 123–131. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2019.02.002>
34. *Bilichenko I.N., Voropay N.N.* Landscape and Climate Studies of Mountain Areas of the Baikal Natural Territory // IOP Conf. Series: Earth Environ. Sci. 2018. V. 211. P. 012046. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/211/1/012046>
35. *Bowling D.R., Pataki D.E., Randerson J.T.* Carbon isotopes in terrestrial ecosystem pools and CO₂ fluxes // New Phytologist. 2008. V. 178. P. 24–40. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2007.02342.x>
36. *Brunn M., Spielvogel S., Sauer T., Oelmann Y.* Temperature and precipitation effects on $\delta^{13}\text{C}$ depth profiles in SOM under temperate beech forests // Geoderma. 2014. V. 235–236. P. 146–153. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.07.007>
37. *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.
38. *Craine J.M., Fierer N., McLaughlan K.K.* Widespread coupling between the rate and temperature sensitivity of organic matter decay // Nature Geosci. 2010. V. 3. P. 854–857. <https://doi.org/10.1038/NNGEO1009>
39. *Dawson T.E., Mambelli S., Plamboeck A.H., Templer P.H., Tu K.P.* Stable isotopes in plant ecology // Annual Rev.

- Ecology Systematics. 2002. V. 33. P. 507–559.
<https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.33.020602.095451>
40. *Du B., Liu C., Kang H., Zhu P., Yin S., Shen G., Hou J., Ilvesniemi H.* Climatic Control on Plant and Soil $\delta^{13}\text{C}$ along an Altitudinal Transect of Lushan Mountain in Subtropical China: Characteristics and Interpretation of Soil Carbon Dynamics // *Plos One*. 2014. V. 9(1). P. e86440.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0086440>
 41. *Ehleringer J.R., Buchmann N., Flanagan L.B.* Carbon isotope ratios in belowground carbon cycle processes // *Ecol. Appl.* 2000. V. 10. P. 412–422.
 42. *Garten C.T.* Relationships among forest soil C isotopic composition, partitioning and turnover times // *Can. J. For. Res.* 2006. V. 36 (9). P. 2157–2167.
 43. *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. V. 81 (4). P. 1108–1119.
 44. *Gerschlauser F., Saiz G., Costa D.S., Kleyer M., Dannemann M., Kiese R.* Stable carbon and nitrogen isotopic composition of leaves, litter, and soils of various ecosystems along an elevational and land-use gradient at Mount Kilimanjaro, Tanzania // *Biogeosciences*. 2019. V. 16. P. 409–424.
<https://doi.org/10.5194/bg-16-409-2019>
 45. *Hammer Ø., Harper D. A.T., Ryan P. D.* Past: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis // *Palaeontologia Electronica*. 2001. V. 4 (1). 4.
http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm. [accessed Feb 07 2022]
 46. *Lakatos M., Hartard B., Maguas C.* The stable isotopes $\delta^{13}\text{C}$ and $\delta^{18}\text{O}$ of lichens can be used as tracers of microenvironmental carbon and water sources // *Stable isotopes as indicators of ecological change*. Elsevier Inc., 2007. P. 77–92.
[https://doi.org/10.1016/S1936-7961\(07\)01006-8](https://doi.org/10.1016/S1936-7961(07)01006-8)
 47. *Lehmann J., Kleber M.* The contentious nature of soil organic matter // *Nature*. 2015. V. 528. P. 60–68.
<https://doi.org/10.1038/nature16069>
 48. *Leifeld J., Bassin S., Conen F., Hajdas I., Egli M., Fuhrer J.* Control of soil pH on turnover of belowground organic matter in subalpine grassland // *Biogeochemistry*. 2013. V. 112. P. 59–69.
 49. *Mackay A.W., Seddon A.W.R., Leng M.J., Heumann G., Morley D.W., Piotrowska N., Rioual P., Roberts S., Swann G.E.A.* Holocene carbon dynamics at the forest–steppe ecotone of southern Siberia // *Global Change Biology*. 2016.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13583>
 50. *Malone E.T., Abbott B.W., Klaar M., Kidd C., Sebilo M., Milner A., Pinay G.* Decline in ecosystem delta ^{13}C and mid-successional nitrogen loss in a two-century glacial chronosequence // *Ecosystems*. 2018. V. 21(8). P. 1659–1675.
<https://doi.org/10.1007/s10021-018-0245-1>.hal-02074264
 51. *Moinet G.Y.K., Moinet M., Hunt J.E., Rumpel C., Chabbi A., Millard P.* Temperature sensitivity of decomposition decreases with increasing soil organic matter stability // *Sci. Total Environ.* 2020. V. 704. 135460.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135460>
 52. *Oyungerel Sh., Tsendeekhoo Ts., Tserenkhand G.* A Study to Detect CAM Plants in Mongolia // *Mongolian J. Biological Sci.* 2004. V. 2(1). P. 29–37.
<https://doi.org/10.22353/mjbs.2004.02.04>
 53. *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. V. 165. P. 110–119.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.12.007>
 54. *Segura J.H., Nilsson M.B., Sparrman T., Serk H., Schleucher J., Tolu J., Öquist M.G.* Boreal tree species affect soil organic matter composition and saprotrophic mineralization rates // *Plant Soil*. 2019. V. 441. P. 173–190.
<https://doi.org/10.1007/s11104-019-04105-x>
 55. *Wang C., Houlton B.Z., Liu D., Hou J., Cheng W., Bai E.* Stable isotopic constraints on global soil organic carbon turnover // *Biogeosciences*. 2018. V. 15. P. 987–995.
<https://doi.org/10.5194/bg-15-987-2018>
 56. *Wang C., Liu D., Luo W., Fang Y., Wang X., Li X., Jiang Y., Han X., Bai E.* Variations in leaf carbon isotope composition along an arid and semi-arid grassland transect in northern China // *J. Plant Ecology*. 2016. V. 9(5). P. 576–585.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtw006>
 57. *Wang C., Wei H., Liu D., Luo W., Hou J., Cheng W., Han X., Bai E.* Depth profiles of soil carbon isotopes along a semi-arid grassland transect in northern China // *Plant Soil*. 2017. V. 417. P. 43–52.
<https://doi.org/10.1007/s11104-017-3233-x>
 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 // *Frontiers Plant Sci.* 2015. V. 6. 961.
<https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00961>
 59. *Zacháry D., Filep T., Jakab G., Molnár M., Kertész T., Király C., Hegyi I., Gáspár L., Szalai Z.* Carbon Isotope Measurements to Determine the Turnover of Soil Organic Matter Fractions in a Temperate Forest Soil // *Agronomy*. 2020. V. 10. P. 1944.
<https://doi.org/10.3390/agronomy10121944>
 60. *Zhang D., Hui D., Luo Y., Zhou G.* Rates of litter decomposition in terrestrial ecosystems: global patterns and controlling factors // *J. Plant Ecology*. 2008. V. 1(2). P. 85–93.
<https://doi.org/10.1093/jpe/rtn002>
 61. *Zhang D., Yang Y., Ran M.* Variations of surface soil $\delta^{13}\text{C}_{\text{org}}$ in the different climatic regions of China and paleoclimatic implication // *Quarter. Int.* 2020. V. 536. P. 92–102.
<https://doi.org/10.1016/j.quaint.2019.12.015>
 62. *Zhou Y., Zhang W., Cheng X., Harris W., Schaeffer S.M., Xu X., Zhao B.* Factors affecting ^{13}C enrichment of vegetation and soil in temperate grasslands in Inner Mongolia, China // *J. Soils Sediments*. 2019. V. 19. P. 2190–2199.
<https://doi.org/10.1007/s11368-019-02248-z>

Stable Isotopic Composition ($\delta^{13}\text{C}$) as a Proxy of Organic Carbon Dynamics in Soils of the Western Shore of Lake Baikal

V. A. Golubtsov^{1, *}, Yu. V. Vanteeva¹, N. N. Voropay^{1, 2}, O. V. Vasilenko¹,
A. A. Cherkashina¹, and E. P. Zazovskaya³

¹ Sochava Institute of Geography, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 664033 Russia

² Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Tomsk, 634055 Russia

³ Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, 119017 Russia

*e-mail: tea_88@inbox.ru

Understanding the main factors of soil organic carbon dynamics is an urgent problem in the context of modern climatic changes. One of the approaches to assessing such dynamics is the analysis of the stable carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$) of soil organic matter. Our study was carried out in the landscapes of the southeastern slope and foothills of the Primorsky Range characterized by contrasting environmental conditions. Microclimatic features, intrasoil and spatial variations of the stable carbon isotopic composition as well as the soil physico-chemical properties that determine its dynamics are analyzed. The Ah horizons of soils formed in mountain tundra and steppe landscapes are characterized by the highest $\delta^{13}\text{C}$ values (-24.72 and $-23.97\dots-24.75\text{‰}$). The lowest $\delta^{13}\text{C}$ values ($-25.61\dots-27.18\text{‰}$) are observed in the soils of mountain taiga. Based on the calculation of the linear dependence of $\delta^{13}\text{C}$ values on the content of total carbon in the soil, which varies with depth, the intensity of carbon turnover was determined through the slope of the linear regression. It was revealed that climate has a significant effect on the intensity of organic matter transformation in contrasting conditions of the mountain tundra and steppe landscapes blocking the effect of edaphic factors. Under more favorable climatic conditions of mountain taiga the dynamics of organic matter in soils is controlled mainly by edaphic factors.

Keywords: carbon turnover, Primorsky Range, Pre-Olkhon Plateau