

МЕТОДЫ ГЕОГРАФИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 631.41

ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО ПОЧВ ГОРНЫХ ЛАНДШАФТОВ АЛТАЯ (НА ПРИМЕРЕ ТИГИРЕКСКОГО ЗАПОВЕДНИКА)

Д.Р. Бардашов¹, П.П. Кречетов², М.А. Смирнова³

^{1–3} *Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв*

³ *Почвенный институт имени В.В. Докучаева, отдел агроэкологической оценки почв и проектирования агроландшафтов, ст. науч. с.*

¹ *Техник; e-mail: bardash@mail.ru*

² *Доцент, канд. биол. н.; e-mail: krechetov@mail.ru*

³ *Доцент, канд. геогр. н.; e-mail: summerija@yandex.ru*

Соотношение различных фракций органического вещества почв является индикатором уровня биологической активности и может быть использовано для оценки способности почвы к накоплению устойчивых органических соединений, в том числе депонирования почвой атмосферного углерода. Территория Тигирекского заповедника, являясь примером инварианта ландшафтной структуры высотной поясности, свободным от современного и исторического антропогенного воздействия, позволяет выявить особенности содержания органического углерода различной степени окисляемости, характеризующей соотношение активного, медленного и пассивного пулов органического вещества почв. Показано, что органические соединения почв горно-степного, субальпийского и альпийского поясов характеризуются высокой долей среднеокисляемых соединений (>28%) за счет преобладания в составе растительных сообществ травянистых видов с высоким содержанием целлюлозы и аминокислот в опаде. Почвы горно-таежных ландшафтов характеризуются большей долей трудноокисляемых соединений (до 60%) в сравнении с почвами горно-степных (до 55%), альпийских и субальпийских ландшафтов (до 27%) за счет преобладания в составе растительных сообществ древесных видов, опад которых обогащен лигнином. Доля трудноокисляемых соединений в горно-степных и горно-таежных почвах возрастает с глубиной. При этом в горно-таежных почвах рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения среднеокисляемых ($32 \pm 9,1$ до $25 \pm 7,9\%$) при относительно стабильной доле легкоокисляемых соединений (около 23%). В горно-степных почвах наблюдается обратная картина – сокращение доли легкоокисляемой фракции ($26 \pm 4,5$ до $17 \pm 4,3\%$) на фоне относительно стабильной доли среднеокисляемой (около 41%). Для почв альпийских и субальпийских ландшафтов характерна относительно стабильность соотношения легко- (15–25%), средне- (47–60%) и трудноокисляемых (19–31%) соединений органического вещества в пределах почвенного профиля, обусловленная его маломощностью и пониженной активностью микробиоты в условиях кислой / слабокислой реакции среды и неблагоприятных климатических условий.

Ключевые слова: цикл углерода, пулы органического углерода, гумус, черноземы, буроземы, луговые почвы

ВВЕДЕНИЕ

Почвы играют ключевую роль в функционировании наземных экосистем: они способствуют производству биомассы, являются местообитанием живых организмов, участвуют в накоплении, переносе и трансформации питательных веществ и водообмене [Добровольский, Никитин, 1990; Blum, 2005]. Органическое вещество, являясь неотъемлемым компонентом почв, формирует и поддерживает их основные свойства, определяет разнообразие их функций и режимов функционирования, а также лежит в основе оценок предоставляемых почвами экосистемных услуг [Adhikari, Hartemink, 2016;

Andrea et al., 2018]. Именно поэтому к изучению органического вещества почв приковано большое внимание со стороны исследователей.

Органическое вещество почв – это многокомпонентный гетерогенный и полифункциональный континуум отдельных частиц и ансамблей биомолекул частично или полностью трансформированных остатков биоты [Семенов, Тулина, 2011]. По времени оборачиваемости углерода в органическом веществе почв выделяются активный (лабильный) пул (со временем оборачиваемости в почве до 10 лет), медленный (промежуточный) пул (10–100 лет) и пассивный (стабильный) пул (более 100 лет) [Семенов

и др., 2004; Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009]. Активный пул углерода формирует свежее органическое вещество высокого энергетического и питательного статуса, представленное главным образом микробной биомассой, моно- и полисахаридами. Медленный пул состоит из исходно устойчивого для разложения органического вещества (аминосахара, гликопротеины, фракции лигнина, целлюлоза, меланин и липиды, гумусовые вещества). Пассивный пул представлен недоступным из-за своего строения для биологической трансформации микроорганизмами и/или связанным с минеральной частью почвы органическим веществом (кутины, суберины, модифицированный лигнин, часть липидов, гумин). Считается, что органическое вещество почв представляет собой континуум разновозрастных (от современных свежих до очень старых) соединений с постоянным и непрерывным обменом углерода между перечисленными пулами [Семенов и др., 2009]. На долю активного пула органического вещества почв приходится 2–8% от всего C_{org} , медленного – 45–65%, пассивного – 39–52% [Paul et al., 2006].

Несмотря на важность изучения органического вещества почв, характеризующегося различной скоростью обновления углерода, результаты таких исследований редко встречаются в научной литературе. Для оценки содержания органического углерода различных пулов используется целый ряд методических подходов, основанных на определении его доступности для разложения или минерализации [Paul et al., 2006; Lützow von et al., 2007; Соколов, 2009; Семенов, Когут, 2015; Ларионова и др., 2015a].

Как правило, педосфера рассматривается в качестве хранилища углерода наземных экосистем в его связи с углеродом атмосферного воздуха. При этом наиболее часто используемым критерием оценки депонирующей способности почв атмосферного углерода является изменение его валового содержания в почвах при изменении особенностей землепользования [Пулы и потоки..., 2007; Scharlemann et al., 2014]. Вместе с тем углерод активного, медленного и пассивного пулов характеризуется различной степенью обновления при деградации почв и изменении характера их использования, а соотношение перечисленных пулов в почвах носит индивидуальный характер [Семенов и др., 2007; Ларионова и др., 2015a; Bhattacharya et al., 2016; Guan et al., 2018; Ji et al., 2020]. Таким образом, почвы, обладающие одинаковым валовым содержанием органического углерода, могут характеризоваться принципиально разным потенциалом к депонированию углерода атмосферы [Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009; Carrillo et al., 2011]. Особое внимание заслуживает изучение углерода различных пулов именно природных

ландшафтов, поскольку данные о ненарушенных почвах необходимы для проведения корректных оценок влияния изменения особенностей землепользования и деградации почв на баланс углерода (в том числе при расчете индексов carbon pool index, lability index, C pool management index и др. [Zhu et al., 2015; Cavalcante et al., 2019; Zhang et al., 2020]).

Цель настоящей работы – выявить влияние ландшафтных условий на накопление органического углерода различных пулов в фоновых почвах Тигирекского заповедника, расположенного в юго-западной части Алтайского края.

Территория Тигирекского заповедника является примером инварианта ландшафтной структуры высотной поясности, свободного от современного или исторического антропогенного воздействия. Неоднородность ландшафтных условий и, в первую очередь, различия в интенсивности биологической активности определяют многообразие соединений органического вещества почв и, следовательно, пространственную дифференциацию его состава. Изучение легко-, средне- и трудноокисляемой фракций органического вещества фоновых почв горных ландшафтов Алтая проведено впервые.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Государственный природный заповедник «Тигирекский» расположен на юго-западе Алтайского края (в пределах Змеиногорского, Третьяковского и Краснощековского районов) и относится к западной части Алтае-Саянской горной страны. Основной массив территории заповедника занимает западную часть Тигирекского хребта, являющегося водоразделом верхней трети бассейна р. Белой и бассейна р. Ини [Рубанов, Иванов, 2005].

Рельеф заповедника характеризуется преобладанием среднегорий с куполообразными вершинами. Абсолютные высоты варьируют от 495 до 2013 м. Климат резко континентальный; средняя температура января составляет $-12...-16^{\circ}\text{C}$, июля $+16...+18^{\circ}\text{C}$. Основная часть осадков приходится на теплое время года – с апреля по октябрь. В зимний сезон выпадает 15–20% от их общего количества, причем большая часть – в первой половине зимы (ноябрь – декабрь). Среднее годовое количество осадков составляет 627 мм. По мере увеличения высоты оно возрастает до 1500 мм на склонах западной экспозиции [Давыдов и др., 2011].

Исследования проведены на трех ключевых участках в пределах степных, таежных и горно-альпийских ландшафтов (рис.). Классификация и диагностика почв выполнены в соответствии с субстантивно-генетической классификацией почв России [Классификация..., 2004]. Отбор образцов проведен из органо-гумусовых и срединных горизонтов почв.

На ключевом участке «Степной», характеризующем ландшафтную структуру остепненных южных склонов Драгунского плато в высотном диапазоне от 500 до 950 м (см. рис.), заложено девять точек полевого опробования и отобрано 47 проб (табл. 1). Почвы представлены карболитоземами и карбопетроземами темногумусовыми, формирующимися на вершинных поверхностях и привершинных частях склонов крутизной 0–10° под кальцефильными петрофитными кустарниковыми ассоциациями с участием можжевельника (*Spiraea trilobata*, *Caragana pygmaea*, *Cotoneaster melanocarpus* *Juniperus sabina*), а также петрофитными (*Orostachys spinosa*, *Sedum hybridum*, *Thymus jensseensis*) разнотравно-злаковыми луговыми степями и остепненными злаково-разнотравными лугами на крутых склонах (20–35°); темногумусовыми остаточно-карбонатными почвами на склонах средней крутизны (10–20°) под кустарниковыми (*Spiraea trilobata*, *Caragana pygmaea*, *Cotoneaster melanocarpus*) осочково- (*Carex pediformis*) и злаково-разнотравными (*Bupleurum multinerve*, *Poa*

angustifolia, *Hedysarum gmelinii*, *Onosma simplicissima*, *Pulsatilla multifida*, *Saussurea controversa*, *Youngia tenuifolia*, *Helictotrichon altaicum*) остепненными лугами, черноземами глинисто-иллювированными, формирующимися на плакорах и пологих склонах (до 6°) под разнотравно-злаковыми (*Poa angustifolia*, *Dactylis glomerata*, *Phleum pratense*, *Festuca pratensis*, *Bromopsis inermis*, *Origanum vulgare*) лугами. На широких и пологих участках логов формируются высокотравные, злаково-высокотравные (*Filipendula ulmaria*, *Urtica dioica*, *Delphinium elatum*, *Dactylis glomerata*) и древесно-кустарниковые (*Padus avium*, *Betula pendula*) сообщества, ивняки (*Salix cinerea*, *S. triandra*, *S. viminalis*) на темно-серых и темно-серых глеевых почвах. Территория ключевого участка сложена верхне- и нижнесилурийскими отложениями, представленными конгломератами, гравелитами, песчаниками, алевролитами, мергелями и известняками. Верхнесилурийские отложения – это главным образом известняки, песчаники, сланцы.

На ключевом участке «Таежный», располо-

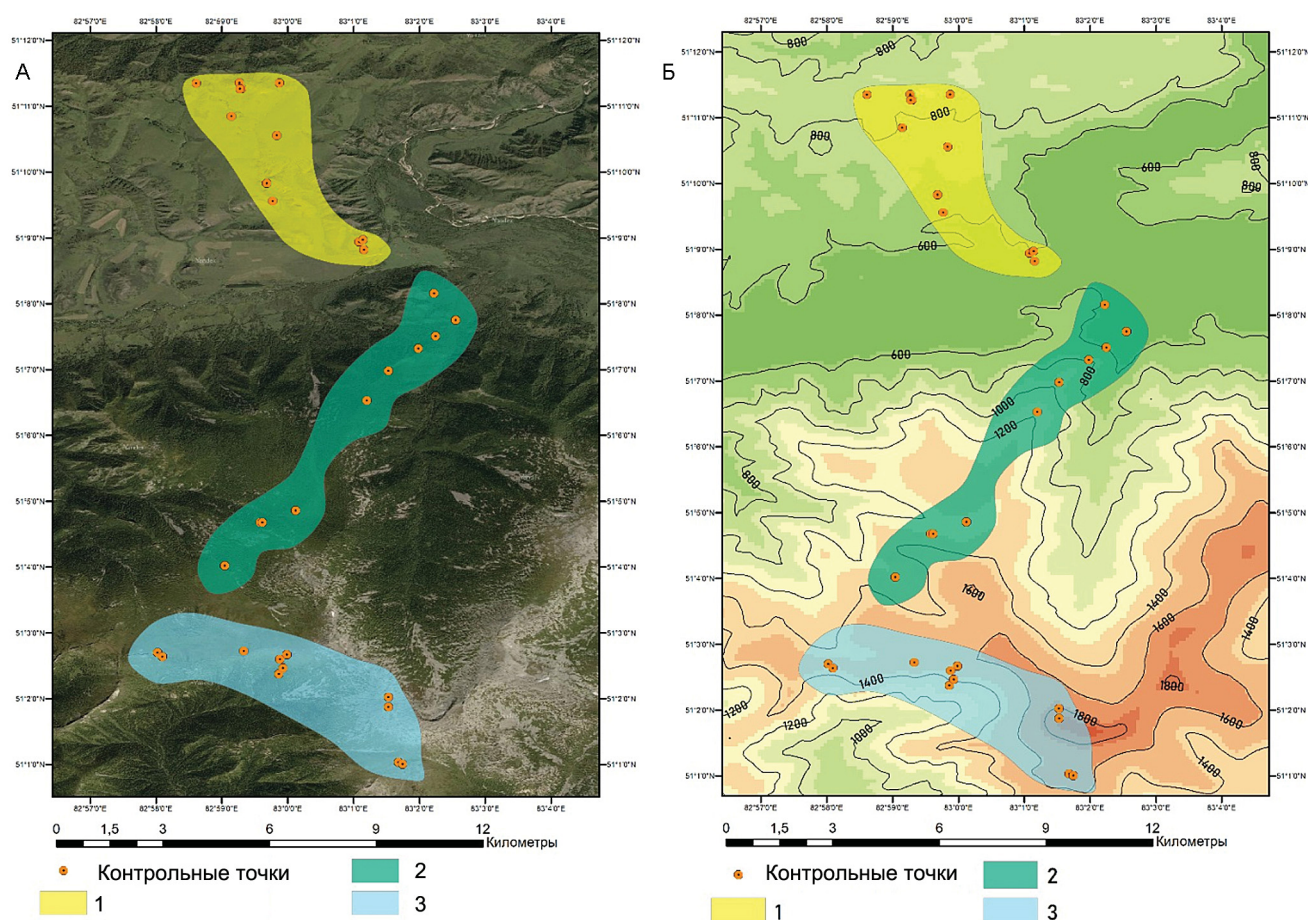


Рис. Расположение ключевых участков исследования: А – на снимке LANDSAT; Б – на гипсометрической карте, построенной по данным SRTM, разрешение 30 м; участки: 1 – «Степной»; 2 – «Лесной»; 3 – «Горный»

Fig. Location of study sites on the LANDSAT image (A) and a map based on SRTM data, 30 m resolution (B); sites: 1 – “Stepnoy”; 2 – “Lesnoy”; 3 – “Gorny”

Таблица 1

Распределение точек опробования и отобранных образцов по ключевым участкам

Ключевой участок	«Степной»	«Тажный»	«Альпийский»	Всего
Число точек опробования	9	12	12	33
Число отобранных проб	47	38	17	102

женном в высотном диапазоне 480–1370 м и приуроченном к северному склону Тигирекского хребта, обследовано 12 точек, отобрано 38 проб (см. табл. 1). Под березово-осиново-пихтовыми (*Abies siberica*, *Populus tremula*, *Betula pendula*), высокотравно-папоротниково-злаковыми (*Calamagrostis obtusata*, *Brachypodium sylvaticum*, *Pteridium aquilinum*, *Athyrium filix-femina*, *Galium odoratum*) сообществами черневой тайги распространены темно-серые и серые почвы (высоты 500–600 м); под осиново-пихтовыми (*Abies siberica*, *Populus tremula*), высокотравными (*Aconitum septentrionale*, *Delphinium elatum*, *Angelica sylvestris*, *A. decurrens*, *Heracleum dissectum*) и высокотравно-папоротниковыми (*Pteridium aquilinum*, *Athyrium filix-femina*, *A. monomachii*) лесами преобладают буроземы (высоты 600–900 м), под кедрово-пихтовым (*Pinus sibirica*, *Abies siberica*), высокотравно-злаковым (*Calamagrostis obtusata*, *Calamagrostis langsdorffii*, *Poa sibirica*, *Millium efusum*, *Saussurea latifolia*, *Polemonium caeruleum*) черничным (*Vaccinium myrtillus*) лесом преобладают ржавоземы (высоты 900–1600 м).

Породы в пределах ключевого участка представлены гранитами и гранитоидами.

На ключевом участке «Альпийский», расположенном на высотах 1500–1900 м, описано 12 точек и отобрано 17 проб (см. табл. 1). В пределах альпийского и субальпийского поясов (высоты 1500–1900 м) преобладают органоаккумулятивные почвы, среди которых наибольшую площадь занимают серогумусовые под кулисными кедровыми (*Pinus sibirica*) редколесьями и злаково-высокотравными (*Veratrum lobelianum*, *Stemmacantha carthamoides*, *Euphorbia lutescens*, *Phlomis alpina*, *Bupleurum aureum*) лугами и перегнойные под разнотравно-осочково-злаковыми и травянисто-черничными (*Vaccinium myrtillus*, *Bergenia crassifolia*) ассоциациями.

Для всех отобранных образцов почв согласно стандартной методике проводилось определение pH водной суспензии потенциометрическим методом [Кречетов, Дианова, 2009]. Пулы органического вещества почв определялись методом бихроматного окисления в модификации Савича – Соколова [Соколов, 2009]. Предложенный

подход позволяет оценивать органические соединения по глубине их окисления при разных температурных условиях (высокотемпературном/холодном) и продолжительности. Общее количество доступного для окисления углерода определялось при высокотемпературном окислении раствором хромовой смеси при $t = 160^\circ\text{C}$ в течение 30 минут [Соколов, 2009]. Для определения содержания органического углерода трудно- и среднеокисляемой фракции окисление проводили в тех же условиях в течение 5 минут. Количество легкоокисляемой фракции (активного пула органического вещества) определено при холодном окислении раствором хромовой смеси (при $t = 20\text{--}25^\circ\text{C}$) в течение 10 минут. Разница величин окисляемости, полученных при 30- и 5-минутном нагревании, характеризует содержание трудноокисляемых соединений (пассивного пула органического вещества). Разница между результатами, полученными при 5-минутном высокотемпературном и 10-минутном холодном окислении, соответствует содержанию среднеокисляемых органических соединений (медленного пула органического вещества). Статистическая обработка полученных данных проведена с использованием пакета Statistica. Доверительный интервал средних значений в табл. 2 указан с уровнем значимости 95%.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ
И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Почвы горно-степных ландшафтов. Общее содержание органического углерода в гумусовых горизонтах почв Драгунского плато (участок «Степной») достаточно высоко и варьирует от 8 до 11%. Вниз по профилю происходит закономерное уменьшение содержания органического углерода – тем резче, чем меньше мощность почвенного профиля (наиболее резкое уменьшение характерно для карбопетроземов и карболитоземов, наименее – для черноземов и темногумусово-глеевых почв). В основном почвы формируются в условиях нейтральной и слабощелочной реакции среды (pH 6,7–7,6) в силу карбонатности почвообразующих пород; в редких случаях (характерно для темногумусово-глеевых почв) – слабокислой/нейтральной (pH 6,4–6,8).

Таблица 2

Соотношение фракций органических соединений в горизонтах горно-степных почв, %

Горизонт	Трудноокисляемые	Среднеокисляемые	Легкоокисляемые
Горно-степные почвы			
Гумусовый	28 ± 5,3	45 ± 4,7	26 ± 4,5
Срединный	46 ± 9,6	37 ± 9,5	17 ± 4,3
Горно-таежные почвы			
Органогенный	21 ± 5,9	41 ± 10,7	39 ± 13,0
Гумусовый	43 ± 7,9	32 ± 9,1	25 ± 4,4
Срединный	54 ± 4,9	25 ± 7,9	21 ± 7,4
Почвы альпийских и субальпийских ландшафтов			
Органогенный	20 ± 5,5	53 ± 6,6	27 ± 4,5
Гумусовый	19 ± 3,5	55 ± 4,5	24 ± 5,2

Группа среднеокисляемых соединений составляет около половины от общего содержания органического вещества в гумусово-аккумулятивных горизонтах степных почв (см. табл. 2). Эта фракция в основном представлена гумусовыми соединениями [Соколов, 2012], образующимися в результате функционирования микробиоценоза, и составляет основную часть почвенного гумуса. Вниз по профилю, как правило, происходит увеличение доли трудноокисляемых соединений на фоне сокращения легкоокисляемых при относительно стабильной доле среднеокисляемых соединений. Высокая биологическая активность в верхних горизонтах почв приводит к росту доли легкоокисляемых соединений в составе органического вещества почв. В нижних, срединных горизонтах, в условиях более низких температур и затрудненного газообмена, происходит замедление функционирования почвенного биоценоза, что, в свою очередь, уменьшает поступление легкоокисляемых соединений. В результате этого процесса будет наблюдаться накопление обогащенных углеродом соединений, обладающих более высокой химической устойчивостью (трудноокисляемая фракция).

Сравнение соотношения различных фракций органических соединений в полнопрофильных (черноземы, серые) и слаборазвитых (карболитоземы, карбопелетоземы, темногомусовые) почвах свидетельствует о приблизительно одинаковой доле легкоокисляемых соединений в них (как при сравнении гумусовых, так и нижележащих горизонтов). При этом в черноземах и серых почвах доля трудноокисляемых соединений выше, а среднеокисляемых ниже, чем в карболитоземах и темногомусовых почвах. Таким образом, чем более развит почвенный профиль в горно-степных ландшафтах, тем выше в соответствующих почвах относительное накопление трудноокисляемой фракции орга-

нического углерода, а доля легкоокисляемой фракции не зависит от степени выраженности процесса почвообразования. Полученный вывод согласуется с общими представлениями о времени существования и накопления различных фракций органического углерода в почвах, дифференцированных по глубине протекания частных почвообразовательных процессов и их продолжительности, высказанными ранее [Семенов, Когут, 2015].

Таким образом, в почвах Драгунского плато на остепненных южных склонах формируются условия, благоприятствующие аккумуляции углерода медленного пула: высокая продуктивность разнотравно-злаковых фитоценозов [Усик и др., 2011] обеспечивает обильное поступление корневого опада, богатого соединениями целлюлозы и аминокислот [Семенов, Когут, 2015]; активность педофауны и микробиоценозов обуславливает интенсивность трансформации органических остатков и накопление наиболее устойчивых соединений почвенного гумуса. Стабильность аккумулируемых органических соединений, мало подверженных микробиологической трансформации, способствует формированию гумусового профиля с высоким содержанием органического углерода [Кононова, 1976; Ларионова и др., 2015], а степень развития почвенного профиля коррелирует с долей трудноокисляемой фракции пассивного (стабильного) пула органических соединений в составе почвенного органического вещества. По данным выполненного одномерного многофакторного дисперсионного анализа установлено, что для горно-степных ландшафтов с близким видовым составом растительности вариabельность доли легкоокисляемых соединений в гумусовых горизонтах черноземов и карболитоземов определяется крутизной склона.

Почвы горно-таежных ландшафтов. В отличие от почв степных ландшафтов Драгунского

плато, на поверхности почв таежных ландшафтов Тигирекского хребта формируется органо-генный горизонт подстилки мощностью 1–3 см. Реакция среды в подстилке и гумусовых горизонтах существенно ниже, чем в описанных выше степных почвах – она слабокислая в серых почвах и буроземах (5,2–6,4) и кислая в ржавоземах (4,3–5,0). Для гумусовых горизонтов почв участка «Таежный» характерно меньшее содержание органического углерода, чем для почв участка «Степной»: оно составляет от 2,9 до 4,8% в серых почвах, 4,1–4,5% – в буроземах и 5,1–5,8% – в ржавоземах. Повышенное содержание органического углерода в ржавоземах может быть обусловлено низкой микробиологической активностью в условиях кислой среды, обеспечивающей консервацию углерода, а также переувлажненностью почв. Вниз по почвенному профилю наблюдается постепенное снижение содержания органического углерода – в срединных горизонтах почв на глубинах более 0,5 м оно колеблется от 1 до 2%. Это может быть вызвано снижением объемов корневого опада, а также выносом растворимых органических соединений в нижние горизонты в условиях интенсивных осадков.

Для почв горно-таежных ландшафтов характерна приблизительно одинаковая доля легко- и среднеокисляемых соединений в органо-генных горизонтах, средне- и трудноокисляемых соединений в гумусовых горизонтах и явное преобладание трудноокисляемых соединений в срединных горизонтах (см. табл. 2). Таким образом, общий тренд на увеличение доли трудноокисляемых соединений с глубиной (в пределах минеральной части профиля), как это было показано и в почвах участка «Степной», повторяется в горно-таежных почвах. Однако в последних увеличение доли трудноокисляемых соединений происходит на фоне сокращения доли среднеокисляемой фракции при относительно стабильной доле легкоокисляемых соединений. В почвах участка «Степной» наблюдается обратная тенденция: рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения доли легкоокисляемых при относительно стабильной доле среднеокисляемых соединений. Повышенная (относительно почв остепненных южных склонов Драгунского плато) доля трудноокисляемых соединений как в гумусовых, так и в срединных горизонтах почв Тигирекского хребта обуславливается присутствием в составе древостоя хвойных видов (*Abies sibirica*, *Pinus sibirica*) с относительно большим содержанием липидов и лигнина в хвое [Александрова, 1980; Schwendenmann, Pendall, 2008], а также особенностями корневых систем (стержневым строением [Колесников, 1974] и низкой долей боковых корневых волосков, определяющих поступление в почву

легкоокисляемых корневых экссудатов в течение периода вегетации). По-видимому, пониженная активность микроорганизмов в условиях кислой среды также способствует сокращению содержания гуминовых веществ, преобладающих в составе фракции среднеокисляемых соединений в почвах участка «Таежный». Проведенный одномерный многофакторный дисперсионный анализ показал, что вариабельность доли трудноокисляемых соединений в гумусовых горизонтах почв горно-лесных ландшафтов по сравнению с горностепными ландшафтами в наибольшей степени определяется различиями в видовом составе растительных сообществ.

Таким образом, отличительными чертами органического вещества почв горно-таежных ландшафтов являются формирование на поверхности почв горизонта подстилки с высокой долей соединений активного и медленного пулов, уменьшение доли соединений активного пула в гумусовом горизонте и увеличение доли органических соединений пассивного пула с глубиной по почвенному профилю.

Почвы альпийских и субальпийских ландшафтов. Почвы участка «Альпийский» – органо-аккумулятивные, преимущественно серогумусовые и перегнойные. Они маломощны и состоят, как правило, из органо-генного горизонта, подстилаемого гумусовым горизонтом и горизонтом, переходным к почвообразующей породе (либо непосредственно почвообразующей породой). В отличие от почв участка «Таежный», органо-генный горизонт является торфяным или перегнойным. Как правило, почвы формируются в условиях кислой и слабокислой реакции среды (pH варьирует от 4,7 до 5,7), некоторые серогумусовые почвы характеризуются сильнокислыми значениями pH в верхнем органо-генном горизонте (4,0). Для почв характерно резкое снижение содержания органического углерода с глубиной: в гумусовом горизонте содержание $C_{орг}$ варьирует от 6 до 15%, в нижележащем – не более 2%.

В почвах альпийских и субальпийских ландшафтов по всему профилю преобладают среднеокисляемые органические соединения (см. табл. 2). Наименьшая доля в составе органического вещества приходится на трудноокисляемые соединения. Низкая интенсивность микробиологического разложения (по-видимому, из-за кислой реакции среды и пониженной температуры почв) определяет близость соотношения окислительных фракций органического вещества в гумусовых и органо-генных горизонтах этих почв. Пониженное содержание трудноокисляемых соединений обуславливается преобладанием травянистых видов в составе фитоценозов, обеспечивающих почву соединениями легко- и среднеокисляемой фракций [Семенов и др., 2009]. Близкий состав корневого опада участ-

ков «Альпийский» и «Степной» обуславливает похожие соотношения различных фракций органического углерода в гумусовых горизонтах почв этих участков. Более высокая доля трудноокисляемых соединений в гумусовом горизонте разнотравно-злаковых фитоценозов степных ландшафтов в сравнении с травянистыми ассоциациями субальпийского и альпийского поясов, по-видимому, является результатом более глубокой гумификации в условиях высокой активности степных микробиоценозов. Этому способствуют более высокие температуры окружающей среды и нейтральная реакция почв, в результате чего происходит микробиологическое разложение не только легко-, но и среднеокисляемых соединений. Сравнение органического вещества почв субальпийских ландшафтов, приуроченных к северным и южным склонам Тигирекского хребта, показывает, что на склонах южной экспозиции отмечается повышенная доля трудно- и среднеокисляемых соединений, тогда как на склонах северной экспозиции отмечается увеличение доли легкоокисляемых соединений. Склоны разной экспозиции определяют изменение гидротермических условий почв и, следовательно, величину их биологической активности, глубину гумификации растительных остатков.

Таким образом, отличительной чертой почв альпийских и субальпийских ландшафтов является стабильность соотношения различных пулов органических веществ в пределах почвенного профиля при общем преобладании медленного пула.

В работах, посвященных почвам высотного спектра Альп [Siles et al., 2016, Siles et al., 2017], показано, что степень гумификации органического вещества, оцениваемая по доле ароматических соединений в составе почвенного гумуса, увеличивается при переходе от почв лесного пояса к альпийскому. Данная особенность может косвенно свидетельствовать об увеличении содержания органического углерода медленного пула (представленного в том числе и ароматическими соединениями) в почвах лесного пояса в сравнении с почвами альпийского, что согласуется с выявленной в настоящей работе тенденцией. Сравнение полученных данных по содержанию органического углерода различных пулов с усредненными данными по широкому спектру почв, включающих агрогенно-трансформированные [Семенов и др., 2004; Schwendenmann, Pendall, 2008; Семенов и др., 2009], показывает, что в исследованных почвах горных ландшафтов Алтая заметно (в два и более раз) увеличена доля активного пула органического вещества. Данная особенность может быть обусловлена фоновым состоянием исследованных почв. При агрогенной трансформации происходит микробиологическая

активизация из-за улучшения аэрируемости в результате вспашки и внесения удобрений. В результате данных процессов происходит резкое сокращение доли соединений активного пула органического вещества почв. На уменьшение доли соединений активного пула от всего органического вещества агрогенных почв указывали и другие исследователи [von Lützow et al., 2007; Пулы и потоки..., 2007; Семенов и др., 2008; Семенов, Когут, 2015; Ларионова и др., 2015a]. Отсутствие данных о содержании различных пулов органического вещества почв гор Южной Сибири, а также высокое разнообразие ландшафтных условий в пределах ключевых участков свидетельствуют о важном теоретическом и прикладном значении полученных данных не только для территории Тигирекского заповедника, но и для гор Южной Сибири в целом.

ВЫВОДЫ

Видовой состав растительных сообществ, свойства почв и гидротермические условия определяют интенсивность микробиологической трансформации органического вещества и соотношение легко-, средне- и трудноокисляемых соединений органического углерода в почвах горно-степных, горно-таежных, альпийских и субальпийских ландшафтов Тигирекского заповедника.

Для органического вещества почв горно-степного, субальпийского и альпийского поясов характерна высокая доля среднеокисляемых соединений за счет преобладания в составе растительных сообществ травянистых видов с высокой долей целлюлозы и аминокислот в опаде. Повышенное содержание трудноокисляемых соединений в гумусовом горизонте почв горно-степных ландшафтов в сравнении с почвами субальпийского и альпийского поясов – результат более глубокой гумификации в условиях высокой активности микробиоценозов из-за благоприятных гидротермических и кислотно-основных условий почв.

Почвы горно-таежных ландшафтов характеризуются большей долей трудноокисляемых органических соединений в сравнении с почвами горно-степных, альпийских и субальпийских ландшафтов за счет преобладания в составе растительных ассоциаций древесных видов, опад которых обогащен лигнином.

Доля трудноокисляемых органических соединений возрастает с глубиной в горно-степных и горно-таежных почвах. При этом в горно-таежных почвах рост доли трудноокисляемых соединений происходит за счет сокращения доли среднеокисляемых соединений. В горно-степных почвах наблюдается обратная тенденция – сокращение доли

легкоокисляемой фракции на фоне относительно стабильной доли среднеокисляемой. Для почв альпийских и субальпийских ландшафтов характерна

стабильность соотношения легко-, средне- и трудноокисляемых соединений органического вещества в пределах почвенного профиля.

Благодарности. Работа выполнена в рамках Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова «Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды» и при финансовой поддержке гранта Президента Российской Федерации МК-1133.2020.5.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Александрова Л.Н. Органическое вещество почвы и процессы его трансформации. М.: Наука, 1980. 288 с.
- Давыдов Е.А., Бочкарева Е.Н., Черных Д.В. Краткая характеристика природных условий Тигирекского заповедника // Труды Тигирекского заповедника. 2011. № 4. С. 7–19.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Функции почв в биосфере и экосистемах (экологическое значение почв). М.: Наука, 1990. 262 с.
- Классификация и диагностика почв России / Л.Л. Шишов, В.Д. Тонконогов, И.И. Лебедева, М.И. Герасимова. Смоленск: Ойкумена, 2004. 341 с.
- Колесников А.И. Декоративная дендрология. М.: Лесная промышленность, 1974. 704 с.
- Кононова М.М. Формирование гумуса в почве и его разложение // Успехи микробиологии. 1976. Т. 11. С. 134–151.
- Кречетов П.П., Дианова Т.М. Химия почв. Аналитические методы исследования: учеб. пособие. М.: Географический факультет МГУ, 2009. 148 с.
- Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Квиткина А.К., Евдокимов И.В., Быховец С.С., Стулин А.Ф., Кузяков Я.В., Кудеяров В.Н. Оценка устойчивости почвенного органического вещества на основе различных видов фракционирования и изотопных методов ^{13}C // Почвоведение. 2015а. № 2. С. 175–187.
- Ларионова А.А., Золотарева Б.Н., Колягин Ю.Г., Квиткина А.К., Каганов В.В., Кудеяров В.Н. Состав структурных фрагментов и интенсивность минерализации органического вещества почв зонального ряда // Почвоведение. 2015б. № 10. С. 1232–1241.
- Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России / В.Н. Кудеяров, Г.А. Заварзин, С.А. Благодатский и др. Ин-т физ.-хим. и биол. проблем почвоведения РАН. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Рубанов Л.Ф., Иванов В.А. Государственный природный заповедник «Тигирекский»: местоположение и границы // Труды Тигирекского заповедника. 2005. № 1. С. 7–10.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А. Роль растительной биомассы в формировании активного пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2004. № 11. С. 1350–1359.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Кузнецова Т.В., Семенова Н.А., Ходжаева А.К. Биокинетическая индикация минерализуемого пула органического вещества почвы // Почвоведение. 2007. № 11. С. 1352–1361.
- Семенов В.М., Иванникова Л.А., Тулина А.С. Стабилизация органического вещества в почве // Агрохимия. 2009. № 10. С. 77–96.
- Семенов В.М., Козут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.
- Семенов В.М., Тулина А.С. Сравнительная характеристика минерализуемого пула органического вещества в почвах природных и сельскохозяйственных экосистем // Агрохимия. 2011. № 12. С. 53–63.
- Соколов Д.А. Окислительно-восстановительные процессы в почвах техногенных ландшафтов: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Новосибирск, 2009. 18 с.
- Соколов Д.А. Специфика определения органических веществ педогенной природы в почвах техногенных ландшафтов Кузбасса // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2012. № 2. С. 17–25.
- Усик Н.А., Маслова О.М., Голяков П.В. Сосудистые растения Тигирекского заповедника (аннотированный список видов) // Труды Тигирекского заповедника. 2011. № 4. С. 36–53.
- Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, vol. 262, p. 101–111, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- Andrea F., Bini C., Amaducci S. Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies, *Applied Soil Ecology*, 2018, vol. 123, p. 693–698, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.031.
- Bhattacharya S.S., Kim K.H., Das S., Uchimiya M., Jeon B.H., Kwon E., Szulejko J.E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem, *Journal of environmental management*, 2016, vol. 167, p. 214–227, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.042.
- Blum W.E.H. Functions of soil for society and the environment, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, vol. 4, no. 3, p. 75–79, DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.
- Carrillo Y., Pendall E., Dijkstra F.A., Morgan J.A., Newcomb J.M. Response of soil organic matter pools to elevated CO_2 and warming in a semi-arid grassland, *Plant and Soil*, 2011, vol. 347, no. 1–2, p. 339, DOI: 10.1007/s11104-011-0853-4.
- Cavalcante D.M., Castro M.F., Chaves M.T.L., Silva I.R., Oliveira T.S. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 105668, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105668.
- Guan S., An N., Zong N., He Y., Shi P., Zhang J., He N. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 116, p. 224–236, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.10.011.

- Ji H., Han J., Xue J., Hatten J.A., Wang M., Guo Y., Li P. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 716, p. 136996, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136996.
- Lützow von M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, vol. 39, no. 9, p. 2183–2207, DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.
- Paul E.A., Morris S.J., Conant R.T., Plante A.F. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, vol. 70, no. 3, p. 1023–1035, DOI: 10.2136/sssaj2005.0103.
- Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Management*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Schwendenmann L., Pendall E. Response of soil organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation, *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 44, no. 8, p. 1053, DOI: 10.1007/s00374-008-0294-2.
- Siles J.A., Cajthaml T., Minerbi S., Margesin R. Effect of altitude and season on microbial activity, abundance and community structure in Alpine forest soils, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 3, p. fiw008, DOI: 10.1093/femsec/fiw008.
- Siles J.A., Cajthaml T., Filipova A., Minerbi S., Margesin R. Altitudinal, seasonal and interannual shifts in microbial communities and chemical composition of soil organic matter in Alpine forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, vol. 112, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.04.014.
- Zhang L., Chen X., Xu Y., Jin M., Ye X., Gao H., Chu W., Thompson M.L. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation, *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1038/s41598-020-68163-3.
- Zhu L., Hu N., Zhang Z., Xu J., Tao B., Meng Y. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice – wheat cropping system, *Catena*, 2015, vol. 135, p. 283–289, DOI: 10.1016/j.catena.2015.08.008.

Поступила в редакцию 01.10.2020

После доработки 05.04.2021

Принята к публикации 02.06.2021

SOIL ORGANIC MATTER OF THE ALTAI MOUNTAIN LANDSCAPES (CASE STUDY OF THE TIGIREKSKY NATURE RESERVE)

D.R. Bardashov¹, P.P. Krechetov², M.A. Smirnova³

^{1–3} Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Department of Landscape Geochemistry and Soil Geography

³ Dokuchaev Soil Science Institute, Department of Soil Agroecological Assessment and Agroecosystem Practice, Senior Scientific Researcher

¹ Technician; e-mail: bardash@mail.ru

² Associate Professor; Ph.D. in Biology; e-mail: krechetov@mail.ru

³ Associate Professor; Ph.D. in Geography; e-mail: summerija@yandex.ru

The ratio of different fractions of soil organic matter is seen as an indicator of the level of biological activity and could be used to assess the ability of soil to accumulate stable organic compounds, including the deposition of atmospheric carbon. The territory of the Tigirek reserve is an example of the vertical landscape structure invariant free of the past and present anthropogenic pressure. So, it is possible to reveal the features of accumulation of organic carbon of various oxidation states, which characterizes the ratio of labile and stable C pools of soil organic matter. It is shown that organic compounds in soils of mountain-steppe, subalpine and alpine belts are characterized by a higher proportion of moderately oxidized compounds (>28%) due to the predominance of herbaceous species in plant communities with a high content of cellulose and amino sugars in the litter. The soils of mountain-taiga landscapes are characterized by a higher proportion of hard-to-oxidize compounds (up to 60%) in comparison with the soils of mountain-steppe (up to 55%), alpine and subalpine belts (up to 27%), due to the predominance of tree species in plant communities with significantly higher lignin content in the litter. The share of hard-to-oxidize compounds in mountain-steppe and mountain-taiga soils increases with depth. At the same time, an increase in the proportion of difficult-to-oxidize compounds in mountain taiga soils is due to decreasing proportion of moderately oxidizable compounds (from 32 ± 9.1 to $25 \pm 7.9\%$) with a relatively stable proportion of easily oxidized ones (about 23%). The opposite tendency is observed in mountain-steppe soils: a decrease in the proportion of easily oxidized fraction (from 26 ± 4.5 to 17 ± 4.3) against the background of a relatively stable proportion of moderately oxidized one (about 41%). The soils of alpine and subalpine landscapes are characterized by a stable ratio of easily (15–25%), medium (47–60%) and hardly oxidizable (19–31%) compounds of organic matter within the soil profile, due to low thickness of the soil profile and

reduced microbial activity under acidic environment and unfavorable climatic conditions.

Keywords: carbon cycle, soil organic carbon pools, humus, chernozems, burozems, meadow soils

Acknowledgements. The study was carried out under the Lomonosov MSU Interdisciplinary Scientific and Education School “Future of the Planet and the Global Environmental Change” and financially supported by the RF President’s grant (MK-1133.2020.5).

REFERENCES

- Adhikari K., Hartemink A.E. Linking soils to ecosystem services – A global review, *Geoderma*, 2016, vol. 262, p. 101–111, DOI: 10.1016/j.geoderma.2015.08.009.
- Andrea F., Bini C., Amaducci S. Soil and ecosystem services: Current knowledge and evidences from Italian case studies, *Applied Soil Ecology*, 2018, vol. 123, p. 693–698, DOI: 10.1016/j.apsoil.2017.06.031.
- Aleksandrova L.N. *Organicheskoe veshchestvo pochvy i protsessy ego transformatsii* [Soil organic matter and processes of its transformation], Moscow, Nauka Publ., 1980, 288 p. (In Russian)
- Bhattacharya S.S., Kim K.H., Das S., Uchimiya M., Jeon B.H., Kwon E., Szulejko J.E. A review on the role of organic inputs in maintaining the soil carbon pool of the terrestrial ecosystem, *Journal of environmental management*, 2016, vol. 167, p. 214–227, DOI: 10.1016/j.jenvman.2015.09.042.
- Blum W.E.H. Functions of soil for society and the environment, *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology*, 2005, vol. 4, no. 3, p. 75–79, DOI: 10.1007/s11157-005-2236-x.
- Carrillo Y., Pendall E., Dijkstra F.A., Morgan J.A., Newcomb J.M. Response of soil organic matter pools to elevated CO₂ and warming in a semi-arid grassland, *Plant and Soil*, 2011, vol. 347, no. 1–2, p. 339, DOI: 10.1007/s11104-011-0853-4.
- Cavalcante D.M., Castro M.F., Chaves M.T.L., Silva I.R., Oliveira T.S. Effects of rehabilitation strategies on soil aggregation, C and N distribution and carbon management index in coffee cultivation in mined soil, *Ecological Indicators*, 2019, vol. 107, p. 105668, DOI: 10.1016/j.ecolind.2019.105668.
- Davydov E.A., Bochkareva E.N., Chernykh D.V. [Brief description of the natural conditions of the Tigirekskiy reserve], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2011, no. 4, p. 7–19. (In Russian)
- Dobrovol'skii G.V., Nikitin E.D. *Funktsii pochv v biosfere i ekosistemakh (ekologicheskoe znachenie pochv)* [Functions of soils in the biosphere and ecosystems (ecological significance of soils)], Moscow, Nauka Publ., 1990, 262 p. (In Russian)
- Guan S., An N., Zong N., He Y., Shi P., Zhang J., He N. Climate warming impacts on soil organic carbon fractions and aggregate stability in a Tibetan alpine meadow, *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, vol. 116, p. 224–236, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.10.011.
- Ji H., Han J., Xue J., Hatten J.A., Wang M., Guo Y., Li P. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: Implication for carbon sequestration in wetlands, *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 716, p. 136996, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.136996.
- Klassifikacija i diagnostika pochv Rossii* [Classification and Diagnostic System of Russian Soils], Smolensk, Oikumen Publ., 2004, 341 p. (In Russian)
- Kolesnikov A.I. *Dekorativnaya dendrologiya* [Decorative dendrology], Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1974. (In Russian)
- Krechetov P.P., Dianova T.M. *Khimiya pochv. Analiticheskie metody issledovaniya* [Soil Chemistry. Analytical methods for soil research], Moscow, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 2009. 143 p.
- Larionova A.A., Zolotareva B.N., Kvitkina A.K., Evdokimov I.V., Bykhovets S.S., Kudеyarov V.N., Stulin A.F., Kuzyakov Ya.V. Assessing the stability of soil organic matter by fractionation and ¹³C isotope techniques, *Eurasian Soil Science*, 2015a, vol. 48, no. 2, p. 157–168, DOI: 10.1134/S1064229315020076.
- Larionova A.A., Zolotareva B.N., Kvitkina A.K., Kudеyarov V.N., Kolyagin Yu.G., Kaganov V.V., Composition of structural fragments and mineralization rate of organic matter in zonal soils, *Eurasian Soil Science*, 2015b, vol. 48, no. 10, p. 1110–1119, DOI: 10.1134/S1064229315100063.
- Lützwon von M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Flessa H., Guggenberger G., Matzner E., Marschner B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms, *Soil Biology and Biochemistry*, 2007, vol. 39, no. 9, p. 2183–2207, DOI: 10.1016/j.soilbio.2007.03.007.
- Paul E.A., Morris S.J., Conant R.T., Plante A.F. Does the acid hydrolysis-incubation method measure meaningful soil organic carbon pools? *Soil Science Society of America Journal*, 2006, vol. 70, no. 3, p. 1023–1035, DOI: 10.2136/sssaj2005.0103.
- Puly i potoki ugleroda v nazemnykh ekosistemakh Rossii* [Pools and fluxes of carbon in terrestrial ecosystems of Russia], V.N. Kudеyarov, G.A. Zavarzin, S.A. Blagodat'skii et al. In-t fiz.-khim. i biol. problem pochvovedeniya RAN, Moscow, Nauka Publ., 2007, 315 p.
- Rubanov L.F., Ivanov V.A. [Tigirekskiy Nature Reserve: location and borders], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2005, no. 1, p. 7–10. (In Russian)
- Scharlemann J.P., Tanner E.V., Hiederer R., Kapos V. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool, *Carbon Management*, 2014, vol. 5, no. 1, p. 81–91, DOI: 10.4155/cmt.13.77.
- Schwendenmann L., Pendall E. Response of soil organic matter dynamics to conversion from tropical forest to grassland as determined by long-term incubation, *Biology and Fertility of Soils*, 2008, vol. 44, no. 8, p. 1053, DOI: 10.1007/s00374-008-0294-2.

- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A. The role of plant biomass in the formation of an active pool of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2004, vol. 37, no. 11, p. 1196–1204.
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Kuznetsova T.V., Semenova N.A., Khodzhaeva A.K. Biokinetic indication of the mineralizable pool of soil organic matter, *Eurasian Soil Science*, 2007, vol. 40, no. 11, p. 1208–1216, DOI: 10.1134/S1064229307110099.
- Semenov V.M., Ivannikova L.A., Tulina A.S. Stabilizatsiya organicheskogo veshchestva v pochve [Stabilization of organic matter in soil], *Agrokimiya*, 2009, no. 10, p. 77–96. (In Russian)
- Semenov V.M., Kogut B.M. *Pochvennoe organicheskoe veshchestvo* [Soil organic matter], Moscow, GEOS Publ., 2015, 233 p. (In Russian)
- Semenov V.M., Tulina A.S. Sravnitel'naya kharakteristika mineralizuemogo pula organicheskogo veshchestva v pochvakh prirodnikh i sel'skokhozyaistvennykh ekosistem [Comparative characteristics of the mineralizable pool of organic matter in the soils of natural and agricultural ecosystems], *Agrokimiya*, 2011, no. 12, p. 53–63. (In Russian)
- Siles J.A., Cajthaml T., Minerbi S., Margesin R. Effect of altitude and season on microbial activity, abundance and community structure in Alpine forest soils, *FEMS Microbiology Ecology*, 2016, vol. 92, no. 3, p. fiw008, DOI: 10.1093/femsec/fiw008.
- Siles J.A., Cajthaml T., Filipova A., Minerbi S., Margesin R. Altitudinal, seasonal and interannual shifts in microbial communities and chemical composition of soil organic matter in Alpine forest soils, *Soil Biology and Biochemistry*, 2017, vol. 112, p. 1–13, DOI: 10.1016/j.soilbio.2017.04.014.
- Sokolov D.A. *Okislitel'no-vosstanovitel'nye protsessy v pochvakh tekhnogennykh landshaftov* [Redox processes in soils of technogenic landscapes], Ph.D. Thesis in Biology, Novosibirsk, 2009, 18 p. (In Russian)
- Sokolov D.A. Spetsifika opredeleniya organicheskikh veshchestv pedogennoi prirody v pochvakh tekhnogennykh landshaftov Kuzbassa [Specificity of determination of pedogenic organic substances in soils of technogenic landscapes of Kuzbass], *Vestn. Tomskogo gos. un-ta, Biologiya*, 2012, no. 2, p. 17–25. (In Russian)
- Usik N.A., Maslova O.M., Golyakov P.V. [Vascular plants of the Tigirekskiy Nature Reserve (an annotated list of species)], *Trudy Tigirekskogo zapovednika* [Proc. of the Tigirekskiy Nature Reserve], 2011, no. 4. (In Russian)
- Zhang L., Chen X., Xu Y., Jin M., Ye X., Gao H., Chu W., Thompson M.L. Soil labile organic carbon fractions and soil enzyme activities after 10 years of continuous fertilization and wheat residue incorporation, *Scientific reports*, 2020, vol. 10, no. 1, p. 1–10, DOI: 10.1038/s41598-020-68163-3.
- Zhu L., Hu N., Zhang Z., Xu J., Tao B., Meng Y. Short-term responses of soil organic carbon and carbon pool management index to different annual straw return rates in a rice-wheat cropping system, *Catena*, 2015, vol. 135, p. 283–289, DOI: 10.1016/j.catena.2015.08.008.

Received 01.10.2020

Revised 05.04.2021

Accepted 02.06.2021