

Пути секвестрации углерода при землепользовании (обзор литературы)

Г. Д. ЧИМИТДОРЖИЕВА

Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6
E-mail: galdorj@gmail.com

Статья поступила 29.11.2022

После доработки 07.01.2023

Принята к печати 09.01.2023

АННОТАЦИЯ

Обзор посвящен глобальной экологической проблеме современности – снижению парниковых газов в атмосфере. Значительная его доля депонируется в почвах. Обсуждаются меры, способствующие секвестрации углерода при землепользовании, поскольку почвы и леса, наряду с мировым океаном, являются основными хранителями CO₂. Внимание уделено типам землепользования (целина, пашня, пастбищные, лесные земли). Приведен материал по обработкам земель: нулевой, стандартный с оставлением растительных остатков и без них; с применением биоугля, микроводорослей. Рассмотрен сравнительный анализ с использованием биомаркеров на пастбище со смешанным травостоем, пашне с рапсом, в почве под ивой с целью определения микроорганизмов, ассимилирующих углерод ризоотложений различных растений. Встречаются работы, доказывающие важность гидролизуемых липидов в лесах, составляющих, в отличие от фенола лигнинов, высокую долю в накоплении почвенного органического углерода (SOC). Они возрастают с уменьшением pH почвы, увеличением реактивного железа и алюминия и увеличением окисления лигнина. SOC выше в илистых и глинистых фракциях, чем в песчаных, защищая SOC в их агрегатах. Отсюда для определения стабилизации его в большинстве почв предлагается использовать в качестве ключевого элемента мелкодисперсную минеральную фракцию. Карбонаты играют важную роль в секвестрации углерода, на его долю приходится примерно 40 % углерода, хранящегося в почвах мира. Они являются основным компонентом накопления углерода в засушливых регионах. Внимание обращено к коренному улучшению пастбищ, инверсионной обработке (FIT). Приведен материал методического характера, где используются дистанционные методы (ДЗ), обнаруживающие SOC. В качестве прогноза используются предикторы ДЗ – как ближний инфракрасный, так и коротковолновый инфракрасный диапазон, с дополнительными фенологическими наблюдениями. Использование отраженной коротковолновой радиации в верхней атмосфере, большой потенциал смягчения климата оказали большое влияние на культивирование покровной культуры с высоким альбедо и недостатком хлорофилла.

Ключевые слова: секвестрация углерода, типы землепользования, обработка почвы, микроорганизмы.

ВВЕДЕНИЕ

Сценарий глобального изменения климата оказывает самые большие последствия на сельское хозяйство наряду с другими воздействиями на почву. Однако на международ-

ном уровне сформировалось понимание, что сельское хозяйство станет источником технологий, обеспечивающих секвестрацию парниковых газов (ПГ) из атмосферы [Битва за климат..., 2021]. В этих обстоятельствах сельское и лесное хозяйства стали одними из ключе-

вых элементов ответа России на климатические угрозы. Почвенные ресурсы РФ, составляя 1586,7 млн га, в слое почвы 0–30 см имеют в запасе 167,3 млрд т С, а совместно с гетеротрофными организмами – 170. С одной стороны, на долю сельского хозяйства приходится примерно 30 % от общих выбросов ПГ, главным образом за счет использования удобрений, пестицидов и навоза, выбросы которых недооценены. С другой, ПГ включают N_2O и CH_4 , которые внося лепту, оказывают сильное воздействие на устойчивость сельского хозяйства. Качество почвы и устойчивость окружающей среды в основном определяются органическим углеродом почвы (SOC) [Yadav et al., 2018]. Углеродный цикл также зависит от SOC [Lal, 2018]. Землепользование и климат являются сильными факторами, влияющими на SOC [Lal, 2008]. Они регулируют прилипание SOC в почвенных частицах [Six et al., 2002; Wani et al., 2022]. Отсюда углерод играет ключевую роль не только в сельскохозяйственном производстве, но и в планетарном плане, депонируя атмосферный углерод в почвах. Почвенный углерод контролирует основную долю углеродного цикла во всем мире, но существуют различные факторы, определяющие его масштабы, основными из которых являются изменения в землепользовании и методы управления [Wani et al., 2022]. Почва – основной глобальный поглотитель углерода, хранящий в 2–3 раза больше углерода, чем растительность. Использование земли и факторы ее управления определяют, является ли почва источником или поглотителем углерода в атмосфере. Истощение SOC вызвано преобразованием естественных местообитаний в культивируемые системы. Однако рост растений на заброшенной земле увеличивает способность накапливать углерод.

По данным В. С. Столбового [2020], почвы России характеризуются повышенным, по отношению к другим странам мира, запасом почвенного органического вещества (ПОВ). Так, доля органического углерода в слое 0,3 м почв России составляет около 23 % от глобальных запасов, в слое почв 1,0 м – почти 19 [Битва за климат..., 2021]. По данным [Stolbovoy, Ivanov, 2014], на современном этапе в России сложилось квазиравновесное состояние ПОВ. Это находит подтверждение при расчете баланса углерода в сельскохозяй-

ственных почвах России. Говоря о почвах в целом, включая углерод, накапливаемый в естественной природной среде и составляющий 76 млн т С в год, суммарный объем ежегодной его регенерации почвами России (гумус/углерод сберегающие технологии плюс естественная динамика) может достигать 160–190 млн т С, что составит 25–30 % от национальной цели в рамках глобальной инициативы “4 промилле” [Minasny et al., 2017]. Необходимо отметить, что переход на регенеративные технологии сельскохозяйственного производства – главный тренд развития современности. Цель работы – провести анализ имеющихся в литературе данных по секвестрации углерода при разных типах землепользования.

ОБСУЖДЕНИЕ

1. В первую очередь многие авторы относительное повышение углерод-секвестрирующей способности почвы связывают с минимизацией обработки [Шарков, 2009; Кудеяров, 2019]. В результате многолетних опытов И. Н. Шарковым и П. В. Антипиной [2022] сделан вывод о том, что пахотные земли могут играть существенную роль в секвестрации атмосферного CO_2 только после их перевода в залежь.

2. Q. Zhang et al. [2022] приведены результаты долгосрочного эксперимента по обработке почвы с целью выявления взаимосвязи между агрегатами почвы, запасами углерода, секвестрацией его в почве и выбросами. Ими использованы четыре приема обработки почвы: а) ротационная обработка почвы, состоящая из нулевой обработки почвы в первый год, традиционной обработки почвы на второй год, рыхление на третий год и трехлетний цикл (NCS); б) нулевая обработка (NT); в) рыхление (ST); г) традиционная обработка почвы (CT). После длительного эксперимента NCS и NT улучшился общий запас органического углерода (TOC) в почве на 14,4 и 9,0 % по сравнению с CT на глубине 0–40 см. Между тем NCS, NT, ST уменьшили выбросы углерода на 18,6–36,6 % за период наблюдения по сравнению с CT. Этот опыт показал, что минимизация обработки почвы приводит к увеличению доли почвенных агрегатов, увеличивая их средний весовой диаметр, а также средний геометрический

диаметр. Таким образом, повышение стабильности почвенных агрегатов улучшило запасы углерода, сократило выбросы его и увеличило секвестрацию в почве, т. е. агрегатная структура почвы напрямую способствует секвестрации углерода в почве. А защитное действие агрегатов на органический углерод снижает выбросы CO_2 .

3. Восемнадцатилетний (1998–2016) эксперимент A. Dutta et al. [2022] о влиянии длительного сжигания рисовых остатков по сравнению с его удержанием на накопление углерода, агрегацию почвы на Индо-Гангских равнинах (IGP) в системе рис-пшеница показал, что запахивание соломы увеличивало общее содержание SOC. NT (нулевая обработка) с добавленными остатками имел запас SOC на 25 % выше ($p < 0,05$), чем стандартная обработка (CT) без остатков. Доля макроагрегата была выше в NT на 18 % ($p < 0,05$), чем в CT, на глубине 0–5 см. Отсутствие механической обработки почвы в NT с добавлением пожнивных остатков в течение многих лет способствовало образованию мостиков между агрегатами, что привело к накоплению углерода. В исследовании подчеркивается важность защитного земледелия (CA) для увеличения запасов SOC, агрегации почвы и управления долгосрочным содержанием SOC.

4. P. Panchal et al. [2022] доказали, что связывание почвенного углерода выделениями корней растений является важным средством чистого удаления содержащегося в атмосфере CO_2 . Ризосферная среда в естественных экосистемах, таких как леса и пастбища, помогает стабилизировать корневые экссудаты в почве, в то время как условия на пахотных землях не благоприятны для стабилизации корневых экссудатов как источника SOC. Корневые экссудаты являются хорошо известными “лабильными” источниками почвенного углерода, которые стимулируют микробную активность. Авторы считают, что в лесах и пастбищах корневые экссудаты могут функционировать как источник SOC, который можно стабилизировать с помощью различных механизмов, ведущих к долгосрочной секвестрации. Увеличение связывания углерода почвой важно для улавливания атмосферного CO_2 и борьбы с проблемами изменения климата. Существует настоятельная необходимость в сохранении существующих экосистем и принятии

таких стратегий, как облесение, лесовозобновление и создание искусственных пастбищ, чтобы способствовать секвестрации углерода за счет увеличения поступления корневого экссудата в почву, считают авторы. Таким образом, сохранение лесов и лугов с видами растений, выделяющими большое количество углеродных соединений, может увеличить содержание SOC в почве этих экосистем.

5. Имеются в литературе исследования, доказывающие влияние типов землепользования на изменение структуры микробного сообщества, опосредованного ризодепозитами, микробные сообщества используя их же, создают ключевой процесс, связывающий атмосферный и земной углерод [Zhou et al., 2022]. Около половины фотосинтезированного углерода переносится к корням вскоре после фиксации из атмосферы, а затем большая часть этого C высвобождается в почве посредством ризоотложения [Pausch, Kuzyakov, 2018]. В корневом C преобладают низкомолекулярные соединения, такие как простые углеводы, аминокислоты и органические кислоты, которые служат источником энергии для микроорганизмов [Eisenhauer et al., 2013]. В свою очередь это влияет на содержание углерода в почве [Zhou et al., 2022a], стимулируя микробную активность [Liu et al., 2019]. Хотя до 50 % микробной активности в почве обусловлено недавно ассимилированным углеродом растений, понимание подземного потока углерода и его распределения между микробными группами по типам землепользования все еще ограничено [Frey, 2019]. Микробные группы, ассимилировавшие ризодепозиты, сильно влияют на круговорот и накопление наземного углерода, а также на типы землепользования [Elias et al., 2017].

Следовательно, растительность под разными типами землепользования могут дополнительно влиять на структуру микробного сообщества и, следовательно, на циклы углерода. В естественных экосистемах деревья и травы отдают около 30 % своего общего ассимилируемого углерода микоризным грибам в обмен на азот и/или фосфор [Zhou et al., 2022a].

В отличие от трав и деревьев, микориза не играет большой роли в агроэкосистеме. Например, бобовые, включенные в севооборот, увеличивают Н-обильные экссудаты и изменение качества корневого опада/ризоотложе-

ний, тем самым предпочитая бактерии грибам [Zhou et al., 2017; Moreno et al., 2021]. Например, экссудаты ивы обогащены веществами с низким содержанием C : N [Koranda et al., 2011], поэтому способствуют утилизации углерода корнями грамположительными бактериями и сапротрофными грибами [Bell et al., 2009]. Таким образом, любые изменения в количестве и/или составе поступающего в почву растительного углерода в зависимости от типа землепользования, вероятно, повлияют на микробные сообщества почвы [Gunina et al., 2017]. Однако различные микробные группы связаны с конкретными функциями экосистемы. Грамотрицательные бактерии преобладают в разложении лабильного C (например, сахаров) [Dippold et al., 2014], в то время как грамположительные бактерии изобилуют в местах с более стойкими источниками углерода (например, целлюлозой и лигнином). Сапротрофные грибы обладают широкими ферментативными возможностями и преобладают в разложении сложных органических соединений [Baldrain, Valášková, 2008]. Кроме того, арбускулярные микоризные грибы могут усиливать накопление C за счет образования агрегаций [Drigo et al., 2010]. Следовательно, различия в микробных группах по типам землепользования могут еще больше изменить транслокацию подземного углерода [Shi et al., 2018]. Исследование авторов было направлено: а) на оценку включения фотосинтетического углерода в микроорганизмы в зависимости от типа землепользования; б) на определение преобладающих микробных групп, использующих фотосинтетический C в зависимости от типа землепользования. Эксперименты проводились на трех видах землепользования: монокультуре (масличный рапс, *Brassica napus* L.), смешанном пастбище (доминирует *Lolium perenne* L., смешанный с клевером *Trifolium repens* L.) и на плантации деревьев (ива, *Salix schwerinii* EL Wolf и *Salix viminalis* L.) в системе агролесоводства.

Чтобы понять, как почвенные микроорганизмы используют растительный углерод в разных типах землепользования, связанных с различными компонентами растительности, применялась авторами $^{13}\text{CO}_2$ импульсная маркировка в сочетании с анализом фосфолипидов и жирных кислот (^{13}C -PLFA-SIP). Микоризные грибы имеют непосредственную связь

с растением-хозяином и поэтому более интенсивно, чем другие ризосферные микроорганизмы, реагируют на любые изменения корневого экссудата. Поэтому авторы предположили, что включение фотосинтетического углерода в микробные сообщества под пастбищами и ивой будет выше, чем под рапсом, из-за микоризации ивы и лугов. Учитывая, что ива может выделять более неподатливые субстраты [Zhou et al., 2022b], авторы предположили, что грибы и грамположительные бактерии будут доминировать в фотосинтезирующем включении углерода в почву под ивой по сравнению с рапсом и пастбищами.

6. J. Zhou et al. [2022a] показали, что системы агролесоводства характеризуются высокой сложностью между компонентами растительности и разделением ниш. В системе агролесомелиорации “культура – трава – дерево” рапс, злаки, ива подвергались импульсной метке *in situ* отдельно $^{13}\text{CO}_2$ в течение 6 ч для изучения влияния компонентов растительности на распределение C под землей. Восстановление ^{13}C в корнях через 28 дней составило 7,0 % от общего ассимилированного C для злаков, что в 3,5 и 5,2 раза выше, чем у рапса и ивы соответственно. Большее распределение углерода под землей на пастбищах объясняется более высоким соотношением корней и побегов по сравнению с ивой и рапсом. Пастбища способствовали более высокому накоплению корневого углерода в почве по сравнению с рапсом (9,2 % восстановленного ^{13}C) и по сравнению с ивой (1,6 % ^{13}C). Ива сохраняла больше фотосинтетического углерода над землей и меньше выделяла корням по сравнению с рапсом, хотя содержание углерода в верхнем 15-сантиметровом слое почвы было одинаковым для ивы и рапса. Чистое подземное поступление углерода в пастбища, иву и рапс составило 0,53, 0,06 и 0,10 г C м⁻²·мес⁻¹ вегетационного периода, включая ризоотложение 0,24, 0,05 и 0,04 г C м⁻²·мес⁻¹ соответственно. То есть углерод под землей больше депонируется под пастбищем.

7. Gulde et al. [2008], Yost J. L., Hartemink A. E. [2019] отмечают, что фракции ила и глины обладают способностью защищать SOC в агрегатах почвы. Почвенный органический углерод выше в илистых и глинистых фракциях, чем в песчаных, и, как правило,

выше всего во фракциях глины. Когда органическое вещество разлагается, оно связывается с илом и глиной, образуя агрегаты [Gulde et al., 2008], и увеличивается пропорционально содержанию ила и глины. Разложение SOC особенно ограничено в микроагрегатах и агрегатах ила и глины из-за слабой доступности кислорода и SOC для почвенных микробов, что обеспечивает более длительные возможности секвестрации [Torres-Sallan et al., 2018].

8. Добавление медленно разлагающихся почвенных добавок, таких как компост и биоуголь, также является важной управленческой стратегией для увеличения запасов органического углерода в почве [Paustian et al., 2016].

9. Г. В. Благовещенский, В. В. Конончук, С. М. Тимошенко [2019], основываясь на аналитической оценке результатов современных исследований, отраженных в докладах, представленных на 27-м Генеральном собрании Европейской федерации луговодов (Ирландия, Скорк, 17–21 июля 2018 г.), придают особую значимость почвам лугов как обладающим возможностью секвестрации атмосферного CO₂, обеспечивая потенциальную возможность смягчения воздействия климатических колебаний на агроценозы. Авторы отмечают, что секвестрация углерода в почвах лугов регулируется комплексом биохимических процессов, которые связаны как с применяемыми технологиями, так и особенностями окружающей среды. Помимо потенциального эффекта от внесения удобрений, отражающегося на сохранении в почве углерода, ключевую значимость имеет частота и интенсивность использования трав. При интенсивном стравливании около 25–40 % потребленной, но не переваренной биомассы возвращается на пастбище в виде экскрементов. Даже когда более 80 % наземной продукции убирается при интенсивных режимах скашивания для заготовки сена или силоса, углеродные потери могут компенсироваться путем применения навоза. На материалах результатов последних исследований, полученных в долгосрочных и краткосрочных опытах на лугах, авторы пришли к выводу о том, что ежегодная норма секвестрации изменяется в пределах 2,2 (потери) и 2,5 т/га (прибавка) С в год. Применение азота оказывает стимулирующий эффект на углеродную сохранность, понижение в глубь профиля распределения углерода корневой

массы и микоризы, размещение углерода в различных органических фракциях почвы, микробиальный состав и активность подавления гетеротрофного дыхания и др.

10. Микроводоросли обладают очень высоким потенциалом захвата углекислого газа (CO₂) и, таким образом, помогают смягчить парниковый эффект [Mona et al., 2021]. Это наиболее продуктивная биологическая система для производства биомассы. Высокая скорость роста и более высокая эффективность фотосинтеза водорослей по сравнению с наземными растениями делают их прекрасной альтернативой устойчивой окружающей среде. Более того, их можно выращивать в фотобиореакторах или открытых прудах, что, в свою очередь, снижает потребность в пахотных землях. Биоуголь, полученный из водорослей, богат питательными веществами и обладает свойством ионного обмена. В этом исследовании также обсуждаются применение водорослевого биоугля в биоперерабатывающем заводе и его экономические аспекты, проблемы и перспективы на будущее.

11. В Китае добились чистого бюджета выбросов ПГ за два года внесением биоугля на чайной плантации [Han et al., 2022].

12. Производство биоугля путем пиролиза биомассы с последующим захоронением в почве обеспечивает технологию удаления углекислого газа, готовую к внедрению, однако ее освоение требует ускорения; в частности, за счет сокращения затрат и сопутствующих выгод. Здесь обнаруживается, что обогащение биомассы (легирирование) рафинированными минералами, побочными минеральными продуктами или размолотыми породами снижает потери углерода во время пиролиза, снижая затраты на удаление углекислого газа на 17 % до 80–150 долл. США за т⁻¹ CO₂, с экономией 30 %, возможной при более высоких затратах на биомассу. В качестве дополнительного преимущества все три добавки повышают уровень доступных для растений питательных веществ. Легирирование калийсодержащими минералами может увеличить выделение как калия, так и фосфора. Таким образом, минеральное легирирование при производстве биоугля обеспечивает удаление двуокиси углерода с меньшими затратами, одновременно уменьшая глобальную нехватку фосфора и калия. Это делает его уникальным

среди технологий удаления углекислого газа [Buss et al., 2022].

13. Из-за высокого содержания биоматериала леса играют значимую роль в глобальном цикле углерода и являются крупнейшим в мире поглотителем углерода. Резервуар SOC может быть уменьшен при переводе землепользования из естественных лесов в сельскохозяйственные земли на 15–40 % в течение двух лет до глубины 1 м или даже на 50–65 % [Wani et al., 2022]. Авторы [Dai et al., 2022] считают, что растительные и микробные остатки являются двумя основными источниками почвенного органического углерода (SOC), и чтобы понять закономерности накопления, SOC определяли с помощью биомаркеров растительного и микробного происхождения (включая фенолы лигнина, аминоксахара, свободные и гидролизуемые липиды) в верхнем слое почвы основных типов лесов Китая и сравнивали их распределение с существующими данными (для лигнин-фенолов и аминоксахаров) в лесах и пастбищах, распределенных по всему миру. В глобальном масштабе леса содержат значительно меньше микробной некромассы в SOC по сравнению с пастбищами, что свидетельствует о более высоком вкладе компонентов растительного происхождения в лесном SOC. Авторы приходят к мнению о том, что фенолы лигнина растительного происхождения, по-видимому, не играют большой роли в накоплении SOC в лесу, учитывая их отрицательную связь с содержанием SOC. Вместо этого гидролизуемые липиды листьев и корней составляют гораздо более высокую долю SOC, чем фенолы лигнина в исследованных лесах Китая, даже по сравнению с пастбищными почвами. Более того, в отличие от лигнин-фенолов, как содержание SOC, так и относительное количество гидролизуемых растительных липидов в SOC увеличивается с уменьшением pH почвы, увеличением содержания реактивного железа и алюминия и повышением окисления лигнина (на что указывает отношение кислоты к альдегиду) в этих почвах. Эти результаты свидетельствуют о том, что с увеличением разложения лигнина растительные липиды и SOC накапливаются за счет (окси)гидроксидной защиты. В совокупности эти результаты демонстрируют различную важность компонентов растительного происхождения

в накоплении SOC в лесах по сравнению с лугами и подчеркивают, что растительные липиды играют более важную роль, чем лигнин, в накоплении SOC в лесах. Растительные липиды более концентрированы по отношению к лигнин-фенолам в лесном SOC, чем в пастбищах. Низкий pH и реакционноспособное Fe/Al способствуют накоплению растительных липидов (но не лигнин-фенола). Количественные исследования распределения липидов растительного происхождения в дополнение к лигнину в лесных почвах могут помочь выяснить пути и очаги накопления SOC с преобладанием растительных компонентов.

14. Фермеры Финляндии связывают углерод в почве рассматривают как эффективный вариант смягчения последствий изменения климата для финского сельского хозяйства и прибегают к его разным вариантам и рассматривают уплотнение, влажность, засуху, низкие урожаи в качестве своих основных мотивов для начала углеродного земледелия [Mattila et al., 2022].

15. M. Wiesmeier et al. [2019] обсуждают в качестве индикаторов, обеспечивающих возможность как оценки фактического хранения почвенного органического углерода (SOC), так и прогнозирования потенциала его хранения, минералогию глины, удельную поверхность, оксиды металлов, катионы Ca и Mg, микроорганизмы, почвенную фауну, агрегацию, текстуру, тип почвы, естественную растительность, землепользование и управление, топографию, исходный материал и климат. Они в результате экспериментов для хранения SOC предлагают использовать в качестве ключевого элемента мелкодисперсную минеральную фракцию для определения стабилизации SOC в большинстве почв.

16. В Бразилии Carlos Roberto Pinheiro Junior et al. [Pinheiro et al., 2021] в условиях влажного тропического климата оценили влияние выветривания на процессы материнского материала и на свойства почвы, образованных доломитовыми мраморами и известково-силикатными породами с вкраплениями гранит-биотитовых гнейсов. Обнаружено, что природа исходного материала была основной причиной свойств профилей, особенно сильно щелочного pH, превышающего 8,0 в большинстве почвенных горизонтов, и высокого содержания обменного Ca^{2+} -эквива-

лента CaCO_3 . В целом почвы, развитые под влиянием карбонатных пород, имеют общие черты, такие как малая эффективная мощность, высокая насыщенность основаниями, глина высокой активности и накопление карбонатов геогенного или педогенного происхождения [Zamanian et al., 2016]. Накопление карбонатов играет важную роль в секвестрации углерода, на его долю приходится примерно 40 % C, хранящегося в почвах во всем мире [Stanbery et al., 2017]. Эти неорганические формы являются основным компонентом накопления углерода в засушливых и полувзасушливых регионах [An et al., 2019; Zhang et al., 2019], чему способствуют малое количество осадков и низкое растворение карбонатов. С другой стороны, когда это происходит во влажных тропических климатических условиях с высокими температурами и осадками, карбонаты быстро растворяются, интенсифицируя CO_2 выбросы [Binet et al., 2020]. Однако мало что известно о выветривании карбонатов в районах сложной геологии в условиях тропического климата.

17. Пастбищные угодья составляют значительную часть мировых запасов углерода и при правильном управлении имеют высокий потенциал его связывания. Выпас оказывает различное воздействие на органический углерод почвы в зависимости от климата, географии и типа почвы, поэтому для обеспечения оптимального связывания углерода в различных регионах может потребоваться разное управление пастбищами [Wade et al., 2022]. Исследование авторов было направлено на оценку воздействия выпаса скота на почвенный углерод в полустественных субтропических влажных пастбищах Флориды. Измеряли они корневую биомассу, объемную плотность, концентрацию SOC и TOC и использовали метод эквивалентной массы почвы для оценки запасов органического углерода (OCS) и общего запаса углерода на трех глубинах (0–5, 5–15 и 15–30 см) внутри и снаружи из пяти 15-летнего пастбищного *exlosures*. Также исследовали растительность в каждой точке отбора проб и биомассу подстилки внутри и за пределами загонов. Показано, что выпас увеличивает объемную плотность, снижает биомассу корней, но не влияет на количество подстилки. Концентрации SOC и TOC существенно не отличались между пастбищными

и не выпасаемыми участками. Однако на основе эквивалентной массы почвы обнаружили более высокие запасы углерода в почве на пастбищах в более мелководной части почвы (0–5 см). Прекращение выпаса привело к явной разнице в составе растительности между пастбищными и непастбищными участками. Результаты свидетельствуют о том, что выпас скота увеличивает запасы почвенного углерода в верхнем слое почвы, однако авторы считают необходимыми более долгосрочные исследования для оценки этого воздействия на концентрации SOC, а также рекомендуют дальнейшее изучение влияния выпаса скота на продуктивность, корнеобразование,оборот, а также реакцию микробов.

18. A. P. Madigan et al. [2022] рассматривают во время обновления пастбищ полную инверсионную обработку почвы (FIT) как потенциальную стратегию управления для увеличения секвестрации и хранения углерода в ирландских пастбищных почвах. Комбинация полной инверсионной обработки почвы и повторного посева сохраняет значительно больше углерода. Полная инверсионная обработка почвы – это практика землеустройства, предусматривающая однократное инверсирование сельскохозяйственных почв на глубину 30 см. В некоторых случаях более глубокие инверсии (до 150 см) называют “глубокой вспашкой” или “переворотом” [Schiedung et al., 2021]. Независимо от глубины вспашки инверсия перемещает верхний слой почвы, богатый SOC, в подпочвенную область, и, в свою очередь, подпочвенный слой с дефицитом SOC становится новым горизонтом верхнего слоя почвы. Этот процесс предлагает потенциал для большей секвестрации углерода по всему профилю почвы из-за: а) большей способности стабилизации углерода нового верхнего слоя почвы с дефицитом SOC, который обычно содержит больше ила и глины [Wiesmeier et al., 2019] и имеет большую вероятность долгосрочного связывания углерода, поскольку эта фракция может хранить до 90 % общего SOC в сельскохозяйственных почвах [Torres-Sallan et al., 2017; Ghafoor et al., 2017; Creamer, O’Sullivan, 2018], и снижения минерализации перемещенного богатого SOC верхнего слоя почвы в подпочвенной области; б) большего проникновения корней по вертикали, что способствует повышенному отложе-

нию углерода из корней (например, экссудация и оборот) [Cai et al., 2014]. Запасы верхнего слоя почвы (0–15 см) изначально были выше в неперевернутых почвах по сравнению с перевернутыми, однако через 20 лет после этого существенной разницы не наблюдалось. Это указывает на то, что перевернутые подпочвы накапливают запас SOC и таким образом секвестрируют атмосферный CO₂ больше, чем в неперевернутых почвах, отчасти из-за большей эффективной стабилизирующей способности, вызванной более высоким дефицитом насыщения углеродом. Кроме того, глубокое захоронение верхнего слоя почвы привело к увеличению общего запаса SOC (0–150 см) через 20 лет на 69 %, при этом почти 75 % общего запаса SOC находится ниже глубины 30 см [Schiedung et al., 2021]. Минерализация погребенного углерода происходит в течение длительного периода времени (т. е. столетий) [Wang et al., 2014]. Какие факторы влияют на накопление и стабилизацию ПОУ на пастбищах? Разложение SOC особенно снижено в микроагрегатах и агрегатах ила и глины из-за ограниченной доступности кислорода и доступности SOC для почвенных микробов, что обеспечивает более длительные возможности секвестрации [Six et al., 2002; Torres-Sallan et al., 2018]. SOC также образует более стабильные химические связи с мелкими минеральными частицами (т. е. с мелким илом и глиной), которые могут быть защищены за счет образования микроагрегатов [Torres-Sallan et al., 2017; Wiesmeier, 2019]. Таким образом, в целом макроагрегаты представляют собой наименее стабильную форму агрегации почвы, время оборота которой составляет менее десяти лет. Напротив, микроагрегаты могут оставаться стабильными до века, в то время как агрегаты ила и глины могут оставаться неизменными более 100 лет [Lützow et al., 2006]. Таким образом, потенциал связывания углерода в почве увеличивается по сравнению с долей этих более мелких агрегатов по всему профилю почвы. В частности, почвы с более высоким содержанием ила и глины обладают большей вероятностью долговременной секвестрации углерода, поскольку эта фракция может хранить до 90 % общего SOC в сельскохозяйственных почвах [Ghafoor et al., 2017; Torres-Sallan et al., 2017; Creamer, O' Sullivan, 2018]. В результате общепризнано, что

почвы Ирландии имеют одну из самых высоких средних концентраций SOC в Европе и показывают сильный вертикальный градиент. Основываясь на эмпирических данных 806 образцов сельскохозяйственных почвенных профилей, I. Simo et al. [2019] установили, что 54 % углерода в верхних 100 см почвы находилось на глубине 0–30 см, дополнительные 36 % – на глубине от 30 до 50 см, а последние 10 % – на глубине от 50 до 100 см. Специально для ирландских пастбищ определено, что 57 % SOC в верхних 100 см находится между 0 и 30 см, 21 % – на глубине 30–50 см и 22 % – в оставшейся подпочве [Paustian et al., 2016]. Этот процесс предлагает потенциал для большей секвестрации углерода по всему профилю почвы из-за: а) большей способности стабилизации углерода нового верхнего слоя почвы с дефицитом SOC, который обычно содержит больше ила и глины [Wiesmeier et al., 2019]; б) снижения минерализации перемещенного богатого SOC верхнего слоя почвы в подпочвенном регионе; в) большего вертикального проникновения корней, что позволяет увеличить отложение С из корней (например, экссудация и оборот).

19. S. Gulde et al. [2008] отмечали, что почвенный органический углерод (SOC) не всегда линейно реагирует на увеличение поступления углерода, тем самым ограничивая скорость и эффективность стабилизации углерода в почвах. Отсюда они постулировали: когда почва подвергается воздействию широкого диапазона входов углерода в результате ряда обработок с навозом, она будет демонстрировать поведение насыщения углеродом, и разные пулы SOC будут насыщаться с разной скоростью. Они проверили различные пулы SOC с помощью методов физического фракционирования в результате долгосрочного сельскохозяйственного эксперимента в Летбридже, Канада. В результате чего авторы пришли к выводу, что по мере увеличения поступления углерода минеральная фракция почвы насыщается, и, следовательно, дополнительное поступление углерода будет накапливаться только в лабильных пулах почвенного углерода, которые имеют относительно более быстрый оборот.

20. K. Li et al. [2019] изучали изменения в запасах органического углерода в почве и лежащие в их основе механизмы в смесях и монокультурах люцерны *Medicago sativa*

и *Leymus chinensis*, а также содержание углерода и доступность почвенного азота и фосфора в течение четырех лет. Однако монокультура *M. sativa* увеличивала запасы SOC по сравнению с монокультурами *L. chinensis*, но зависело от поступления углерода из корневой биомассы. В сравнении со значительным увеличением биомассы корней по сравнению с другими травами при усилении поглощения азота и фосфора, монокультура *M. sativa* значительно повышала содержание лабильного углерода в почве (перманганатно-окисляемый экстракт) на глубине 0–150 см в результате увеличения поступления углерода в корневую биомассу. Авторы пришли к выводу, что монокультуры *M. sativa* по сравнению с монокультурой *L. chinensis* и ее смесью могут способствовать большему накоплению SOC, в частности лабильному связыванию почвой органического углерода по сравнению со смесями многолетних трав.

21. Меры по смягчению последствий за счет управления земельными ресурсами, такие как посев покровных культур в сельскохозяйственных почвах, часто оцениваются с точки зрения их потенциала связывания углерода, в то время как радиационное воздействие, связанное с изменениями альбедо поверхности, часто игнорируется. Цель исследования E. Lugato et al. [2020] состояла в том, чтобы оценить смягчающий потенциал покровных культур в плане изменения потоков биогенных парниковых газов (CO_2 и N_2O) и радиационное воздействие, обусловленное альбедо, в верхних слоях атмосферы (ТОА). Авторами обнаружено, что секвестрация углерода остается доминирующим смягчающим эффектом. Покровные культуры, как правило, были ярче, чем голая почва, поэтому отраженная коротковолновая радиация при ТОА показала, как потенциал смягчения последствий может быть существенно увеличен за счет выращивания покровной культуры с высоким альбедо и недостатком хлорофилла. Этот вариант радиационного управления земельными ресурсами имеет дополнительное преимущество, заключающееся в более быстром смягчении последствий. Хотя могут потребоваться дополнительные исследования для оценки местных и нелокальных сопутствующих климатических воздействий, таких как изменения в характере приземной темпера-

туры и осадков. Отраженная коротковолновая радиация от покровной культуры при ТОА в целом эквивалентна удалению 0,8–3,9 мг CO_2 с га⁻¹, т. е. потенциал с покровными культурами смягчения последствий может быть существенно увеличен за счет выращивания покровной культуры с высоким альбедо и недостатком хлорофилла. Была создана дополнительная пара симуляций, в которых учитывалась мутантная покровная культура с дефицитом хлорофилла, которая имеет гораздо более высокое альбедо и, следовательно, более высокий потенциал для смягчения последствий изменения климата. Безусловно, необходимы дальнейшие исследования для максимального использования покровных культур с учетом режимов влажности почвы, наличия снега, способности улавливать углерод и цвета голой почвы. Эта практика открывает путь к более полной оценке воздействия на климат других методов связывания углерода, таких как управление остатками, добавление биоугля, дренаж почвы, которые могут еще больше изменить свойства поверхностного покрова. Авторы рекомендуют, чтобы дополнительный потенциал смягчения от изменений альбедо путем принятия покровных культур, скорее рассматривался как показатель того, где и в какой степени биофизический эффект может привести к дополнительным выгодам.

22. Имеются исследования методического характера, например, в работе X. He et al. [2021] оценивалась полезность фенологических параметров и предикторов дистанционного зондирования (ДЗ), извлеченных из данных Sentinel-2, для прогнозирования SOC на сельскохозяйственных угодьях. Результаты показали, что фенологические параметры (индексы растительности, яркости, влажности) улучшили точность прогнозирования SOC. Среди них в этом исследовании были определены наиболее важные фенологические предикторы содержания SOC в верхнем слое почвы: наибольшее значение данных для подбранной функции в течение сезона (a6), скорость увеличения в начале сезона (a8) и большой сезонный интеграл (a10). Что касается предикторов дистанционного зондирования, ближний инфракрасный диапазон (диапазон 8), коротковолновый инфракрасный диапазон (диапазон 11) и общий индекс растительности

с поправкой на почву (SATVI) получили более высокие оценки и обеспечивают более высокие дополнительные значения в прогнозе SOC. В этом исследовании также сравнивались показатели четырех групп в соответствии с комбинациями естественных, фенологических параметров и предикторов дистанционного зондирования. Среди них группа 4, которая включает в себя все естественные, фенологические и дистанционные предикторы, показала лучшие результаты, что улучшило показатели эффективности R^2 на 171 %, LCCC на 52 %, RMSE на 13 % и MAE на 15 %. Таким образом, это исследование доказало, что фенологические параметры и предикторы ДЗ, извлеченные из изображений Sentinel-2, могут расширить возможности картирования SOC в сельскохозяйственных районах.

23. А. Tripathi, Reet K. Tiwari [2022] отмечают, что космический микроволновый радар/радар с синтетической апертурой (SAR) для дистанционного зондирования зарекомендовал себя как универсальный инструмент для различных приложений по изучению почвы. Ими использовались временные ряды данных дистанционного зондирования SAR в диапазоне C со спутника Sentinel-1. А для оценки SOC и сравнения характеристик регрессионных моделей случайного леса (RF) и обычных наименьших квадратов (OLS) над сельскохозяйственными районами округа Рупнагар в Пенджабе, Индия, в период с ноября 2019 г. по январь 2020 г. был собран набор из 96 образцов почвы с 32 различных участков сельскохозяйственных полей в районе Рупнагар. В качестве параметров регрессии использовались вертикально излучаемые и вертикально принимаемые (VV) и вертикально излучаемые и горизонтально принимаемые (VH) поляризационные каналы от Sentinel-1, влажность почвы, электропроводность, pH, температура и SOC из лабораторных методов тестирования. Регрессия RF дала среднеквадратичную ошибку с RMSE 0,53 и R^2 0,907. Также замечено, что обратное рассеяние от каналов поляризации VV и VH при синергическом использовании с полевыми данными имеет самый высокий показатель важности признаков (FI) как в моделях регрессии RF, так и в моделях регрессии OLS для оценки SOC, статистика 0,887, в то время как метод МНК работала лучше с RMSE 0,53 и R.

24. Приводятся исследования по прогнозированию содержания углерода в покрытых лесом водно-болотных угодьях в физико-географических провинциях Пьемонт и Прибрежная равнина Северной Вирджинии (NOVA) с применением портативного колориметра Nix Pro Color Sensor ("Nix"), который обеспечивает количественные измерения цвета почвы с помощью 15 переменных. Эксперименты проводились с целью определения пригодности метода, которые доказали применимость его измерений. Эти результаты с использованием простых линейных регрессий продемонстрировали потенциал Nix в его измерениях цвета почвы для быстрой полевой оценки почвенного углерода в лесных водно-болотных угодьях [Schmidt, Ahn, 2021].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Во многих странах в целях выполнения предписаний Парижского соглашения по снижению эмиссии парниковых газов уделяется большое внимание типам управления землепользованием. Углерод в значительном количестве депонируется в лесах, пастбищах, т. е. в естественных условиях, и меньше всего в пахотных землях. Сельскохозяйственные почвы, и особенно дефлированные, обычно содержат меньший запас SOC, чем их потенциальная емкость. Однако грамотное управление пахотными почвами, как возвращение высокоуглеродистых растительных остатков, внесение компостов, а также культивирование посевов люцерны и ее смеси, введение в практику минимальной обработки, использование покровных культур, приводит к уменьшению потерь углерода. Покровные культуры как потенциал смягчения последствий может быть существенно увеличен за счет выращивания культур с высоким альбедо и недостатком хлорофилла. Применение азота оказывает стимулирующий эффект на углеродную сохранность, включая понижение в глубь профиля распределения углерода корневой массы и микоризы, размещение углерода в различных органических фракциях почвы, микробный состав и активность подавления гетеротрофного дыхания.

Считается, что растительные и микробные остатки являются двумя основными источниками SOC. Пастбищные угодья составляют

значительную часть мировых запасов углерода и при правильном управлении имеют высокий потенциал связывания углерода. Выпас оказывает различное воздействие на органический углерод почвы в зависимости от климата, географии и типа почвы, поэтому для обеспечения оптимального связывания углерода в различных регионах потребуется разное управление пастбищами и, возможно, даже прибегать к перемещиванию верхних богатых углеродом горизонтов с глубинной глинистой частью почв, таким образом улучшая депо углерода. Большое внимание необходимо уделить ризоотложениям в лесных и пастбищных землях, богатых углеродистыми соединениями. Включение фотосинтетического углерода в микробные сообщества под пастбищами и в лесных почвах выше из-за микоризации. При этих исследованиях используются такие методы, как биомаркеры, изотопные стабильные и радиоизотопные метки углерода и азота. Показано, что системы агролесоводств (AF) могут внести значительный вклад в глобальное связывание почвенного углерода, если они будут использоваться на больших территориях. Следует улучшать деградированные пастбищные угодья путем их коренной переработки с подсевом трав.

Нужно отметить, что депонирование углерода в почвах зависит от их свойств: от содержания илистых и глинистых фракций; карбонатов, величины pH, от соотношения Fe/Al и химического (компонентного) состава растений.

Облесение сельскохозяйственных угодий может обратить вспять некоторые процессы деградации и вызвать увеличение или секвестрацию запасов SOC, особенно вокруг пахотных земель, в связи с чем необходимо размещать лесополосы с быстрорастущими породами деревьев, как осина и ольха, быстро улавливающими углекислый газ, чем другие насаждения.

Среди методов поддержки SOC один из самых популярных способов компенсации природного поглощения углерода – лесовосстановление. Как и в случае с запасами SOC это может обратить вспять некоторые процессы деградации и вызвать увеличение или секвестрацию запасов ПОУ.

Но есть и другие, менее известные методы, например, восстановление среды, где содержится так называемый “голубой угле-

род”, который хранится в прибрежных или морских экосистемах. Мангровые заросли, болота и заросли водорослей по сути являются защитой от изменения климата, так как поглощают CO₂ из атмосферы. Этот процесс происходит даже быстрее, чем в лесах. Сегодня уже есть примеры того, как компании вкладывают деньги в восстановление мангровых лесов в Юго-Восточной Азии.

Другой способ – повышение продуктивности океана. В большинстве своем это пока лишь теоретические исследования. Одна из идей состоит в том, чтобы добавить питательное железо в те части океана, где его не хватает. Это должно вызвать ускоренное цветение микроскопических растений (фитопланктона), которые через фотосинтез улавливают углекислый газ.

Необходимо широко прибегать к современным методам прогноза содержания почвенного углерода, как, например, дистанционному зондированию Земли.

Занимаясь органическим веществом холодных и мерзлотных почв Забайкалья, позволю себе резюмировать следующее: своеобразие происхождения и строение рельефа межгорных котловин и горных областей обусловили пестроту почвообразующих пород, которые представлены в виде легких суглинков, супесей и песков различного генезиса. Длительное нахождение пород в мерзлом состоянии и медленное оттаивание, низкая температура и относительно высокая влажность в нижних горизонтах на протяжении всего периода вегетации являются причиной низкой их продуктивности. Однако совпадение периода высоких температур с периодом наибольшей увлажненности обуславливает очень большую активность всех биологических процессов, к сожалению, на очень короткое время – 2,5–3 месяца. Именно этот отрезок времени и определяет направление и скорость биологического круговорота веществ в суровом Забайкалье. При таких условиях формируются маломощные, но со значительным количеством полудеструктурированных органических остатков почвы [Чимитдоржиева, 1990]. Возможно, это явление можно считать положительным при депонировании углерода. При изучении углеродного баланса выявлено, что в холодных и мерзлотных почвах преобладает сток углерода, а эмиссионные потери его

незначительны [Чимитдоржиева, 2016]. Однако при потеплении климата следует ожидать изменения в балансе углерода, когда уже на современном этапе фиксируется перемещение границы мерзлотного экрана вниз в глубину.

ЛИТЕРАТУРА

- Битва за климат: карбоновое земледелие как ставка России. Экспертный доклад / под ред. А. Ю. Иванова, Н. Д. Дурманова. М.: Изд. дом НИУ ВШЭ, 2021. 117 с.
- Благовещенский Г. В., Конончук В. В., Тимошенко С. М. Углеродная секвестрация в травяных экосистемах // Кормопроизводство. 2019. № 9. С. 17–21.
- Кудеяров В. Н. Агрогеохимические циклы углерода и азота в современном земледелии России // Агрохимия. 2019. № 12. С. 3–15. doi: 10.1134/S000218811912007X
- Столбовой В. С. Регенеративное земледелие и смягчение изменений климата // Достижения науки и техники АПК. 2020. Т. 34, № 7. С. 19–26. doi: 10.24411/0235-2451-2020-10703
- Шарков И. Н. Минимизация обработки и ее влияние на плодородие почвы // Земледелие. 2009. № 3. С. 24–27.
- Шарков И. Н., Антипина П. В. Некоторые аспекты углеродсеквестрирующей способности пахотных почв // Почвы и окружающая среда. 2022. Т. 5, № 2. doi: 10.31251/Pos.V5i2.175
- Чимитдоржиева Г. Д. Гумус холодных почв (экологические аспекты). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1990. 143 с.
- Чимитдоржиева Г. Д. Органическое вещество холодных почв. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2016. 387 с.
- An H., Li Q.-L., Yan X., Wu X.-Z., Liu R.-T., Fang Y. Desulfurization control on soil inorganic and organic carbon accumulation in the topsoil of desert grassland in Ningxia, northwest China // Ecol. Eng. 2019. Vol. 127. P. 348–355. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.12.014>.
- Baldrian P., Valášková V. Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi FEMS // Microbiol. Rev. 2008. Vol. 32. P.501–521.
- Bell C. W., Acosta-Martinez V., McIntyre N. E., Cox S., Tissue D. T., Zak J. C. Linking microbial community structure and function to seasonal differences in soil moisture and temperature in a Chihuahuan desert grassland // Microb. Ecol. 2009. Vol. 58. P.827–842.
- Binet S., Probst J. L., Batiot C., Seidel J. L., Emblanch C., Peyraube N., Charlier J.-B., Bakalowicz M., Probst A. Global warming and acid atmospheric deposition impacts on carbonate dissolution and CO₂ fluxes in French karst hydrosystems: Evidence from hydrochemical monitoring in recent decades // Geochim. et Cosmochim. Acta. 2020. Vol. 270. P. 184–200. <https://doi.org/10.1016/j>
- Buss W., Wurzer C., Manning D. A. C., Rohling E. J., Borovitz J., Mašek O. Mineral-enriched biochar delivers enhanced nutrient recovery and carbon dioxide removal // Commun Earth Environ. 2022. Vol. 3. P. 67. <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00394-w>
- Cai H., Ma W., Zhang X., Ping J., Yan X., Liu J., Yuan J., Wang L., Ren J. Effect of subsoil tillage depth on nutrient accumulation, root distribution, and grain yield in spring maize // Crop J. 2014. Vol. 2 (5). P. 297–307. 10.1016/j.cj.2014.04.006.
- Creamer R., O' Sullivan L. The Soils of Ireland. New York: Springer, 2018. 280 p.
- Dai G., Zhu S., Cai Y., Zhu E., Jia Y., Ji C., Tang Z., Fang J., Feng X. Plant-derived lipids play a crucial role in forest soil carbon accumulation // Soil. Biol. Biochem. 2022. Vol. 168. 108645. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108645>
- Dippold M., Biryukov M., Kuzyakov Y. Sorption affects amino acid pathways in soil: Implications from position-specific labeling of alanine // Soil Biol. Biochem. 2014. Vol. 72. P. 180–192.
- Drigo B., Pijl A. S., Duyts H., Kielak A. M., Gamper H. A., Houtekamer M. J., Boschker H. T., Bodelier P. L., Whitley A. S., Veen J. A., Kowalchuk G. A. Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂ // Proc. Natl. Acad. Sci. USA. 2010. Vol. 107 (24). P. 10938–10942. doi: 10.1073/pnas.0912421107
- Dutta A., Bhattacharyy R., Chaudhary V. P., Sharma Ch., Nath Ch.P., Kumar S. N., Parmar B. Impact of long-term residue burning versus retention on soil organic carbon sequestration under a rice-wheat cropping system // Soil & Tillage Res. 2022. Vol. 221. P. 105421.
- Eisenhauer N., Dobies T., Cesarz S., Hobbie S. E., Meyer R. J., Worm K., Reich P. B. Plant diversity effects on soil food webs are stronger than those of elevated CO₂ and N deposition in a long-term grassland experiment // PNAS. 2013. Vol. 110. P. 6889–6894.
- Elias D. M.O., Rowe R. L., Pereira M. G., Stott A. W., Barnes C. J., Bending G. D., McNamara N. P. Functional differences in the microbial processing of recent assimilates under two contrasting perennial bioenergy plantations // Soil Biol. Biochem. 2017. Vol. 114. P. 248–262. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.07.026.22>
- Frey S. D. Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics // Annu. Rev. of Ecol. Evolut. Systemat. 2019. Vol. 50. P. 237–269. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331>
- Ghafoor A., Poeplau C., Kätterer T. Fate of straw- and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil // Biol. Fert. Soils. 2017. Vol. 53. P. 257–267. <https://doi.org/10.1007/s00374-016-1168-7>
- Gulde S. C., Chung H., Amelung W., Chang C. U. Soil Carbon Saturation Controls Labile and Stable Carbon Pool Dynamics. Soil Science Society of America Journal. Soil Biology & Biochemistry. 2008. Vol. 72. Issue 3. P. 605–612. <https://doi.org/10.2136/sssaj2007.0251>
- Gunina A., Smith A. R., Godbold D., Jones D. L., Kuzyakov Y. Response of soil microbial community to afforestation with pure and mixed species // Plant Soil. 2017. Vol. 412. P. 357–368.
- Han Z., Lin H., Xu P., Li Z., Wang J., Zou J. Impact of organic fertilizer substitution and biochar amendment on net greenhouse gas budget in a tea plantation // Agriculture. Ecosystems & Environment. 2022. Vol. 326. P. 107779. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.10>
- He X., Yang L., Li A., Zhang L., Shen F., Cai Y., Zhou C. Soil organic carbon prediction using phenological parameters and remote sensing variables generated from Sentinel-2 images // Catena. 2021. Vol. 205. P. 105442.

- Koranda M., Schneckner J., Kaiser C., Fuchslueger L., Kitzler B., Stange C. F., Sessitsch A., Zechmeister-Boltenstern S., Richter A. Microbial processes and community composition in the rhizosphere of European beech – the influence of plant C exudates // *Soil Biol. Biochem.* 2011. Vol. 43. P. 551–558.
- Lal R. Carbon sequestration // *Biol. Sci.* 2008. Vol. 363. P. 815–830.
- Lal R. Digging deeper: A holistic perspective of factors affecting soil organic carbon sequestration in agroecosystems // *Global Change Biol.* 2018. Vol. 24, Issue 8. P. 3285–3301.
- Li Q., Zhou D., Denton M. D., Cong S. Alfalfa monocultures promote soil organic carbon accumulation to a greater extent than perennial grass monocultures or grass-alfalfa mixtures // *Ecol. Eng.* 2019. Vol. 131. P. 53–62. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2019.03.002>
- Liu Y., Ge T., Ye J., Liu S., Shibistova O., Wang P., Wang J., Li Y., Guggenberger G., Kuzyakov Y., Wu J. Initial utilization of rhizodeposits with rice growth in paddy soils: Rhizosphere and N fertilization effects // *Geoderma*. 2019. Vol. 338. P. 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.11.040>
- Lugato E., Cescatti A., Jones A., Ceccherini G., Duveiller G. Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops // *Environ. Res. Lett.* 2020. Vol. 15. 094075. [doi:10.1088/1748-9326/aba137](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba137)
- Lützw M., Kögel-Knabner I., Ekschmitt K., Matzner E., Guggenberger G., Marschner B., Flessa H. Organic Matter Stabilization in Temperate Soils: Mechanisms and Their Significance in Various Soil Conditions – An Overview // *Euro. J. Soil Sci.* 2006. Vol. 57 (4). P. 426–445. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x>
- Madigan A. P., Zimmermann J., Krol D. J., Williams M., Jones M. B. Full Inversion Tillage (FIT) during pasture renewal as a potential management strategy for enhanced carbon sequestration and storage in Irish grassland soils // *Sci. Total Environment*. 2022. Vol. 805. P. 150342.
- Mattila T. J., Hagelberg E., Söderlund S., Joona J. How farmers approach soil carbon sequestration? Lessons learned from 105 carbon-farming plans // *Soil and Tillage Research*. 2022. Vol. 215. P. 105204. <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105204>
- Minasny B., Malone B. P., McBratney A. B. et al. Soil carbon 4 per mille // *Geoderma*. 2017. Vol. 292. P. 59–86.
- Mona S., Malyan S. K., Saini N., Deepak B., Pugazhendhi A., Kumar S. S. Towards sustainable agriculture with carbon sequestration, and greenhouse gas mitigation using algal biochar // *Chemosphere*. 2021. Vol. 275. P. 129856. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.129856>
- Moreno G., Hernández-Esteban A., Rolo V., Igual J. M. The enduring effects of sowing legume-rich mixtures on the soil microbial community and soil carbon in semi-arid wood pastures // *Plant Soil*. 2021. Vol. 465. P. 563–582.
- Panchal P., Preece C., Peñuelas J., Giri J. Soil carbon sequestration by root exudates // *Review Trends Plant Sci.* 2022. Vol. 27 (8). P. 749–757. [doi:10.1016/j.tplants.2022.04.009](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2022.04.009)
- Pausch J., Kuzyakov Y. Carbon input by roots into the soil: quantification of rhizodeposition from root to ecosystem scale // *Glob. Chang. Bio.* 2018. Vol. 24. P. 1–12. [1007/s00374-022-01659-4](https://doi.org/10.1007/s00374-022-01659-4)
- Paustian K., Lehmann J., Ogle S., Reay D., Robertson G. P., Smith P. Climate-smart soils // *Nature*. 2016. Vol. 532. P. 49–57. <https://doi.org/10.1038/>
- Pinheiro C. R. Jr, Silva R. C., Silva Neto E. C., Azevedo A. C., Nascimento C. W. R., Fontana A., Souza V. S. Jr, Anjos L. H. C., Pereira M. G. Influence of carbonate rocks on soil properties in the humid tropical climate of atlantic forest, Rio de Janeiro–Brazil // *Journal of South American Earth Sciences*. 2021. Part 1. Vol. 112. P. 103582. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103582>
- Schiedung M., Tregurtha C. S., Beare M. H., Thomas S. M., Don A. Deep soil flipping increases carbon stocks of New Zealand grasslands // *Global. Change Biol.* 2021. Vol. 27, Issue 10. P. 2269–2269. <https://doi.org/10.1111/gcb.14588>
- Schmidt S. A., Ahn C. Predicting forested wetland soil carbon using quantitative color sensor measurements in the region of northern Virginia, USA // *Environmental Management*. 2021. Vol. 300. P. 113823. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.1138>
- Shi L., Feng W., Xu J., Kuzyakov Y. Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials // *Land Degradation & Development*. 2018. Vol. 29, Issue 11. P. 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136.21>
- Simo I., Schulte R., O'Sullivan L., Creamer R. Digging deeper: understanding the contribution of subsoil carbon for climate mitigation, a case study of Ireland // *Environ. Sci. Policy*. 2019. Vol. 98. P. 61–69. [10.1016/j.envsci.2019.05.004](https://doi.org/10.1016/j.envsci.2019.05.004)
- Six J., Conant R. T., Paul E. A., Paustian K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: implications for C-saturation of soils Sharma Mona et al. // *Plant and Soil*. 2002. Vol. 241. P. 155–176.
- Stanbery C. A., Pierce J. L., Benner S. G., Lohse K. On the rocks: quantifying storage of inorganic soil carbon on gravels and determining pedon-scale variability // *Catena*. 2017. Vol. 157. P. 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.06.011>
- Stolbovoy V., Ivanov A. Carbon balance in soils of Northern Eurasia // *Soil carbon. Progress in soil science*; eds. A. E. Hartemink, K. McSweeney. Switzerland: Springer International Publishing, 2014. P. 381–390. [doi: 10.1007/978-3-319-04084-4_38](https://doi.org/10.1007/978-3-319-04084-4_38)
- Torres-Sallan G., Creamer R. E., Lanigan G. J., Reidy B., Byrne K. A. Effects of soil type and depth on carbon distribution within soil macroaggregates from temperate grassland systems // *Geoderma*. 2018. Vol. 313. P. 52–56. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.012>
- Torres-Sallan G., Schulte R. P. O., Lanigan G. J., Byrne K. A., Reidy B., Simy I., Six J., Creamer R. E. Clay illuviation provides a long-term sink for carbon sequestration in the subsoil // *Sci. Rep.* 2017. Vol. 7. P. 45635. [10.1038/srep45635](https://doi.org/10.1038/srep45635)
- Tripathi A., Tiwari R. K. Utilisation of spaceborne C-band dual pol Sentinel-1 SAR data for simplified regression-based soil organic carbon estimation in Rupnagar, Punjab, India // *Advances in Space Research*. 2022.

- Vol. 69, Issue 4. P.1786–1798. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.08.007>
- Wade C., Sonnier G., Boughton E. H. Does Grazing Affect Soil Carbon in Subtropical Humid Seminal Grasslands? // *Rangeland and Ecol. & Management*. 2022. Vol. 80. P. 10–17. <https://doi.org/10.1016/j.rama.2021.09.004>.
- Wani O. A., Kumar S., Hussain N., Wani A. I.A., Babu S., Parvej A., Rashid M., Simona Popescu M., Mansoor S. Multi-scale processes influencing global carbon storage and land-carbon-climate nexus: A critical review // *Pedosphere*. 2022. Vol. 32. <https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.07.002>
- Wang Z., Oost K., Lang A., Quine T. A., Clymans W., Merckx R., Notebaert B., Govers G. The fate of buried organic carbon in colluvial soils: a long-term perspective // *Biogeosciences*. 2014. Vol. 11. P. 873–883. doi:10.5194/bg-11-873-2014
- Wiesmeier M., Urbanski L., Hobbey E., Lang B., Lützw M., Marin-Spiotta E., Wesemael B., Rabot E., Ließ M., Garcia-Franco N., Wollschläger U., Vogel H.-J., Kögel-Knabner I. Soil organic carbon storage as a key function of soils – A review of drivers and indicators at various scales // *Geoderma*. 2019. Vol. 333. P. 149–162. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- Yadav G. S., Das A., Lal R., Babu S., Meena R. S., Saha P., Singh R., Datta M. Energy budget and carbon footprint in a no-till and mulch based rice–mustard cropping system // *J. Clean. Prod.* 2018. Vol. 191. P. 144–157.
- Yost J. L., Hartemink A. E. Soil organic carbon in sandy soils // *Advances in Agronomy*. 2019. Vol. 158. P. 217–310. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.004>
- Zamanian K., Pustovoytov K., Kuzyakov Y. Pedogenic carbonates: Forms and formation processes // *Earth-Sci. Rev.* 2016. Vol. 157. P. 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.03.003>
- Zhang H., Yin A., Yang X., Wu P., Fan M., Wu J., Zhang M., Gao C. Changes in surface soil organic/inorganic carbon concentrations and their driving forces in reclaimed coastal tidal flats // *Geoderma*. 2019. Vol. 352. P. 150–159. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.06.003>.
- Zhang Q., Zhang Y., Wang X., Li H., Liu P., Wang X., Wang R., Li J. Change of tillage system affects the soil carbon pools characters, reduces carbon emissions and improves maize yield in the Loess Plateau // *Eur. J. Agr.* 2022. Vol. 141. P. 126614. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126614>
- Zhou J., Gube M., Holz M., Song B., Shan I., Shi L. L., Kuzyakov Y., Dippold M. A., Pausch J. Ectomycorrhizal and non-mycorrhizal rhizosphere fungi increase root-derived C input to soil and modify enzyme activities: a ¹⁴C pulse labeling of *Picea abies* seedlings // *Plant. Cell Environ.* 2022a. Vol. 45. P. 3122–3133. <https://doi.org/10.1111/pce.14413>
- Zhou J., Li I. Z., Shi L., Kuzyakov Y., Pausch J. Microbial utilization of photosynthesized carbon depends on land-use // *Geoderma*. 2022b. Vol. 428. P. 116160. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2022.116160>
- Zhou J., Shao G., Kumar A., Shi L. L., Kuzyakov Y., Pausch J. Carbon fluxes within tree-crop-grass agroforestry system: ¹³C field labeling and tracing // *Biol. Fertil. Soils*. 2022c. Vol. 58. P. 733–743. <https://doi.org/10.1007/s00374-022-01659-4>
- Zhou Y., Zhu H., Fu S., Yao Q. Variation in soil microbial community structure associated with different legume species is greater than that associated with different grass Front // *Microbiol*. 2017. Vol. 8. P. 1007.

Ways of Carbon Sequestration in Land Use (Literature Review)

G. D. CHIMITDORZHIEVA

*Institute of General and Experimental Biology SB RAS
670047, Ulan-Ude, Sakhyanova str., 6
E-mail: galdorj@gmail.com*

The review is devoted to the current environmental problem – a reduction of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere. A significant proportion of carbon is known to be deposited in the soil cover. Measures are being discussed in many countries to promote carbon sequestration depending on the land use, because soils and forests, along with the world's oceans, are the main stores of CO₂. Different land use issues (virgin lands, arable land, pasture and forest lands) are covered in connection with the problem of greenhouse gas emissions. Data on the land cultivation: zero; standard with and without plant residues; using biochar; microalgae are given. A comparative analysis using biomarkers on a pasture with mixed herbage, arable land with rapeseed, soil under willow have been considered in order to determine microorganisms assimilating carbon from rhizosphere deposits of various plants. Some sources evident the hydrolysable lipids constitute a high share of the soil organic carbon (SOC) accumulation in forests, in contrast to phenols of lignin. The former substances are actively accumulated with the decreasing of soil pH, increasing of reactive iron, aluminum, and lignin oxidation. SOC is higher in silt and clay fractions as compared to the sandy ones due to its absorbance in aggregates. Hence, it was proposed to use the finely dispersed mineral fraction as a key element to determine carbon stabilization in most soils. Carbonates play an important role in carbon sequestration, accounting for approximately 40 % of carbon stored in the world soils. They are the main component of carbon storage in arid regions. Attention to the radical improvement of pastures is given – inversion treatment (FIT). The methodical issues to detect SOC by remote distance (RD) technique are given. Reflected shortwave radiation in the upper atmosphere (TOA) practice has shown a great potential for climate mitigation through the cultivation of a cover crop with high albedo and a lack of chlorophyll.

Key words: carbon sequestration, land use types, tillage, microorganisms.