

УДК 630\*116.64+504.7

## ВЛИЯНИЕ ЛЕСНЫХ ПОСАДОК НА ЭМИССИЮ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА ИЗ ПОЧВЫ В ПОВОЛЖЬЕ И ПОДОНЬЕ<sup>1</sup>

© 2022 г. Д. Г. Замолодчиков<sup>a, b, \*</sup>, В. В. Каганов<sup>a</sup>, А. С. Мостовая<sup>a</sup><sup>a</sup>Центр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН, ул. Профсоюзная, д. 84/32, Москва, 117997 Россия<sup>b</sup>Высшая школа экономики, Покровский бульвар, д. 11, Москва, 109028 Россия

\*E-mail dzamolod@mail.ru

Поступила в редакцию 24.02.2022 г.

После доработки 01.03.2022 г.

Принята к публикации 06.04.2022 г.

Формирование пула органического углерода почвы определяется балансом входящих и исходящих потоков. Входящие потоки связаны с процессами отмирания и дальнейшего преобразования органического вещества растений, исходящие потоки в первую очередь формируются процессами деструкции органического вещества, хотя во многих экосистемах имеет значение и вынос углерода с водными потоками. Гетеротрофная деструкция почвенной органики вместе с дыханием корней формирует эмиссию диоксида углерода из почвы. Сравнение величин эмиссии в разных местообитаниях позволяет делать заключения о характере действия факторов, контролирующих деструкционные процессы в почве. Измерения эмиссии диоксида углерода из почвы провели камерным методом во второй половине августа 2020–2021 гг. на 5 объектах Воронежской, Волгоградской, Астраханской, Самарской и Ростовской областей. Работы выполняли на парах участков, покрытых травяной растительностью и искусственными лесными насаждениями. Почвенная эмиссия диоксида углерода в лесных насаждениях была значимо выше ( $2.99 \pm 0.26 \text{ г С м}^{-2}$ ) в сравнении с безлесными участками ( $2.20 \pm 0.11 \text{ г С м}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). Проведен статистический анализ связи величин эмиссии с температурой почвы на глубине 10 см, объемной влажностью почвы в слое 0–7 см и нормализованным относительным вегетационным индексом (*NDVI*) растительного покрова. Обнаружено, что влажность и *NDVI* были значимыми факторами эмиссии, а температура – незначимым. Результаты, полученные в настоящей работе и доступные в научных публикациях, позволяют заключить, что эмиссия диоксида углерода, как правило, возрастает после конверсии травяного растительного покрова в древесный. Однако возрастание эмиссии не сопровождается потерями запаса углерода почвы, который либо остается постоянным, либо несколько возрастает. Увеличение *NDVI* свидетельствует о возрастании в лесных посадках чистой первичной продукции, то есть измененная экосистема является стоком углерода по совокупности пулов фитомассы и почвы. Такой характер изменения запасов и потоков углерода даже в богатых углеродом аридных почвах делает вполне содержательными масштабные планы по созданию защитных лесных насаждений с целью усиления поглощения углерода.

*Ключевые слова:* лесоразведение, лесополосы, диоксид углерода, эмиссия, почва, черноземы, факторы эмиссии.

DOI: 10.31857/S0024114822040118

Современное глобальное потепление климата приобретает все более выраженный характер и сопровождается усилением ряда негативных эффектов. Аридные регионы являются одними из наиболее уязвимых к изменению климата, особенно при сочетании трендов к увеличению температуры и уменьшению осадков. Именно такая

ситуация наблюдается в южных областях европейской части России (Доклад ..., 2021), что усиливает климатические угрозы для этого важнейшего в сельскохозяйственном отношении региона. Лесомелиорация традиционно рассматривается как способ увеличения продуктивности сельского хозяйства и борьбы с эрозией почвы. Еще в конце XIX века устройство лесных полос, а также проведение иных агролесомелиоративных мероприятий осуществлялось в Нижнем Поволжье выдающимися исследователями В.В. Докучаевым и Н.К. Генко (Розенберг и др., 2018). В 1948 г. было принято постановление «О плане полезащитных лесонасаж-

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке темы ГЗ ЦЭПЛ РАН, рег. номер 121121600118-8 «Методические подходы к оценке структурной организации и функционирования лесных экосистем» (полевые работы) и РНФ № 22-27-00641 «Климатические эффекты масштабного лесоразведения в аридных регионах России» (анализ данных).

дений, внедрения травопольных севооборотов, строительства прудов и водоемов для обеспечения высоких устойчивых урожаев в степных и лесостепных районах Европейской части СССР”, получившее народное название “Сталинский план преобразования природы”. Фактически задача аридного лесоразведения была поставлена более широко: речь шла об улучшении климата целых регионов. Значительная часть масштабных лесных посадок 1950-х гг. сохранилась до настоящего времени, что дает возможность на экспериментально-полевых данных рассмотреть изменения климатических и экологических условий после облесения.

Оценка влияния лесных посадок на свойства почв аридных регионов является популярным направлением почвоведения. Изменения водно-физических свойств почвы под лесными культурами были детально рассмотрены в Каменной степи (Чевердин и др., 2014; Турусов и др., 2020). Изменение различных свойств почв при облесении проанализировано в серии работ по Белгородской обл. (Смирнова и др., 2020; Чендев и др., 2020, 2022). Воздействие лесных посадок на запасы углерода рассмотрены для Нижнего Поволжья и Крыма (Каганов, 2012; Клименко и др., 2021). В этих работах показано, что запасы органического углерода в черноземных почвах под лесными посадками, как правило, несколько увеличиваются в сравнении с аналогичными почвами под степной растительностью, при этом может происходить перераспределение углерода по профилю почвы.

Вывод о том, что лесные посадки на степных почвах положительно сказываются на запасах почвенного углерода, приобретает особую актуальность в свете проектной деятельности по усилению поглощения углерода посредством облесения в целях предотвращения климатических изменений. В России проблематика лесоклиматических проектов приобрела популярность лишь в последние годы в рамках дискуссий по мерам, обеспечивающим развитие низкоуглеродной экономики (Ваганов и др., 2021; Птичников и др., 2021) и адаптации к климатическим рискам (Липка и др., 2021). Однако в зарубежных странах проекты по облесению и лесовосстановлению давно осуществляются как в рамках киотского механизма чистого развития, так и в рамках других международных и национальных программ. Некоторые из таких программ получили мощное научное обеспечение, в частности, китайская программа “Grain for Green” (Deng et al., 2019; Wang et al., 2020). Обобщение результатов исследований по 619 парам участков контроль-облесение в северном Китае показало, что облесение увеличивает запас углерода при его малом запасе в исходных почвах, но уменьшает при большом (Hong et al., 2020). В этой связи ясно, что вопрос о влиянии лесоразведения

на органическое вещество почвы нельзя считать закрытым.

Формирование пула органического углерода почвы определяется балансом входящих и исходящих потоков. Входящие потоки связаны с процессами отмирания и дальнейшего преобразования органического вещества растений, исходящие потоки в первую очередь формируются процессами деструкции органического вещества, хотя во многих экосистемах имеет значение и вынос углерода с водными потоками. Гетеротрофная деструкция почвенной органики (часто называемая микробным дыханием) вместе с дыханием корней формирует эмиссию диоксида углерода из почвы (часто называемую дыханием почвы). Сравнение величин эмиссии в разных местообитаниях позволяет делать заключения о характере действия факторов, контролирующих деструкционные процессы в почве.

Связь с проблемой глобального потепления, а также технологический прогресс, обеспечивший массовую доступность инфракрасных газоанализаторов, привел к активизации исследований дыхания почвы в XXI веке. Однако исследования влияния лесных посадок на эмиссию CO<sub>2</sub> из почвы для территории России немногочисленны и относятся к уже упоминавшейся территории Каменной степи (Благодатский и др., 2008; Ходжаева, Семенов, 2015). Цель настоящей работы состоит в экспериментально-полевой оценке влияния искусственных лесных насаждений на эмиссию диоксида углерода из почвы в аридных регионах Поволжья и Подонья.

## ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

Измерения почвенной эмиссии диоксида углерода выполняли на развернутой в южной части европейской части России сети точек наблюдения (Каганов, 2012). Основной системы объектов стали искусственные лесные насаждения, созданные в начале и середине XX в. в ходе широко-масштабных опытов по облесению лесостепных и степных территорий. Выбор мест измерения проводили на основе метода ключевых участков, с тем чтобы точки измерений обеспечивали необходимый уровень представительности растительного и почвенного покрова для каждого из рассматриваемых объектов.

На участках с лесной растительностью были устроены постоянные пробные площади размером 50 × 50 м с выполнением сплошной перечислительной таксации древостоя. На объекте Зеленый сад, расположенном на территории ГПЗ “Богдинско-Баскунчакский” в Астраханской обл., размер пробной площади изменен на 62.5 × 10 м, что обусловлено конструкцией лесных полос. В качестве контрольных участков были использованы многолетние залежи с зональной степной

растительностью. Некоторые из этих участков периодически используются в качестве сенокосов. Для получения сведений о почвенном покрове на ключевых участках были заложены разрезы с выполнением морфогенетического описания почвенных профилей и установлением классификационной принадлежности рассматриваемых почв. Измерения потоков диоксида углерода проводили во второй половине августа 2020 и 2021 гг. на 5 объектах сети.

Объект Каменная степь располагается в Таловском р-не Воронежской обл. на территории природного заказника “Каменная степь”, вошедшего в состав Воронежского заповедника. Данный объект был создан в конце XIX в. как один из 3 научно-исследовательских участков “Особой экспедиции” В.В. Докучаева. В качестве участка с лесной растительностью нами использована лесная полоса № 40, высаженная в 1903 г. лесничим Н.А. Михайловым. Насаждение располагается на водораздельном участке в виде широкой ленты длиной 725 м и шириной до 130 м, ориентированной с севера на юг. Центральная часть лесной полосы ранее имела разделение на 12 опытных участков, которые представляли собой разнообразные варианты смешения дуба черешчатого (*Quercus robur*) с другими древесными породами. На пробной площади, где выполняли измерения эмиссии диоксида углерода, древесный ярус составляют дуб черешчатый и клен остролистный (*Acer platanoides*) с небольшой примесью вяза гладкого (*Ulmus laevis*). Насаждение преимущественно мертвопокровное, живой напочвенный покров имеет разреженный характер и представлен экземплярами бузины черной (*Sambucus nigra* L.), ландыша майского (*Convallaria majalis* L.) и гравилата городского (*Geum urbanum* L.), а также всходами клена остролистного. Мертвый напочвенный покров (лесную подстилку) формируют листья и мелкие ветви клена остролистного и дуба черешчатого, мощность подстилки составляет 3–5 см. Контрольный участок с травяной растительностью располагается к востоку от лесополосы на многолетней залежи с режимом ежегодного кошения (заповедный участок “Косимая степь”). Растительность представлена разнотравно-злаковыми степными сообществами с богатым видовым составом. Фоновый почвенный покров на объекте представлен черноземом миграционно-мицеллярным (Haplic Chernozem (Loamic, Hureghmic)).

Объект Козловская лесная дача располагается в Руднянском р-не Волгоградской обл. Облесенный участок находится в центральной части массивного лесного насаждения, которое представляет собой одну из так называемых Генковских лесополос, посаженную в начале XX в. по проекту лесовода Н.К. Генко. Насаждение имеет форму ломаной линии, располагающейся на водоразде-

ле рек Терсы и Щелкана. Протяженность лесополосы — около 7 км, ширина — более 600 м. В составе древесного яруса клен остролистный с небольшой примесью дуба черешчатого. Насаждение мертвопокровное, единично под пологом древостоя отмечаются всходы клена остролистного и экземпляры подмаренника душистого (*Galium odoratum*) Лесная подстилка имеет мощность 2–5 см и состоит из листьев и мелких ветвей клена остролистного. Контрольный участок со степной растительностью расположен к северу от лесного насаждения и представляет собой многолетнюю залежь, используемую в качестве сенокоса. Растительность представлена разнотравно-дерновинно-злаковыми и полынно-злаковыми степными сообществами. Фоновыми почвами на объекте являются черноземы миграционно-мицеллярные (Haplic Chernozem (Loamic, Tonguic)).

Следующий объект находится в Волжском р-не Самарской обл. Лесное насаждение на объекте представлено Тепловской лесополосой № 18, входящей в группу Тепловских лесополос, которые также относятся к Генковским, созданным в конце XIX—начале XX в. Насаждение представляет собой лесной массив длиной 4 км и шириной 675 м, расположенный на водоразделе и ориентированный с запада на восток. В составе древостоя на участке измерений клен остролистный и дуб черешчатый с примесью вяза гладкого. Насаждение мертвопокровное, мощность подстилки до 5 см. Травяной участок располагается к северу от лесополосы и представляет собой многолетнюю залежь. Растительность на контрольном участке разнотравно-злаковая с доминированием вейника наземного (*Calamagrostis epigeios* L.). Почва травяного участка — агрочернозем дернинный агропереуплотненный (Haplic Chernozem (Loamic, Aric)).

Объект Белая Калитва находится в Белокалитвинском р-не Ростовской обл. Часть объекта с древесной растительностью является 1-м участком государственной защитной лесной полосы (ГЗЛП) Белая Калитва—Пенза, высаженной в 50-е гг. XX в. Насаждение имеет вид трех ломаных линий из лесных полос шириной 60 м с расстоянием между полосами 300 м. Точка измерений располагается в восточной линии ГЗЛП, ориентированной с севера на юг. В составе лесного насаждения — ясень обыкновенный, дуб черешчатый, робиния лжеакация (*Robinia pseudoacacia* L.) и клен остролистный, отмечаются отдельные экземпляры абрикоса обыкновенного (*Armeniaca vulgaris*). В живом напочвенном покрове лесополосы присутствуют чесночница черешчатая (*Alliaria petiolata*), марь белая (*Chenopodium album* L.), в местах размыкания древесного полога формируются группы всходов ясени обыкновенного и клена остролистного. Травяной участок расположен западнее, в центральной части межполосного пространства, на многолетней залежи. Раститель-

Таблица 1. Таксационные характеристики лесных участков

Объект	Регион	Координаты, град.		Год таксации	Состав древостоя	Запас древесины, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Запас сухостоя, м <sup>3</sup> га <sup>-1</sup>	Показатели по доминирующей породе		
		сев. широты	вост. долготы					возраст, лет	диаметр средний, см	высота средняя, м
Каменная степь	Воронежская обл.	51.028983	40.726155	2020	8Д2Кло ед. Вг	784.0	13.7	118	52.2	32.2
Козловская лесная дача	Волгоградская обл.	50.971120	44.345609	2020	10Кло + Д	360.8	13.5	75	30.8	25.7
Самара	Самарская обл.	52.978029	49.938028	2021	6Кло4Д ед. Вг	349.1	4.8	73	26.9	23.4
Белая Калитва	Ростовская обл.	48.257966	40.672617	2021	4Ясо4Д2А + Кло ед. Аб	178.3	4.2	58	19.1	12.2
Баскунчак	Астраханская обл.	48.056400	46.897052	2020	10Вп	91.1	21.5	61	21.2	8.8

Примечание. Обозначение древесных пород: Д – дуб черешчатый; Кло – клен остролистный; Вг – вяз гладкий; Вп – вяз приземистый; Ясо – ясень обыкновенный; А – робиния псевдоакация; Аб – абрикос обыкновенный.

ность разнотравно-злаковая, одним из доминирующих видов является вейник наземный (*Calamagrostis epigejos* L.). Фоновыми почвами объекта являются псаммоземы (Rubic Arenosol (Humic)).

Последний из рассматриваемых объектов находится на территории Государственного природного заповедника “Богдинско-Баскунчакский” в Ахтубинском р-не Астраханской обл. Участки располагаются на территории бывшей Богдинской опытной станции “Зеленый сад”, где в середине XX в. изучали рост разнообразных древесных пород в условиях полупустыни. Лесное насаждение, в котором проводили измерения, представляет собой узкую (до 12 м) защитную лесополосу из вяза приземистого (*Ulmus pumila* L.), ориентированную с северо-запада на юго-восток. Под древесным пологом отмечают марь белая и ковыль Лессинга (*Stipa lessingiana*). Растительность травяного участка, расположенного восточнее лесополосы, сильно изрежена и представлена преимущественно полынью малоцветковой (*Artemisia pauciflora*) и полынью Лерхе (*Artemisia fragrans*), между экземплярами полыни отмечают участки почвы, не покрытые растительностью. Фоновыми почвами объекта являются бурые аридные гипс-содержащие (Protic Gypsic Arenosol).

Измерения проводили камерным методом с использованием портативного газоанализатора, смонтированного на базе сенсора AZ7752. Детальное описание приборной базы и подхода к расчету потоков приведено в работе Д.В Карелина и др. (2014). Концентрацию диоксида углерода измеряли в пластиковых трубах диаметром 11 см и высотой 15–20 см. Трубы вкапывали в почву на

глубину 5 см не менее чем за 12 ч до начала измерения и удаляли надземные части растений. При измерении трубу герметично накрывали пластиковой крышкой, соединенной шлангами с газоанализатором и снабженной вентилятором. Экспозиция крышки на базе составляла около 2 мин, отсчеты концентрации диоксида углерода записывали через каждые 20 с. Одновременно с измерениями концентрации диоксида углерода регистрировали температуру приземного слоя воздуха на высоте 30 см и температуру почвы на глубине 10 см с помощью термометра Checktemp 1, а также объемную влажность почвы в слое 0–7 см с помощью влагомера НН2 путем прокола почвы сверху. Одновременно на каждом лесном и травяном участке использовали по 9–10 труб, измерения на каждой трубе проводили 3 раза за сутки (около 10:00, 14:00 и 18:00). При обработке сначала усредняли все значения, полученные на данном участке в данный срок. Это усредненное значение использовали в дальнейшем анализе при проверке статистических гипотез и построении регрессионных уравнений. Единицей измерения потока CO<sub>2</sub> в настоящей работе выбраны г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup> как наиболее часто употребляемые в научных публикациях, хотя фактически приводится оценка мгновенных, а не суточных значений.

Регистрируемая при проведении измерений потоков диоксида углерода влажность почвы характеризует лишь верхний слой почвы толщиной 0–7 см, в то время как влажность нижних слоев почвы может отличаться от поверхностной. В тех ситуациях, когда на объекте устраивали почвенные разрезы для отбора образцов в дни, близкие к

периоду измерения потоков, осуществляли измерения влажности почвы влагомером HH2 путем горизонтальных проколов стенки разреза. Всего проводили по 5 проколов в слоях 0–10, 11–20, 21–30, 31–40, 41–50, 51–75, 75–100 см.

В качестве дополнительного фактора, который может влиять на величину почвенной эмиссии диоксида углерода, рассматривали нормализованный относительный вегетационный индекс (*NDVI*). Значения *NDVI* определены с помощью ресурса OneSoil (2022) для участков размером примерно 50 × 50 м, соответствовавших пробным площадям в лесных насаждениях либо включавших точки измерения эмиссии на площадях с травяной растительностью. Регистрация *NDVI* проведена во второй половине августа 2021 г., фенологически соответствующей периоду проведения измерений потоков.

Предварительную обработку данных (расчет потоков по изменению концентраций, вычисление средних значений и т.д.) проводили в пакете Microsoft Office Excel 2010. В качестве меры неопределенности использовали стандартную ошибку среднего. Перед тестом на равенство выборочных средних по критерию Стьюдента проводили проверку равенства дисперсий по критерию Фишера. Многофакторный регрессионный анализ осуществляли в пакете Statsoft Statistica 10.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Хорошо известно, что лесные насаждения смягчают температурные условия местности. Это положение вполне справедливо и для ограниченного массива температурных данных, полученного нами во второй половине августа 2020 и 2021 гг. во время проведения измерений почвенной эмиссии. Средняя температура приземного слоя воздуха в лесных насаждениях составила  $23.0 \pm 0.05^\circ\text{C}$  при  $25.1 \pm 0.31^\circ\text{C}$  на участках с травяной растительностью, различия статистически значимы ( $P < 0.01$ ). Разница между температурами почвы на глубине 10 см оказалась еще выше в сравнении с воздухом:  $17.1 \pm 0.26$  и  $22.1 \pm 0.13^\circ\text{C}$  на лесных и травяных участках соответственно ( $P < 0.01$ ). Смягчающее действие лесного насаждения было тем сильнее, чем выше температура воздуха либо почвы (рис. 1а и 1б). Отметим, что замеры температуры проведены в светлое время суток второй половины августа, поэтому значительное влияние лесного насаждения на температуру почвы связано в первую очередь с затенением кронами поверхности почвы и предотвращением прямого нагрева солнцем.

Несколько неожиданно объемная влажность верхнего слоя почвы (рис. 1в) в лесных насаждениях ( $5.3 \pm 0.21\%$ ) была значимо меньше, чем на безлесных участках ( $7.4 \pm 0.19\%$ ) ( $P = 0.02$ ). Такая

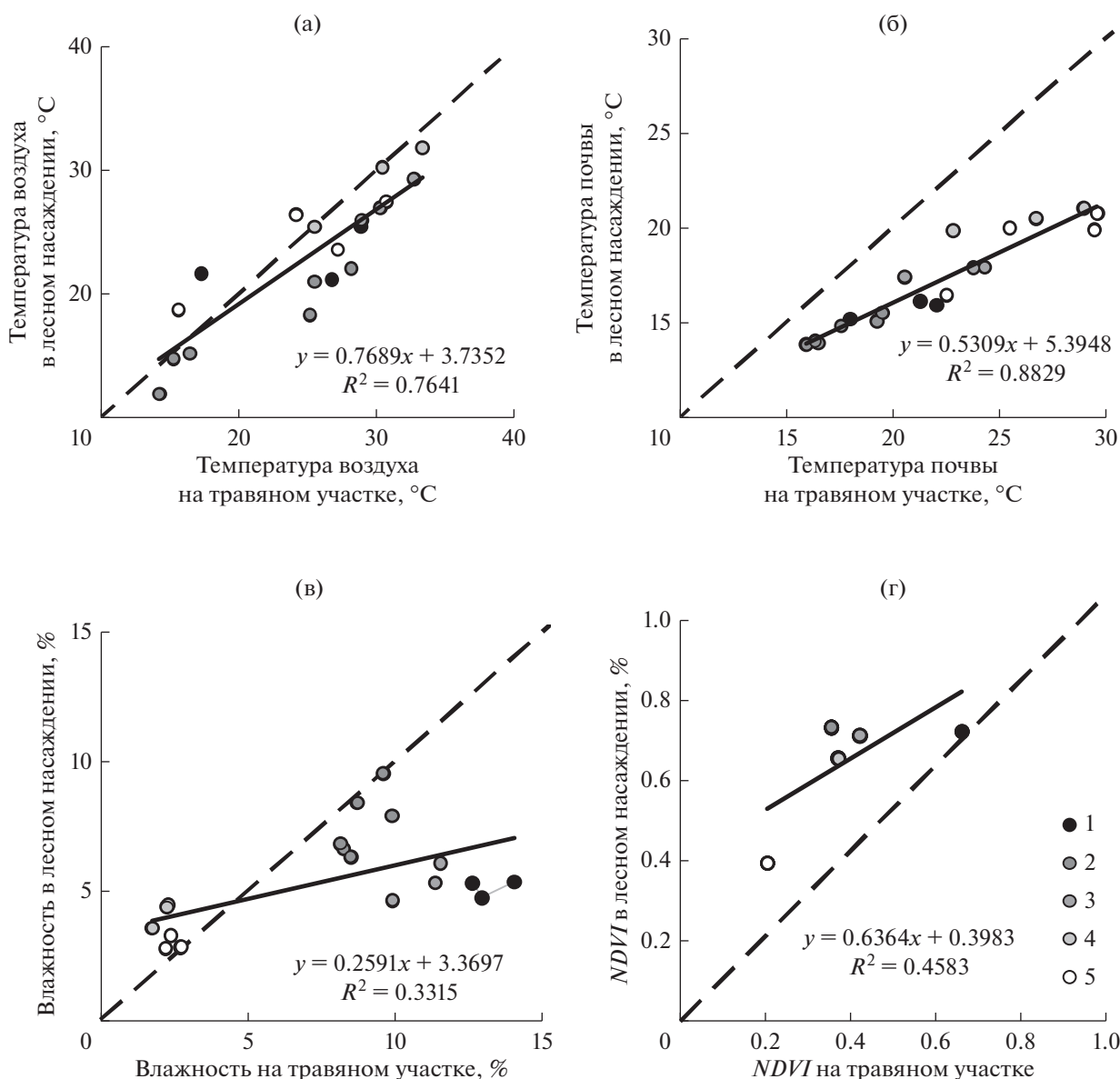
ситуация входит в противоречие с известными представлениями о благоприятном влиянии лесных насаждений на гидрологический режим почвы. Однако оценка влажности по профилю почвы (рис. 2) показала, что в слоях 10–50 см влажность почвы под лесными насаждениями превышает таковую под травяной растительностью. Средняя влажность по профилю почвы под лесными участками составляла в Каменной степи  $12.0 \pm 0.6\%$ , на Козловской лесной даче –  $10.3 \pm 0.5\%$ , под травяными участками  $10.4 \pm 0.7$  и  $7.3 \pm 0.3\%$  соответственно, различия в парах участков были статистически значимы ( $P < 0.02$ ).

*NDVI* (рис. 1г) лесных участков составлял  $0.642 \pm 0.202$ , а травяных –  $0.383 \pm 0.202$ , различия значимы ( $P < 0.01$ ). Как хорошо известно, *NDVI* тесно связан с продукционными характеристиками растительного покрова. Поскольку *NDVI* лесных участков был в 1.7 раза выше, чем травяных, можно заключить, что первичная продуктивность лесных насаждений заметно превышает таковую для травяных участков.

Почвенная эмиссия диоксида углерода в лесных насаждениях значимо выше ( $2.99 \pm 0.26 \text{ г С м}^{-2}$ ) в сравнении с безлесными участками ( $2.20 \pm 0.11 \text{ г С м}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). Размах значений эмиссии из почвы под лесными насаждениями составил  $1.36 \pm 0.13$  –  $5.37 \pm 1.04 \text{ г С м}^{-2}$ , в то время как на травяных участках этот размах был  $0.61 \pm 0.05$  –  $4.77 \pm 0.65 \text{ г С м}^{-2}$  (рис. 3). Разница между максимальным и минимальным значениями по совокупностям лесных и травяных участков оказалась очень близкой – 4.00 и 4.16  $\text{г С м}^{-2}$  соответственно. Это означает, что факторы, контролирующие величины почвенной эмиссии, скорее всего, действуют сходным образом на лесных и травяных участках.

Рассмотрим результаты однофакторного линейного регрессионного анализа, показывающего связь почвенной эмиссии с величинами измеренных экологических факторов. Для температуры почвы получен парадоксальный результат (рис. 4а): как на лесных, так и на травяных участках эмиссия отрицательно сопряжена с температурой почвы, причем для лесных участков эта сопряженность является статистически значимой ( $P = 0.01$ ). Конечно же, этот результат не опровергает типовую экспоненциальную зависимость дыхания почвы от температуры, установленную во множестве работ и активно используемую в моделировании (Lloyd, Taylor, 1994; Raich, Potter, 1995). В нашем случае вариации почвенной эмиссии за счет других факторов были намного выше и полностью замаскировали реальную картину воздействия температурного фактора.

При однофакторном регрессионном анализе более значимое влияние на величину эмиссии оказала влажность (рис. 4б), в диапазоне от 1.7 до



**Рис. 1.** Сравнение температур воздуха (а) и почвы (б), влажности почвы (в) и *NDVI* (г) на травяных и лесных участках. Пунктир соответствует линии  $y = x$ . Объекты: 1 – Каменная степь; 2 – Козловская лесная дача; 3 – Самара; 4 – Белая Калитва; 5 – Баскунчак.

14.1% ее влияние было положительным и статистически значимым как для лесных, так и травяных участков ( $P < 0.01$ ). Для описания зависимости почвенной эмиссии от влажности почвы обычно используют унимодальные функции (Valogh et al., 2011). Это означает, что имеется оптимальный диапазон влажности с максимальными значениями эмиссии, в то время как значения влажности, меньшие или большие оптимального диапазона, приводят к снижению эмиссии. В нашем случае имели место небольшие значения влажности, и именно их географические вариации сказывались на почвенной эмиссии, маскируя влияние температуры. Точно такая же ситуа-

ция описана для пойменных средиземноморских лесов (Chang et al., 2014). Оценка пороговой влажности почвы, ниже которой ее влияние на величину эмиссии преобладает над температурой, в цитируемой работе составляет 17–20%. В нашем случае значения влажности поверхностного слоя почвы не превышали 10% на лесных и 14% на травяных участках.

Напомним, что и влажность, и температура почвы были меньше на лесных участках в сравнении с травяными. Поэтому эти факторы не могут объяснить того, почему же почвенная эмиссия выше в лесных насаждениях. И здесь приобретает

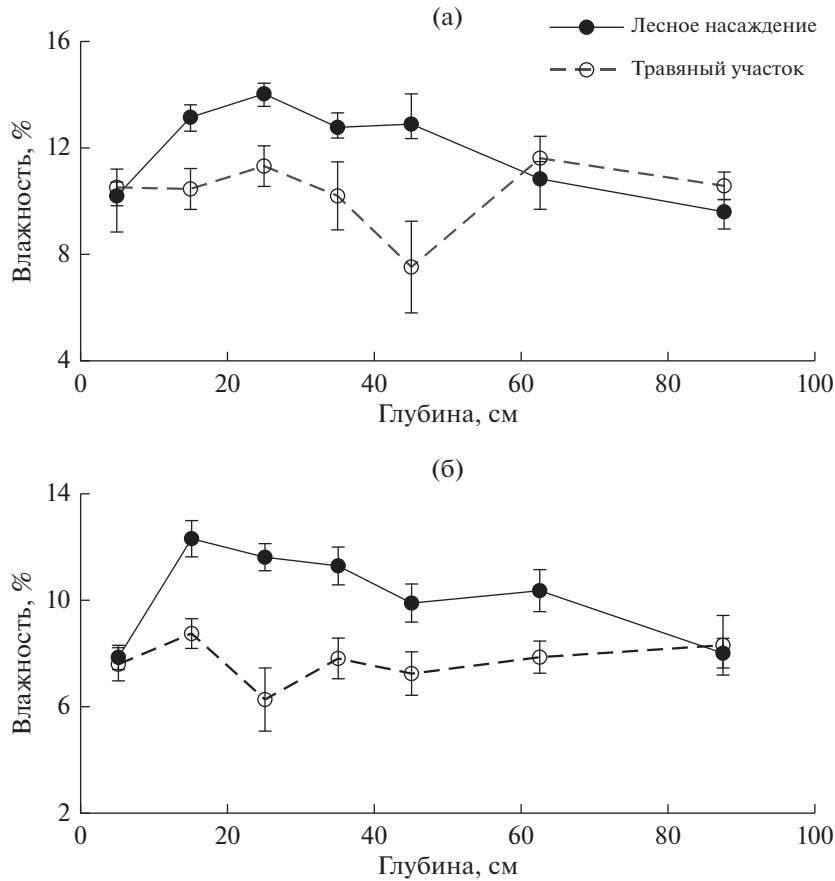


Рис. 2. Влажность по слоям почвы для объектов Каменная степь (а) и Козловская лесная дача (б).

особое значение *NDVI*, значения которого выше именно на лесных участках. Почвенная эмиссия демонстрирует статистическую значимую связь с *NDVI* ( $P < 0.01$ ) как на лесных, так и на травяных

участках (рис. 4в). Эта связь, с одной стороны, формируется за счет того, что лесные насаждения обладают большей биомассой, чем травяные участки. Наличие большей массы фотосинтезирующих органов приводит к большему *NDVI*, а наличие большей массы корней – к повышенной эмиссии диоксида углерода из почвы, включающей дыхание корней. В то же время повышенная величина фотосинтеза вызывает увеличение выделения в почву корневых экссудатов, легко усваиваемых микроорганизмами почвы, а значит, и возрастание гетеротрофной компоненты дыхания (Sun et al., 2017).

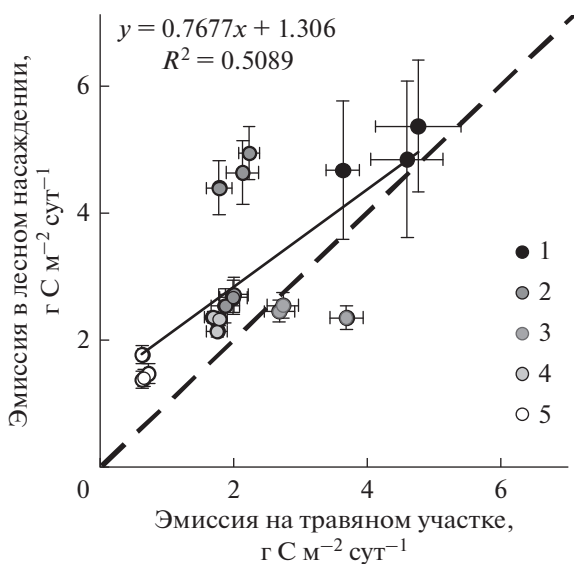
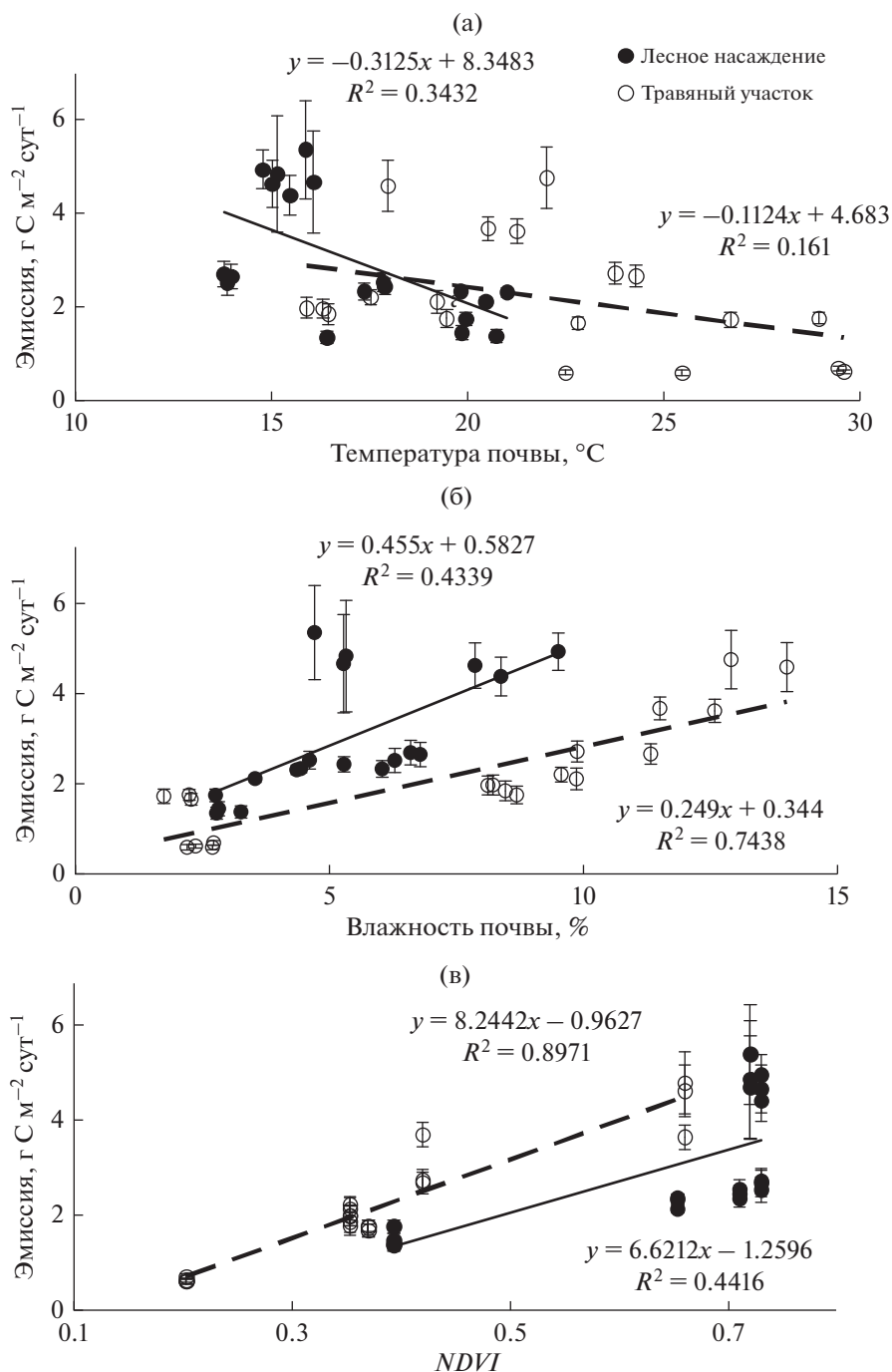


Рис. 3. Сравнение величин эмиссии диоксида углерода из почвы на травяных и лесных участках. Обозначения объектов как на рис. 1.

Наличие фактора, отражающего различие величин эмиссии на лесных и травяных участках, позволяет сформулировать единое регрессионное уравнение, описывающее весь полученный массив данных. Зависимой переменной служит величина почвенной эмиссии диоксида углерода ( $SR$ , г С м<sup>-2</sup> сут<sup>-1</sup>), независимыми – температура почвы на глубине 10 см ( $T_s$ , °С), объемная влажность почвы в слое 0–7 см ( $SM$ , %) и *NDVI*. Предварительный регрессионный анализ показал, что вклад переменной  $T_s$  незначим, потому в финальном уравнении были оставлены только независимые переменные  $SM$  и *NDVI*:



**Рис. 4.** Связь величин эмиссии диоксида углерода из почвы с температурой почвы (а), влажностью почвы (б) и  $NDVI$  (в) на травяных и лесных участках.

$$SR = -0.714 + 0.148SM + 4.61NDVI, \quad (1)$$

$$R^2 = 0.72, n = 38, P < 0.01.$$

Коэффициент детерминации уравнения (1) равен 0.72, что свидетельствует о хорошей степени описания вариации исходных данных. Обычно такие коэффициенты детерминации получают при моделировании динамики почвенной эмис-

сии в пределах одного местообитания, в то время как при попытках описания величин эмиссии для совокупности местообитаний встречаются некоторые трудности. Переменная  $NDVI$  в нашем случае позволяет охарактеризовать специфику исследованных местообитаний. Сравнение исходных значений эмиссии и рассчитанных по найденному уравнению (рис. 5) показывает, что



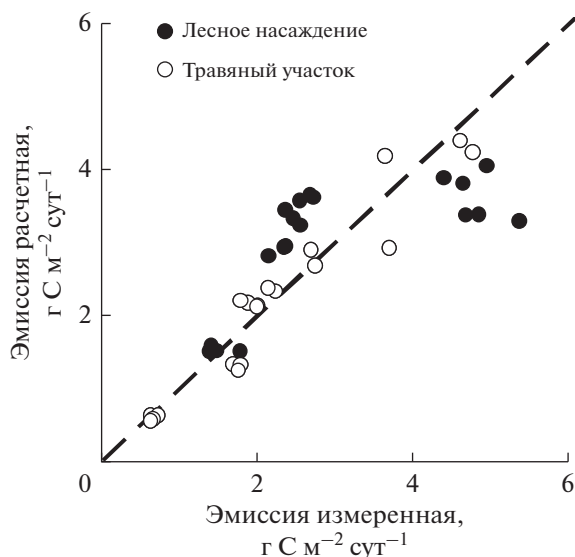


Рис. 5. Сравнение расчетных и измеренных величин эмиссии диоксида углерода из почвы.

расчетные значения для лесных и травяных участков действительно формируют единое облако. Следует напомнить, что наши измерения были проведены во второй половине августа, то есть ближе к концу вегетационного сезона. В какой степени рассмотренный набор факторов ( $T_s$ ,  $SM$ ,  $NDVI$ ) достаточен для описания сезонной динамики эмиссии по совокупности местообитаний, покажут будущие исследования.

Сравним полученные нами величины эмиссии из черноземных почв с данными других исследователей. Для удобства такого сравнения исходные авторские единицы измерения потоков были пересчитаны нами в  $г C м^{-2} сут^{-1}$ . Результаты двухлетних полевых наблюдений за эмиссией  $CO_2$  из черноземных почв Тунгуйской котловины Забайкалья (Чимитдоржиева, Чимитдоржиева, 2010) выявили высокую сезонную изменчивость почвенной эмиссии диоксида углерода. В целинных черноземах максимальные величины наблюдались в июне-июле и составляли  $5-7 г C м^{-2} сут^{-1}$ . Во второй половине августа происходило заметное уменьшение до  $2.0-2.5 г C м^{-2} сут^{-1}$ . Примерно такие же значения были найдены для 20-летних залежей на каштановых почвах Тунгуйской котловины (Чимитдоржиева, 2010). Цитируемые величины близки к середине интервала значений эмиссии, найденных нами для травяных участков. По мнению авторов цитируемых работ, весной и осенью преимущественное влияние на эмиссию оказывала температура, летом — влажность. В нашем случае влажность оставалась ведущим фактором эмиссии во второй половине августа.

Почвенная эмиссия в некосимой степи на типичном черноземе Центрально-Черноземного

заповедника в мае-июне составляла  $6.5 г C м^{-2}$  (Саржанов и др., 2015). Эта оценка заметно выше приводимых нами, что связано с сезонной динамикой эмиссии. В работе Н.Д. Ананьевой и др. (2020), также выполненной в Центрально-Черноземном заповеднике, эмиссия из черноземов типичных для начала сентября оценивается под целинной степью в  $4.6 г C м^{-2}$ , а под широколиственным лесом — в  $5.3 г C м^{-2}$ . Указанные величины близки к верхнему диапазону наших оценок. Сентябрьские значения эмиссии были выше в широколиственном лесу, однако в целом за теплый сезон (май-октябрь) эмиссия оказалась больше на степном участке.

В работе В.М. Семенова и др. (2018) приводятся значения дыхания почвы на единицу массы, измеренные в лабораторных условиях для образцов с удаленными остатками растений. Для Воронежской области дыхание чернозема типичного под старовозрастной лесной полосой по слоям почвы было на 13–33% выше, чем в черноземе обыкновенном под косимой залежью.

Обширный материал для сравнений дают работы, выполненные в Китае. Эмиссия диоксида углерода из палевых почв Лессового плато было на 36% выше в лесных посадках в сравнении с травяными залежами (Zhang et al., 2015). В другой работе, выполненной на Лессовом плато, дыхание почвы на участках, облесенных робинией лжеакацией, на 3.5% превышало поток из почвы под травяной растительностью (Zhang et al., 2021). В умеренной зоне Китая годовое дыхание почвы возросло на 3, 6, 14 и 22% после конверсии травяных участков в плантации вечнозеленых хвойных, кустарников, листопадных хвойных и лиственных пород соответственно (Wang et al., 2013).

Однако в регионе Кокимбо (Чили) дыхание серо-бурых пустынных почв на облесенных участках было на 14% меньше в сравнении с почвой под исходной травяно-кустарниковой растительностью (Perez-Quezada et al., 2012). В этом исследовании влажность в течение всего года была более важным фактором динамики дыхания, чем температура.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты, полученные в настоящей работе и доступные в научных публикациях, позволяют заключить, что эмиссия диоксида углерода, как правило, возрастает после конверсии травяного растительного покрова в древесный. Однако возрастание эмиссии не сопровождается потерями запаса углерода почвы, который либо остается постоянным, либо несколько возрастает. Такая ситуация связана с увеличением первичной продукции в лесных посадках по сравнению с исходным травяным растительным покровом. Данный

характер изменения запасов и потоков углерода даже в богатых углеродом аридных почвах делает вполне содержательными масштабные планы по созданию защитных лесных насаждений с целью усиления поглощения углерода, а также адаптации к изменениям климата.

### БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность О.В. Честных (МГУ имени М.В. Ломоносова) за участие и помощь в проведении полевых работ, Н.Г. Пирогову (ГПЗ “Богдинско-Баскунчакский”) за организационную поддержку измерений на территории заповедника

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ананьева Н.Д., Сушко С.В., Иващенко К.В., Васенев В.И.* Микробное дыхание почв подтайги и лесостепи европейской части России: полевой и лабораторный подходы // Почвоведение. 2020. № 10. С. 1276–1286.
- Благодатский С.А., Богомоллова И.Н., Благодатская Е.В.* Микробная биомасса и кинетика роста микроорганизмов в черноземах при различном сельскохозяйственном использовании // Микробиология. 2008. Т. 77. № 1. С. 113–120.
- Ваганов Е.А., Порфирьев Б.Н., Широков А.А., Колпаков А.Ю., Пыжнев А.И.* Оценка вклада российских лесов в снижение рисков климатических изменений // Экономика региона. 2021. Т. 17. № 4. С. 1096–1109.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 г. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Каганов В.В.* Изменение экосистемных запасов углерода при облесении в степной и полупустынной зонах Европейской части России // Проблемы региональной экологии. 2012. № 4. С. 7–12.
- Карелин Д.В., Почикалов А.В., Замолотчиков Д.Г., Гитарский М.Л.* Факторы пространственно-временной изменчивости потоков CO<sub>2</sub> из почв южнотаежного ельника на Валдае // Лесоведение. 2014. № 4. С. 56–66.
- Клименко О.Е., Клименко Н.И.* Изменение свойств агро-черноземов сегрегационных Крыма под влиянием различных лесонасаждений // Почвоведение. 2021. № 5. С. 606–619.
- Липка О.Н., Корзухин М.Д., Замолотчиков Д.Г., Добролюбов Н.Ю., Крыленко С.В., Богданович А.Ю., Семенов С.М.* Роль лесов в адаптации природных систем к изменениям климата // Лесоведение. 2021. № 5. С. 531–546.
- Птичкинов А.В., Шварц Е.А., Кузнецова Д.А.* О потенциале поглощения парниковых газов лесами России для снижения углеродного следа экспорта отечественной продукции // Доклады Российской академии наук. Науки о Земле. 2021. Т. 499. № 2. С. 181–184.
- Розенберг Г.С., Саксонов С.В., Сенатор С.А.* Запоздалый опыт экологических экспертиз глобальных планов преобразования природы в России // Вопросы степеведения. 2018. № 14. С. 15–35.
- Семенов В.М., Козут Б.М., Зинякова Н.Б., Масютенко Н.П., Малюкова Л.С., Лебедева Т.Н., Тулина А.С.* Биологически активное органическое вещество в почвах Европейской части России // Почвоведение. 2018. № 4. С. 457–472.
- Саржанов Д.А., Васенев В.И., Сотникова Ю.Л., Тембо А., Васенев И.И., Валентини Р.* Краткосрочная динамика и пространственная неоднородность эмиссии CO<sub>2</sub> почвами естественных и городских экосистем Центрально-Черноземного региона // Почвоведение. 2015. № 4. С. 469–478.
- Смирнова М.А., Геннадиев А.Н., Чендев Ю.Г., Ковач Р.Г.* Влияние полезащитных лесных насаждений на локальное разнообразие почв (Белгородская область) // Почвоведение. 2020. № 9. С. 1041–1052.
- Турусов В.И., Чевердин Ю.И., Беспалов В.А., Титова Т.В.* Изменения физических свойств черноземов сегрегационных в агролесоландшафтах Центрального Черноземья // Известия высших учебных заведений. Лесной журн. 2020. № 4(376). С. 95–112.
- Ходжаева А.К., Семенов В.М.* Распределение активного органического вещества в профиле почв природных и сельскохозяйственных экосистем // Почвоведение. 2015. № 12. С. 1496–1504.
- Чевердин Ю.И., Вавин В.С., Ахтямов А.Г., Воронин Д.А.* Роль лесных насаждений в изменении свойств черноземов // Достижения науки и техники АПК. 2014. № 2. С. 11–14.
- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Лукин С.В., Соэр Т.Д., Заздравных Е.А., Белванцев В.Г., Смирнова М.А.* Изменение лесостепных черноземов под влиянием лесополос на юге Среднерусской возвышенности // Почвоведение. 2020. № 8. С. 934–947.
- Чендев Ю.Г., Геннадиев А.Н., Смирнова М.А., Лебедева М.П., Плотникова О.О., Заздравных Е.А., Шаповалов А.С.* Ранние стадии эволюции черноземов под лесной растительностью (Белгородская область) // Почвоведение. 2022. № 4. С. 387–404.
- Чимитдоржиева Э.О.* Продуцирование диоксида углерода сухостепными почвами Забайкалья // Агрохимический вестник. 2010. № 4. С. 33–35.
- Чимитдоржиева Э.О., Чимитдоржиева Г.Д.* Особенности эмиссии углекислого газа из мучнистокарбонатных черноземов Тугнуйской котловины Забайкалья // Агрохимия. 2010. № 11. С. 45–49.
- Balogh J., Pintér K., Fóti Sz., Cserhalmi D., Papp M., Nagy Z.* Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands // Soil Biology and Biochemistry. 2011. V. 43. № 5. P. 1006–1013.
- Chang C. T., Sabaté S., Sperlich D., Poblador S., Sabater F., Gracia C.* Does soil moisture overrule temperature dependence of soil respiration in Mediterranean riparian forests? // Biogeosciences. 2014. V. 11. P. 6173–6185.
- Deng L., Kim D.-G., Li M., Huang C., Liu Q., Cheng M., Shangguan Z., Peng C.* Land-use changes driven by “Grain for Green” program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China // Global and Planetary Change. 2019. V. 177. P. 101–115.
- Lloyd J., Taylor J.A.* On the temperature dependence of soil respiration // Functional Ecology. 1994. V. 8. P. 315–323.
- Hong S., Yin G., Piao S., Dybzinski R., Cong N., Li X., Wang K., Peñuelas J., Zeng H., Chen A.* Divergent responses of soil organic carbon to afforestation // Nature Sustainability. 2020. V. 3. P. 694–700.
- OneSoil. 2022. URL: <https://onesoil.ai/ru> (дата обращения: 21.02.2022)
- Perez-Quezada J.F., Bown H.E., Fuentes J.P., Alfaro F.A., Franck N.* Effects of afforestation on soil respiration in an

- arid shrubland in Chile // *J. Arid Environments*. 2012. V. 83. P. 45–53.
- Sun L., Ataka M., Kominami Y., Yoshimura K. Relationship between fine-root exudation and respiration of two *Quercus* species in a Japanese temperate forest // *Tree Physiology*. 2017. V. 37. P. 1011–1020.
- Raich J.W., Potter C.S. Global patterns of carbon dioxide emission from soils // *Global Biogeochemical Cycles*. 1995. V. 9. № 1. P. 23–36.
- Wang J., Feng L., Palmer P.I., Liu Y., Fang S., Bösch H., O'Dell C.W., Tang X., Yang D., Liu L., Xia C. Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data // *Nature*. 2020. V. 586. P. 720–723.
- Wang W., Zeng W., Chen W., Zeng H., Fang J. Soil respiration and organic carbon dynamics with grassland conversions to woodlands in temperate China // *PLOS ONE*. 2013. V. 8. № 8. Art. No e71986.
- Xiao H.B., Shi Z.H., Li Z.W., Chen J., Huang B., Yue Z.J., Zhan Y.M. The regulatory effects of biotic and abiotic factors on soil respiration under different land-use types // *Ecological Indicators*. 2021. V. 127. Art. No 107787.
- Zhang Y., Guo S., Liu Q., Jiang J., Wang R., Li N. Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau // *Ecological Engineering*. 2015. V.74. P. 196–205.

## Forest Plantations Affect Carbon Dioxide Emission from Soils in Volga and Don Region

D. G. Zamolodchikov<sup>1, 2, \*</sup>, V. V. Kaganov<sup>1</sup>, and A. S. Mostovaya<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Center for Forest Ecology and Productivity of the RAS, Profsoyuznaya st., 84/32, bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

<sup>2</sup>Higher School of Economics, Pokrovskiy blvd., 11, Moscow, 109028 Russia

\*E-mail dzamolod@mail.ru

The formation of a soil organic carbon pool is determined by the balance of incoming and outgoing fluxes. The incoming fluxes are associated with the processes of dying off and further transformation of the organic matter of plants, the outgoing fluxes are primarily formed by the processes of organic matter destruction, although in many ecosystems the removal of carbon with water flows is also important. Heterotrophic destruction of soil organic matter, together with roots respiration, forms the emission of carbon dioxide from the soil. Comparing the emission values in different habitats makes it possible to draw conclusions about the nature of the factors that control the degradation processes in the soil. Measurements of carbon dioxide emissions from the soil were carried out by the chamber method in the second half of August 2020–2021 at 5 sites in the Voronezh, Volgograd, Astrakhan, Samara and Rostov regions. The work was carried out on pairs of plots covered with grass-dominated vegetation and forest plantations. Soil carbon dioxide emission in forest stands was significantly higher ( $2.99 \pm 0.26 \text{ g C m}^{-2}$ ) compared to grasslands ( $2.20 \pm 0.11 \text{ g C m}^{-2}$ ) ( $P < 0.01$ ). A statistical analysis of the correlation between emission values and soil temperature at a depth of 10 cm, volumetric soil moisture in the 0–7 cm layer, and the normalised difference vegetation index (*NDVI*) of vegetation cover was carried out. Humidity and *NDVI* were found to be significant emission factors, while temperature was not significant. The results obtained in this work and available in other scientific publications allowed us to conclude that the emission of carbon dioxide, as a rule, increased after the conversion of grass to tree cover. However, an increase in emissions was not accompanied by a loss of soil carbon stock, which either remained constant or increased slightly. An increase in *NDVI* indicated an increase in net primary production in forest plantations, that is, the modified ecosystem became a carbon sink with the totality of phytomass and soil pools. This pattern of change in carbon stocks and fluxes, even in carbon-rich arid soils, makes ambitious plans to create protective forest plantations to enhance carbon sequestration meaningful.

*Keywords:* forest growing, forest belts, carbon dioxide, emission, soil, chernozem, emission factors.

**Acknowledgements:** The study has been carried out with the support from the State contract with CEPF RAS № 121121600118-8 “Methodical approaches to assessing structural organisation and functioning of forest ecosystems” (field work) and RSF №№ 22-27-00641 “Climatic effects of large-scale forest growing in Russia’s arid regions” (data analysis).

## REFERENCES

- Ananyeva N.D., Sushko S.V., Ivashchenko K.V., Vasenev V.I. Soil microbial respiration in subtaiga and forest-steppe ecosystems of European Russia: field and laboratory approaches *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 10, pp. 1492–1501.
- Balogh J., Pintér K., Fóti Sz., Cserhalmi D., Papp M., Nagy Z., Dependence of soil respiration on soil moisture, clay content, soil organic matter, and CO<sub>2</sub> uptake in dry grasslands, *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, Vol. 43, No. 5, pp. 1006–1013.
- Blagodatskii S.A., Bogomolova I.N., Blagodatskaya E.V., Mikrobная биомасса и кинетика роста микроорганизмов в черноземках при различном сельскохозяйственном использовании (Microbial biomass and growth kinetics of microorganisms in chernozem soils under different farm land use modes), *Mikrobiologiya*, 2008, Vol. 77, No. 1, pp. 113–120.
- Chang C.T., Sabaté S., Sperlich D., Poblador S., Sabater F., Gracia C., Does soil moisture overrule temperature dependence of soil respiration in Mediterranean riparian forests?, *Biogeosciences*, 2014, Vol. 11, pp. 6173–6185.

- Chendev Y.G., Belevantsev V.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lukin S.V., Zazdravnykh E.A., Sauer T.J., Change of forest–steppe chernozems under the influence of shelterbelts in the south of the Central Russian upland, *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 8, pp. 1033–1045.
- Chendev Y.G., Gennadiev A.N., Smirnova M.A., Lebedeva M.P., Plotnikova O.O., Zazdravnykh E.A., Shapovalov A.S., Rannie stadii evolyutsii chernozemov pod lesnoi rastitel'nost'yu (Belgorodskaya oblast') (Early stages of chernozems evolution under forest vegetation (Belgorod oblast)), *Pochvovedenie*, 2022, No. 4, pp. 387–404.
- Cheverdin Y.I., Vavin V.S., Akhtyamov A.G., Voronin D.A., Rol' lesnykh nasazhdenii v izmenenii svoystv chernozemov (Role of wood plantings in change of properties of chernozems), *Dostizheniya nauki i tekhniki APK*, 2014, No. 2, pp. 11–14.
- Chimitdorzhieva E.O., Chimitdorzhieva G.D., Osobennosti emissii uglekislogo gaza iz muchnistokarbonatnykh chernozemov Tugnuiskoi kotloviny Zabaikal'ya (Emission of carbon dioxide from mealy calcareous chernozems in the Tugnuui Depression, Transbaikalia), *Agrokimiya*, 2010, No. 11, pp. 45–49.
- Chimitdorzhieva E.O., Produktivirovanie dioksida ugleroda sukhostepnyimi pochvami Zabaikal'ya (Carbon dioxide emission by chestnut soils of Transbaikalia), *Agrokhimicheskii vestnik*, 2010, No. 4, pp. 33–35.
- Deng L., Kim D.-G., Li M., Huang C., Liu Q., Cheng M., Shangguan Z., Peng C., Land-use changes driven by “Grain for Green” program reduced carbon loss induced by soil erosion on the Loess Plateau of China, *Global and Planetary Change*, 2019, Vol. 177, pp. 101–115.
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* (Report on climate features in the Russian Federation for 2020), Moscow: Rosgidromet, 2021, 104 p.
- Hong S., Yin G., Piao S., Dybzinski R., Cong N., Li X., Wang K., Peñuelas J., Zeng H., Chen A., Divergent responses of soil organic carbon to afforestation, *Nature Sustainability*, 2020, Vol. 3, pp. 694–700.
- Kaganov V.V., Izmenenie ekosistemnykh zapasov ugleroda pri oblesenii v stepnoi i polupustynnoi zonakh Evropeiskoi chasti Rossii (Changes in ecosystem carbon stocks in the afforestation of the steppe and semidesert zones of European Russia), *Problemy regional'noi ekologii*, 2012, No. 4, pp. 7–12.
- Karelin D.V., Pochikalov A.V., Zamolodchikov D.G., Girtarskii M.L., Factors of spatiotemporal variability of CO<sub>2</sub> fluxes from soils of southern taiga spruce forests of Valdai, *Contemporary Problems of Ecology*, 2014, Vol. 7, No. 7, pp. 743–751.
- Khodzhaeva A.K., Semenov V.M., Distribution of active organic matter in the soil profiles of natural and agricultural ecosystems, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 12, pp. 1361–1369.
- Klimenko O.E., Klimenko N.I., Changes in the properties of Crimean haplic chernozems under the impact of forest plantations *Eurasian Soil Science*, 2021, Vol. 54, No. 5, pp. 750–762.
- Lipka O.N., Korzukhin M.D., Zamolodchikov D.G., Dobrolyubov N.Y., Krylenko S.V., Bogdanovich A.Y., Semenov S.M., Rol' lesov v adaptatsii prirodnykh sistem k izmeneniyam klimata (A role of forests in natural systems' adaptation to climate change), *Lesovedenie*, 2021, No. 5, pp. 531–546.
- Lloyd J., Taylor J.A., On the temperature dependence of soil respiration, *Functional Ecology*, 1994, Vol. 8, pp. 315–323.
- OneSoil. 2022, available at: <https://onesoil.ai/ru> (February 21, 2022)
- Perez-Quezada J.F., Bown H.E., Fuentes J.P., Alfaro F.A., Franck N., Effects of afforestation on soil respiration in an arid shrubland in Chile, *J. Arid Environments*, 2012, Vol. 83, pp. 45–53.
- Ptichnikov A.V., Shvarts E.A., Kuznetsova D.A., The greenhouse gas absorption potential of Russian forests and possibilities for carbon footprint reduction for exported domestic products, *Doklady Earth Sciences*, 2021, Vol. 499, No. 2, pp. 683–685.
- Raich J.W., Potter C.S., Global patterns of carbon dioxide emission from soils, *Global Biogeochemical Cycles*, 1995, Vol. 9, No. 1, pp. 23–36.
- Rozenberg G.S., Saksonov S.V., Senator S.A., Zapozdalyi opyt ekologicheskikh ekspertiz global'nykh planov preobrazovaniya prirody v Rossii (Belated experience of environmental impact of the global plans for the transformation of nature in Russia), *Voprosy stepovedeniya*, 2018, No. 14, pp. 15–35.
- Sarzhanov D.A., Vasenev V.I., Sotnikova Y.L., Tembo A., Vasenev I.I., Valentini R., Short-term dynamics and spatial heterogeneity of CO<sub>2</sub> emission from the soils of natural and urban ecosystems in the central chernozem region, *Eurasian Soil Science*, 2015, Vol. 48, No. 4, pp. 416–424.
- Semenov V.M., Zinyakova N.B., Lebedeva T.N., Tulina A.S., Kogut B.M., Masyutenko N.P., Malyukova L.S., Biologically active organic matter in soils of European Russia, *Eurasian Soil Science*, 2018, Vol. 51, No. 4, pp. 434–447.
- Smirnova M.A., Gennadiev A.N., Kovach R.G., Chendev Y.G., Influence of forest shelterbelts on local pedodiversity (Belgorod oblast), *Eurasian Soil Science*, 2020, Vol. 53, No. 9, pp. 1195–1205.
- Sun L., Ataka M., Kominami Y., Yoshimura K., Relationship between fine-root exudation and respiration of two *Quercus* species in a Japanese temperate forest, *Tree Physiology*, 2017, Vol. 37, pp. 1011–1020.
- Turusov V.I., Cheverdin Y.I., Bespalov V.A., Titova T.V., Izmeneniya fizicheskikh svoystv chernozemov segregatsionnykh v agrolesolandshaftakh Tsentral'nogo Chernozem'ya (Changes in the physical properties of segregational chernozems in agroforest landscapes of the Central Chernozem region), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Lesnoi zhurnal*, 2020, No. 4(376), pp. 95–112.
- Vaganov E.A., Porfir'ev B.N., Shirov A.A., Kolpakov A.Y., Pyzhev A.I., Otsenka vklada rossiiskikh lesov v snizhenie riskov klimaticheskikh izmenenii (Assessment of the contribution of Russian forests to climate change mitigation), *Ekonomika regiona*, 2021, Vol. 17, No. 4, pp. 1096–1109.
- Wang J., Feng L., Palmer P.I., Liu Y., Fang S., Bösch H., O'Dell C.W., Tang X., Yang D., Liu L., Xia C., Large Chinese land carbon sink estimated from atmospheric carbon dioxide data, *Nature*, 2020, Vol. 586, pp. 720–723.
- Wang W., Zeng W., Chen W., Zeng H., Fang J., Soil respiration and organic carbon dynamics with grassland conversions to woodlands in temperate China, *PLOS ONE*, 2013, Vol. 8, No. 8, Art. No e71986.
- Xiao H.B., Shi Z.H., Li Z.W., Chen J., Huang B., Yue Z.J., Zhan Y.M., The regulatory effects of biotic and abiotic factors on soil respiration under different land-use types, *Ecological Indicators*, 2021, Vol. 127, Art. No 107787.
- Zhang Y., Guo S., Liu Q., Jiang J., Wang R., Li N., Responses of soil respiration to land use conversions in degraded ecosystem of the semi-arid Loess Plateau, *Ecological Engineering*, 2015, Vol. 74, pp. 196–205.