

Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации

Д.К. Нургалиев, С.Ю. Селивановская*, М.В. Кожевникова, П.Ю. Галицкая

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

В статье рассматривается схема возможного сценария энергетического перехода в Российской Федерации с учетом сложившегося экономического уклада, наличия гигантской нефтегазовой инфраструктуры и уникальных природных ресурсов. Все это позволяет рассматривать глобальные тенденции декарбонизации энергетики и экономики не только как вызов, но и как новые возможности для страны. С учетом развитой инфраструктуры нефтегазодобычи, транспортировки, нефтепереработки и нефтехимии, а также наличия огромной территории, лесных, водных, почвенных ресурсов перед нашей страной открываются уникальные возможности секвестрации углерода с использованием как биологических систем, так и имеющейся нефтегазовой инфраструктуры. Предлагается использовать существующие нефтегазодобывающие мощности для генерации водорода в процессах каталитической трансформации углеводородов внутри пласта. Предлагается создать и использовать для захоронения CO₂ масштабные технологии с использованием существующей инфраструктуры нефтедобывающей отрасли. Учитывая огромный потенциал Российской Федерации в секвестрации углерода биологическими системами, создается сеть российских карбоновых полигонов, в том числе и при Казанском федеральном университете (КФУ) – полигон «Карбон-Поволжье». Создание карбоновых ферм на основе разработок, созданных в таких полигонах, может стать востребованным высокотехнологичным бизнесом. Приводится подробное описание карбонового полигона КФУ «Карбон-Поволжье» и запланированных задач.

Ключевые слова: энергетический переход, декарбонизация, генерация водорода, захоронение CO₂, секвестрация углерода биологическими системами, карбоновый полигон

Для цитирования: Нургалиев Д.К., Селивановская С.Ю., Кожевникова М.В., Галицкая П.Ю. (2021). Некоторые вызовы и возможности для России и регионов в плане глобального тренда декарбонизации. *Георесурсы*, 23(3), с. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.2>

Введение

Полный отказ от ископаемого топлива, в том числе и от углеводородов (УВ) как источника энергии, в ближайшие десятилетия маловероятен, но нет сомнений, что тренд на декарбонизацию продолжится, а экономические уклады стран будут изменяться. Сегодня научный мир признает, что сжигание углеродного топлива является главной причиной накопления парниковых газов в атмосфере, и это приводит к повышению средней температуры на планете. Последствия этого процесса уже обнаруживаются в сильной изменчивости погодных условий, более частом наблюдении катастрофических событий и заметном потеплении в арктической зоне. Все это связано с нарушением естественных причинно-следственных связей в системе «атмосфера-океан-климат». Последующее таяние метаносодержащей «вечной» мерзлоты и повышение уровня океана может привести к чрезвычайно негативным последствиям, и, вероятно, эти изменения уже нельзя остановить. К концу века средняя температура может подняться более чем на 2,7°C, хотя планируется (по Парижскому соглашению) удержать ее рост на уровне 1,7°C или хотя бы не более 2,0°C. В качестве одной из серьезных мер планируется ввести трансграничный углеродный налог в ЕС, а полученные средства направить на развитие зеленой

энергетики и компенсацию последствий «глобального потепления». Это, по сути, уникальное событие в истории цивилизации, когда глобальное стратегическое мышление, направленное на самосохранение человечества материализуется, и переводится в экономическую плоскость не только в рамках отдельного государства, но и на межгосударственном уровне. Это первый шаг в указанном направлении, но экономический инструмент инициирует ЕС, а не глобальный орган, и насколько это будет эффективно для решения задач, поставленных в Парижском соглашении, пока не понятно, время покажет. Тем не менее, раз мы уже выделяем парниковые газы в масштабах, способных изменить всю нашу планету, а не только инициировать какие-то региональные экологические проблемы, человечеству придется начать регулировать элементы этой сложнейшей системы. К сожалению, большинство государств и политических деятелей сегодня не до конца реально оценивают значение сложившейся ситуации. Наверно, легче было бы объединиться в понимании и принятии мер против астероидной опасности. Изменение климата, вызванное, по сути, сжиганием ископаемого топлива, в отличие от астероидной опасности, – это особенная проблема, которая затрагивает очень многие стороны жизни общества – обеспечение энергией, электричеством, а также доходы многих государств, добывающих это ископаемое топливо, и расходы многих государств, не имеющих этих природных ресурсов, проблемы государств, которые никакого отношения не имеют к ископаемому топливу – они их не

* Ответственный автор: Светлана Юрьевна Селивановская
e-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

© 2021 Коллектив авторов

производят и не пользуются ими. Интересы различных государств, международных корпораций переплетены сложным образом в этой проблеме. В преамбуле Парижского соглашения отмечается, что «Стороны могут страдать не только от изменения климата, но также от воздействия мер, принимаемых в целях реагирования на него».

Необходимо обсуждать проблему, решать ее с учетом нюансов и проблем всех участников процесса. Речь идет о новой парадигме в глобальном мышлении, когда одним из важнейших факторов при принятии решений о дальнейшем развитии государств является осознание глобальных угроз типа глобального потепления.

Очень простой пример из области экономики. Если раньше в оптимизационных расчетах стоимости продукта, целевая функция имела размерность стоимости, куда были включены разнообразные прямые и косвенные расходы, включая и экологические, то сегодня – это еще и углеродный след, выраженный в тоннах CO₂ (а сегодня уже в евро), выделенного на всех стадиях производства продукта. Причем ущерб может проявиться совершенно в другом месте, совсем не там где продукт был произведен. Этот новый фактор меняет всю экономику, а значит политику и все стороны деятельности человека на этой планете: здоровье, образование, безопасность, производство продуктов питания, одежды, жилья, минимальной окружающей инфраструктуры и др.

Мы живем в эпоху, когда в истории планеты начинается новый период – влияние одного из биологических видов начинает нарушать сложную нелинейную систему Геи (Kleidon, 2004), и чтобы произвести корректирующие действия, человечество будет вынуждено взять на себя управление процессами в океанах, недрах, лесах, тундрах и других природных объектах – всех компонентах этой системы. Геологи, стратиграфы называют этот период Антропоценом (Carnegiani et al., 2020), хотя он больше похож на некоторые выдающиеся границы между геологическими системами, охарактеризованные уникальными глобальными событиями – массовыми вымираниями биологических видов, обусловленными самыми различными причинами. Массовое вымирание в биосфере сегодня – одно из самых значительных в истории Земли, и оно протекает чрезвычайно быстро в геологическом масштабе времени. Как же быть России в этой ситуации, что делать?

Российский энергетический переход: баланс природных ресурсов и глобальных трендов

На первый взгляд, та уверенность и решительность, с которой ЕС и многие другие страны говорят о переходе к «зеленой» энергетике, не сулит ничего хорошего России, которая сегодня обеспечивает почти 40% своего бюджета из поступлений от нефтяной промышленности. Многие российские товары, производимые на экспорт и имеющие большой «углеродный след» (сталь, алюминий, газ, нефть и нефтепродукты, сельхозпродукция и др.), будут отягощены трансграничным углеродным налогом (Carbon border adjustment mechanism – CBAM), и это не будет способствовать их конкурентоспособности на рынке. Тем не менее, можно утверждать, что данный вызов для российской экономики является одновременно и огромной возможностью.

«Зеленый» энергетический переход должен происходить в России с учетом рационального использования имеющихся природных ресурсов – углеводородных, биологических и территориальных, а также созданной нефтегазовой инфраструктуры – конкретных скважин, исследованных резервуаров, залежей УВ, всей наземной инфраструктуры, включая трубопроводы, а также нефтеперерабатывающие и нефтехимические мощности. Стратегической задачей на ближайшие 30–40 лет является обеспечение страны конкурентными на мировом рынке запасами УВ, которые необходимо добыть экологично, экономично, с низким углеродным следом.

Следующий шаг России к «зеленой» экономике – это переход к производству водорода, нового энергетического агента. Для этого необходимо создать промышленные технологии генерации водорода непосредственно в нефтегазовой залежи и захоронения образующегося CO₂ в природных резервуарах. В этом направлении ведутся работы в нескольких лабораториях в мире. В Казанском федеральном университете (КФУ) имеется успешный опыт использования катализаторов для повышения эффективности тепловых методов для добычи сверхвязкой нефти (Vakhin et al., 2020; Varfolomeev et al., 2021), также получены первые обнадеживающие лабораторные результаты непосредственно по генерации водорода внутри пласта по технологии внутрипластового горения. Российские и зарубежные (Кувейт, Оман, Китай) нефтегазовые компании проявляют огромный интерес к этим технологиям.

Еще один шаг навстречу «зеленой» энергетике – это создание и внедрение промышленных технологий секвестрации углерода, использующих имеющиеся природные ресурсы и нефтегазовую инфраструктуру. Наличие огромной территории, лесных, водных, почвенных ресурсов открывает перед нашей страной уникальные возможности секвестрации углерода с использованием биологических систем. Кроме того, используя существующие и уже разработанные месторождения УВ, используя опыт мониторинга газовых хранилищ, необходимо реализовать секвестрацию парниковых газов, формирующихся при генерации водорода, а также в других процессах, в природных резервуарах.

Внедрение этих предложений позволит Российской Федерации не только выйти на уровень углеродной нейтральности, но и продавать значительные объемы углеродных квот и органично влиться в мировую «зеленую» экономику. Все эти предложения и предполагаемые результаты коррелируют с Национальными целями и Стратегией научно-технологического развития страны как в части обеспечения страны экологичной энергией, так и создания новых «зеленых» бизнесов и высокотехнологичных рабочих мест в области секвестрации углерода экосистемами.

Для регионов, в частности Республики Татарстан, реализация такой программы приведет к реструктуризации нефтегазодобывающей, энергетической и аграрной отраслей региона, привлечению инвестиций для этих целей, обеспечению лидерства в области генерации, хранения и транспортировки водорода. Т.е. республика может прийти к углеродной нейтральности, в том числе за счет масштабного внедрения технологий секвестрации углерода экосистемами и с использованием нефтегазодобывающей инфраструктуры.

Возможности биологической секвестрации двуокиси углерода и создание Карбоновых полигонов. Возможности и задачи полигона «Карбон-Поволжье»

Ближайшей задачей в реализации предлагаемого плана на пути к «зеленой» экономике является создание Карбоновых полигонов, на которые возложены функции оценки потоков парниковых газов, и разработки эффективных технологий секвестрации диоксида углерода самыми различными природными биологическими системами.

Российская Федерация является пятой страной в мире по выбросам парниковых газов, однако, развитая система их мониторинга отсутствует (Climate Analysis Indicators Tool—CAIT 2.0). При этом в странах Европейского союза уже создана интегрированная система станций наблюдений за углеродом «Integrated Carbon Observation System – ICOS». Сеть станций ICOS включает ряд измерительных станций, расположенных на территории Бельгии, Чехии, Дании, Финляндии, Франции, Германии, Италии, Нидерландов, Норвегии, Испании, Швеции, Швейцарии, Великобритании. Станции осуществляют мониторинг потоков парниковых газов либо в атмосфере (38 станций), либо над океаном (23 станции), либо в целостных экосистемах (86 станций). Наблюдения координируются головным офисом, за сбор и распространение данных ICOS и производных от них информационных продуктов отвечает Carbon Portal. Для того, чтобы определить потенциал природных систем России секвестрировать углерод, необходимо организовать всеобъемлющую систему мониторинга парниковых газов, создать систему оценки баланса углерода природных систем различных климато-географических зон. С этой целью приказом Министерства науки и высшего образования Российской Федерации №74 от 5 февраля 2021 года «О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса» создается система «Карбоновых полигонов». Создание такой системы является реализацией первого этапа национального плана мероприятий по адаптации к изменению климата на период до 2022 года.

Одним из участников программы является Казанский федеральный университет (КФУ), который создает Карбоновый полигон «Карбон-Поволжье». В дальнейшем будет создана и карбоновая ферма.

Карбоновый полигон создается как часть консорциума для создания моделей изменения климата и методик учета эмиссии и поглощения климатически активных газов, определения объемов депонирования углерода наземными экосистемами. Важной частью работы станет разработка технологий долговременного депонирования углерода.

Карбоновый полигон подразделяется на два участка – лесной участок и водный. Лесной участок полигона размещается на территории Обсерватории (Зеленодольский район РТ), являющейся собственностью КФУ.

Основной тип ландшафта данного участка – липняк волосистоосоковый с елью и дубом на дерново-подзолистых почвах, расположенные на аллювиально-деллювиальных четвертичных отложениях третьей террасы крупных рек. Видовой состав сообщества представлен липой сердцевидной (бонитет II; возраст максимальный – 106 лет, средний – 60; диаметр – 35 см, средняя высота – 24 м), елью финской (бонитет I; возраст максимальный – 109 лет, средний – 80 лет; диаметр ствола – 66 см, средняя высота

– 28 м), дубом черешчатым (бонитет II; возраст максимальный – 101 год, средний – 0 лет; диаметр – 72 см, средняя высота – 24 м). Высота кустарникового яруса составляет 2 м. Кустарниковый ярус разреженный, травянистый, напочвенный покров сплошной, высотой до 70 см, многоярусный. В подлеске присутствует бересклет бородавчатый, жимолость обыкновенная, клен платановидный, лещина.

Почвы данного участка относятся к дерново-подзолистым на аллювиально-деллювиальных отложениях с горизонтами A0 (0–3 см), A1 (3–7 см), A1A2 (7–15 см), A2 (15–37 см), B (37–70 см), CD (70–100 см). Почвы являются слабокислыми (рН водн – 6,3, рН сол – 5,6), достаточно хорошо гумусированными (гумус – 3,0 %, N – 0,18 %, C/N – 9,66).

По количеству осадков район, в котором расположен лесной участок Карбонового полигона, относится к зоне умеренного увлажнения, их годовое количество составляет 552,5 мм. Наибольшее количество осадков приходится на июль (66,3 мм), а наименьшее – на март (23 мм). Число дней со снежным покровом составляет 156 дней. Устойчивый снежный покров формируется в начале ноября, исчезает в середине апреля. Высота снежного покрова достигает наибольших значений в марте – в среднем 56 см.

Промерзание почвы зимой составляет максимально 69 см. Суммарная солнечная радиация в данной районе составляет около 3900 МДж/м² за год, радиационный баланс – 1311 МДж/м², причем с ноября по февраль он отрицательный. Наиболее солнечным является период с апреля по август.

Что касается водного участка полигона, в настоящее время идет обсуждение о его наилучшем расположении.

Полигон «Карбон-Поволжье» призван решать следующие задачи: а) создание системы сбора, валидации и обработки данных, позволяющей интегрировать их в общую модель источников и стоков на территории региона и РФ; б) организация регулярных метеорологических наблюдений; в) организация регулярного дистанционного мониторинга (включая спутниковые данные) климатически активных газов; г) организация регулярных мониторинговых наблюдений за потоками основных парниковых газов и параметрами фотосинтеза и дыхания растительных сообществ и почвы.

Карбоновый полигон станет центром сбора, валидации и обработки данных и позволит интегрировать их в общую модель источников и стоков парниковых газов на территории региона и РФ. Такая система будет основой для построения количественных оценок эмиссии и депонирования парниковых газов (CO₂, CH₄, N₂O) в природных и трансформированных ландшафтах Республики Татарстан.

Другими направлениями деятельности Карбонового полигона является оценка секвестрационного потенциала естественных фитоценозов и отдельных групп растений с выявлением наиболее продуктивных сообществ и отдельных видов растений, а также адаптация растений с высоким секвестрационным потенциалом, не свойственных местной флоре, к климатическим условиям региона и разработка технологии их использования в сельском и лесном хозяйстве.

Важным результатом деятельности Карбонового полигона должно стать создание сертификационного центра специалистов по валидации и верификации учетов

парниковых газов и компенсаторных мероприятий.

Несомненна образовательная и просветительская функция полигона, заключающаяся в адаптации существующих и разработке новых бакалаврских, магистерских и аспирантских программ, организации семинаров и конференций, проводимых на базе Карбонового полигона.

Исследования и разработки Карбонового полигона базируются на накопленном российском и международным опытом. Так, на территории России в 1978 году были начаты наблюдения на Центральной полевой экспериментальной базе ФГБУ «ГГО» в Воейково (Алферов и др., 2017). Позднее были созданы станции на о. Беринга, о. Котельный, Териберга, Новый порт и Тикси. В настоящее время станции Новый Порт и Воейково, расположенные вблизи крупномасштабных источников загрязнения, используются для исследования изменчивости выбросов парниковых газов (Зинченко и др., 2001; Zinchenko et al., 2002; Макарова и др., 2006; Зинченко и др., 2008; Решетников и др., 2009). С начала 2010-х годов были начаты интенсивные исследования потоков парниковых газов методом микродинамических пульсаций и закрытых камер на Валдае и в Ленинградской области (Karelin et al., 2020; Сафонов и др., 2012; Юзбеков и др., 2014; Алферов и др., 2017). В настоящее время большое внимание уделяется оценке эмиссии парниковых газов в Арктических зонах. Так, в работе Теi с соавторами приводятся результаты сезонного измерения выделения парниковых газов в условиях вечной мерзлоты (Теi et al., 2021). В данном исследовании изучаются обменные потоки углекислого газа (CO_2) в пограничных экосистемах тайги и тундры на северо-востоке Сибири с 2013 по 2015 год. В вегетационный период (май – сентябрь) наблюдалось поглощение CO_2 в объемах $-39,4$ (от $-60,1$ до $-20,2$) гС/м^2 . Показано, что микроклиматические факторы, определяющие обменные потоки CO_2 , меняются сезонно. На них существенно влияет время начала поглощения углерода связанное, прежде всего, с температурой почвы весной и в начале лета, после чего определяющим фактором становится плотность потока фотосинтетических фотонов. В работе Holl с соавторами представлены многолетние временные ряды потоков углекислого газа в Сибирской Арктике, измеренные методом вихревой ковариации (Holl et al., 2019). Этот же метод применен для оценки объемов чистой первичной продукции и потоков энергии в болотах Западной Сибири (Aleksyichik et al., 2017). На основе измерений в мае–августе 2015 года представлены первые оценки баланса углекислого газа в типичном болоте средней тайги. Территории, на которых были проведены измерения потоков углекислого газа, представляли собой чередование поросших деревьями возвышенностей и понижений, занятых осоками и кустарниками. В течение всех четырех месяцев измерений поглощение CO_2 было сравнительно высоким и составило 202 гС/м^2 . Во время нескольких переходных периодов в июне и июле, напротив, наблюдалась эмиссия CO_2 .

Тематике экосистемного обмена углекислого газа и воды в различных типах экосистем посвящены работы Института биологии КомиНЦ УрО РАН. Для еловых лесов европейского Северо-востока России продемонстрирован хорошо выраженный с марта по октябрь суточный ход газообмена CO_2 с максимумом в полдень.

В зимние месяцы значения нетто-обмена CO_2 были положительными. Суммарное суточное значение нетто-обмена углекислого газа за сутки составило в апреле 4 , мае -62 , июне -79 , августе и сентябре -31% июльского значения. Суммарное нетто-поглощение CO_2 ельником в апреле–августе соответствовало -327 гС/м^2 . Для сосновых лесов того же региона выявлена корреляция между среднесуточными значениями gross-фотосинтеза и суммарного испарения. Общий нетто-обмен CO_2 , gross-фотосинтез и экосистемное дыхание в сосновом лесу были оценены в -103 , -407 и $304 \text{ гС/м}^2\text{год}$, соответственно (Загирова и др., 2020).

Как уже было указано выше, значительный вклад в круговорот углерода вносит дыхание экосистем, складывающееся из растительной и почвенной компонент (Houghton et al., 1992). Почва является одним из важнейших естественных резервуаров углерода, при этом обмен углерода между почвой и атмосферой происходит очень активно. Так, эмиссия данного газа из почвы является вторым по значимости компонентом глобального круговорота углерода и, соответственно, климатических изменений (Reth et al., 2005; Lal et al., 2018; Bernoux et al., 2005). Не случайно одной из глобальных инициатив, направленных на снижение содержания углекислого газа в атмосфере, является инициатива «4 промилли», предполагающая ежегодное увеличение секвестрируемого органического углерода в почве на 4% в слое $30\text{--}40 \text{ см}$, за счет смены сельскохозяйственных практик (Chabbi et al., 2017; Corbeels et al., 2019; de Vries, 2018; Lal, 2016; VandenBygaart, 2018).

Баланс углерода в системе «почва-припочвенный слой атмосферы» формируется процессами его эмиссии (в результате минерализации почвенного и привнесенного растениями и удобрениями органического вещества) и его накопления (в результате накопления растительного опада и другой отмершей органики, корневых выделений, а также внесения органического углерода с удобрениями).

Минерализация органического вещества осуществляется почвенными микроорганизмами и зависит как от количества и состава первого, так и от активности последних. Традиционно, содержание органического углерода в почве оценивается при агрохимических обследованиях и вместе с показателем содержания углерода в микробной биомассе свидетельствует о степени плодородия почвы. Органический углерод составляет порядка $55\text{--}60\%$ от массы органического вещества почвы (Canedoli et al., 2020). Показано, что содержание органического углерода в почве значимо зависит от ее типа, для сельскохозяйственных почв умеренного климата оно может колебаться в пределах $5\text{--}30 \text{ г кг}^{-1}$ плодородного слоя, $0,5\text{--}4,5\%$ из которых находятся в составе микробной биомассы. В целом, запасы органического углерода в данных климатических условиях составляют $15\text{--}80 \text{ т га}^{-1}$ в слое $0\text{--}20 \text{ см}$ и $5\text{--}20 \text{ т}^{-1}$ в слое $20\text{--}40 \text{ см}$ (Xie et al., 2021; Shukla et al., 2005). Еще одним фактором, влияющим на скорость минерализации органического углерода почвы, являются климатические условия, в которых она расположена (Alvarez et al., 2001; La Scala et al., 2006). В целом, запасы углерода в почве больше подвержены различным видам влияний в теплых и влажных условиях, чем в прохладных (но не морозных) и засушливых (Ogle et al., 2019).

Тип землепользования и способ обработки почвы в сельском хозяйстве влияет на интенсивность минерализации органического углерода в ней (Reicosky, 2001). Интенсификация разложения почвенного органического вещества при обработке почвы происходит из-за разрушения почвенных макроагрегатов и высвобождения «запакованного» в него углерода, доступного для микроорганизмов. Кроме того, вспашка способствует лучшему снабжению почвы кислородом, что также приводит к интенсификации процессов минерализации (Cambardella et al., 1992). Показано, что количество углерода почвы, теряемого в виде углекислого газа, коррелирует с интенсивностью разрушения агрегатов и объемами перемещенной почвы (Reicosky et al., 2007; La Scala et al., 2006). Так, например, количество выделяемого углекислого газа из почвы под посевами кукурузы составило 0.82, 0.56, 0.51 и 0.49 г м⁻²ч⁻¹ при следующих вариантах обработки: стандартная отвальная, усеченная обработка (reduced till), минимальная обработка и безотвальная обработка (McNunn et al., 2020). Замена отвального типа обработки почвы на неотвальный в течение 20 лет приводит к ежегодному приросту запасов органического углерода в почве на 0,06–0,35, 0,21–0,50 и 0,34–0,54 т га⁻¹ в условиях холодного, теплого и тропического климата соответственно. Интересно, что такая тенденция характерна лишь для верхнего плодородного слоя почвы (порядка 20–25 см) (Ogle et al., 2019). В нижележащих слоях почвы, напротив, безотвальная обработка приводит к снижению содержания органического углерода (Angers et al., 1997).

В последнее время исследователи все чаще говорят о значительном потенциале нижележащих слоев почвы для секвестрации углерода, и для обмена углерода между почвой и атмосферой в целом (VandenBygaart et al., 2011). Для получения полноценных выводов о роли нижележащих слоев почвы в накоплении углерода, а также о влиянии различных практик на его оборот в почве и между почвой и атмосферой на данный момент не хватает информации. Так, самый длинный ряд наблюдений за содержанием органического углерода в почве при отказе от отвальной обработки, составляет 45 лет, большая же часть рядов наблюдений не превышает 20 лет. Набор измеряемых параметров в этих наблюдениях различен. Вместе с тем, стабилизация сорбции выработанных микроорганизмами органических соединений после их миграции в нижележащие почвенные слои, возможно, требует более длительных сроков исследования (Cotrufo et al., 2013; Lehmann et al., 2015). Установлено, что обработка оказывает большее влияние на содержание углерода в почве на глубине до 60 см в глинистых, илистых и пылеватых почвах в тропических и субтропических климатических условиях по сравнению с песчаными почвами в тех же климатических условиях. Вместе с тем, в умеренных широтах эта тенденция обратна: именно песчаные почвы наиболее подвержены влиянию отвальной вспашки с точки зрения содержания в них углерода, в т.ч. на глубинах, превышающих глубину проникновения плуга (Ogle et al., 2019). В ряде случаев определяют не только количество углекислого газа, но и других парниковых газов, выражая суммарную эмиссию в массе т.н. CO₂-эквивалента. Но и в этом случае описанная тенденция увеличения объемов при увеличении степени воздействия на почву

прослеживается. Так, эмиссия из почвы под паром составила 520, 400 и –230 кг экв-CO₂ га⁻¹ год⁻¹, а из почвы под клевером – 100, –50, –1900 кг экв-CO₂ га⁻¹ год⁻¹ для стандартной, усеченной и безотвальной обработки соответственно (отрицательное значение соответствует поглощению, а не выделению углекислого газа) (McNunn et al., 2020).

Интересным эффектом на скорость минерализации органического вещества почвы обладает внесение удобрений. Минеральные удобрения повышают микробную активность в целом за счет привнесения лимитирующих макро- и микроэлементов и, таким образом, интенсифицируют процессы микробного разложения органического углерода в почве. С другой стороны, минеральные удобрения приводят к росту и развитию растений, интенсификации корневой эксудации, накопления растительного опада, т.е. к секвестрации углерода в почве. Смещение баланса между двумя этими процессами в сторону накопления углерода в почве является предметом большого числа научных исследований. Органические удобрения, такие как компосты из пометов и навозов, осадков сточных вод и других видов органических отходов, содержат значительное количество органического углерода и кратковременно увеличивают его запасы в почве после внесения. Однако в большинстве случаев углерод в таких удобрениях содержится в легкодоступном для микроорганизмов виде, поэтому быстро минерализуется и не накапливается в почве в долгосрочной перспективе. Более того, при внесении легкодоступных органических веществ в почву наблюдается т.н. прайминг-эффект, заключающийся в интенсификации минерализующей активности почвенной микрофлоры не только по отношению к внесенному, но и по отношению к имевшемуся в почве ранее органическому веществу. В результате, внесение органических удобрений не только не способствует увеличению запасов углерода в почве, но и наоборот – приводит к их снижению. Альтернативой указанным быстрорастворимым органическим удобрениям может стать биочар – продукт бескислородного термического разложения биомассы. Он не только способствует интенсификации роста растений, но и, являясь медленноразлагаемым удобрением, позволяет длительно сохранить углерод в почве.

Таким образом, для снижения объемов эмиссии углекислого газа в сельском хозяйстве может быть использовано снижение интенсивности обработки почвы, исключение выпаса, посев почвопокровных растений, грамотное управление севооборотом и совершенствование практик внесения удобрений (Eze et al., 2018; Olson et al., 2010; Parkin et al., 2016; Snyder, 2017). В целом, согласно оценкам, мероприятия по снижению объемов потерь почвенного органического углерода могут быть реализованы на сельскохозяйственных площадях до 57 млн га. Внедрение таких мероприятий может привести к значительно большему объему секвестрации углерода, нежели 4‰, заявленные в соответствующей инициативе. Так, ежегодная секвестрация углерода в слое 0–30 см в объеме 2–3 т га⁻¹ была достигнута за счет смены типа использования почвы, характеризовавшейся исходными запасами углерода в 19 т га⁻¹. Это составило не 4‰, а 70–189 ‰ в год (Noulèkoun et al., 2021).

Если почва не включена в сельскохозяйственный оборот, основными факторами, влияющими на накопление

органического углерода и выделение углекислого газа, становятся эрозия и аккумуляция, а также характер растительного покрова. На эродированных участках, где на поверхность выходит значительное количество минеральных частиц, наблюдается тенденция к накоплению органического углерода из-за его сорбции на этих частицах. На аккумулятивных участках также наблюдается накопление органического углерода в почве вследствие захоронения намытого плодородного слоя под минеральным, и связанного с этим снижения скорости минерализации захороненного органического вещества. В целом, исследователи оценивают объемы глобального накопления углерода в почве в результате антропогенно-обусловленных эрозионных процессов в 78 млрд т для наземных экосистем (Shukla et al., 2005; Wang et al., 2017).

Растения в течение суток могут как поглощать, так и выделять углекислый газ. В периоды активного развития и наращивания биомассы этот баланс сдвинут в сторону поглощения и секвестрирования CO_2 в биомассе. До 89% углерода, секвестрируемого растениями, затем переходит в состав почвы (Eze et al., 2018). Привнесение углерода происходит за счет углеродосодержащих корневых выделений, являющихся труднобиоразлагаемыми, а также за счет накопления отмерших частей растений в почве (Noulékoun et al., 2021; Rasse et al., 2005). Древесная растительность является лучшим секвестратором углекислого газа по сравнению с травянистой (Chen et al., 2018; Chan et al., 2008; Poulton et al., 2018). Тем не менее, глобальная роль территорий, покрытых травянистыми растениями, в секвестрации углерода чрезвычайно велика – они составляют порядка 40% поверхности суши, в них содержится 34% глобальных запасов почвенного углерода (Eze et al., 2018). Объемы накапливаемого в почве углерода могут различаться и между различными травянистыми культурами (McNunn et al., 2020).

В России в результате мониторинга агрохимических свойств почв накоплена информация о содержании органического вещества в верхнем слое почвы. Значительно меньше данных имеется об интенсивности почвенного дыхания, являющегося показателем интенсивности минерализации органического вещества, и почвенной микробной биомассе в верхнем слое почвы. Практически отсутствует информация о потоках углерода в почве и припочвенном слое атмосферы, так же как и о балансе углерода в отдельных экосистемах и регионах, рассчитанного с использованием данных дистанционных замеров с применением моделей.

Именно поэтому создание Карбоновых полигонов, призванных объединить усилия по мониторингу парниковых газов, по построению моделей их распространения, созданию технологий секвестрации углерода на основе фундаментальных закономерностей баланса углерода в различных экосистемах является актуальной и необходимой задачей в России.

Заключение

1. Глобальные тренды декарбонизации энергетики и экономики в целом, направленные на уменьшение последствий глобальных климатических изменений, являются для России не только вызовом, но также и открывают новые возможности.

2. Предлагается новый подход к российскому энергетическому переходу с учетом рационального использования имеющихся природных ресурсов – углеводородных, биологических и территориальных, а также созданной нефтегазовой инфраструктуры – конкретных скважин, исследованных резервуаров, залежей УВ, всей наземной инфраструктуры, включая трубопроводы, а также нефтеперерабатывающие и нефтехимические мощности.

3. Необходимо создавать и реализовывать промышленные технологии генерации водорода непосредственно в нефтегазовой залежи и захоронения образующегося CO_2 в природных резервуарах.

4. Необходимо создание и внедрение промышленных технологий секвестрации углерода, как с использованием биологических систем, так и путем закачки и хранения в природных резервуарах.

5. Ближайшей задачей в реализации предлагаемого плана на пути к «зеленой» экономике является создание Карбоновых полигонов, основной функцией которых будет оценка потоков парниковых газов и разработка эффективных технологий секвестрации диоксида углерода природными биологическими системами.

6. Карбоновый полигон Республики Татарстан «Карбон-Поволжье», оператором которого является Казанский федеральный университет, станет центром сбора, валидации и обработки данных, которые в дальнейшем будут интегрированы в общую модель эмиссии и стоков парниковых газов на территории региона и РФ. Такая система станет основой для построения количественных оценок эмиссии и депонирования парниковых газов (CO_2 , CH_4 , N_2O) в природных и трансформированных ландшафтах.

7. Несмотря на наличие данных об агрохимических свойствах и содержании органического вещества в верхнем слое почв, в России практически отсутствует информация о потоках углерода в почве и припочвенном слое атмосферы, так же как и о балансе углерода в отдельных экосистемах. Получение таких данных необходимо для последующего создания природоподобных технологий секвестрации углерода.

Литература

- Алферов А., Блинов В., Гитарский М., Грабар В., Замолотчиков Д., Зинченко А. и др. (2017). Мониторинг потоков парниковых газов в природных экосистемах. Саратов, 279 с.
- Загирова С., Михайлов О., Елсаков В. (2020). Потоки диоксида углерода, тепла и влаги между еловым насаждением и атмосферой на европейском северо-востоке России. *Известия РАН. Серия Биологическая*, 3, с. 325–336.
- Зинченко А., Парамонова Н., Решетников А. (2001). Оценка эмиссии метана в районе Санкт-Петербурга на основе данных измерений его концентрации в приземном слое атмосферы. *Метеорология и гидрология*, 5, с. 35–39.
- Зинченко А., Парамонова Н., Решетников А., Титов В. (2008). Оценка источников метана на основе измерений его концентрации в районе добычи газа на севере Западной Сибири. *Метеорология и гидрология*, 1, с. 51–64.
- Макарова А., Поберовский А., Яговкина С., Кароль И., Лагун В., Парамонова Н. и др. (2006). Исследование процессов формирования поля метана в атмосфере Северо-Западного региона Российской Федерации. *Физика атмосферы и океана*, 42(2), с. 237–249.
- Решетников А.И., Зинченко А.В., Яговкина С.В., Кароль И.Л., Лагун В.А., Парамонова Н.Н. (2009). Исследование эмиссии метана на севере Западной Сибири. *Метеорология и Гидрология*, 3, с. 53–64.
- Сафонов С., Карелин Д., Грабар В., Латышев Б., Грабовский Б., Уварова Н. и др. (2012). Эмиссия углерода от разложения валежа в южнотаежном ельнике. *Лесоведение*, 5, с. 75–80.

- Юзбеков А., Замолодчиков Д., Иващенко А. (2014). Фотосинтез у ели европейской в лесных экосистемах экспериментального полигона 'Лог Таежный'. *Вестник Московского университета*, 4, с. 32–35.
- Alekseychik P., Mammarella I., Karpov D., Dengel S., Terentieva I., Sabrekov A., Lapshina E. (2017). Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with the eddy covariance technique in a western Siberian bog. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15), pp. 9333–9345. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9333-2017>
- Alvarez R., Alvarez C. R., Lorenzo G. (2001). Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *European Journal of Soil Biology*, 37(3), pp. 161–166. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)0085-8](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)0085-8)
- Angers D.A., Bolinder M.A., Carter M.R., Gregorich E.G., Drury C.F., Liang B.C., et al. (1997). Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, 41(3–4), pp. 191–201. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01100-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01100-2)
- Bernoux M., Cerri C. C., Volkoff B., Carvalho M. da C. S., Feller C., Cerri C. E. P., et al. (2005). Gases do efeito estufa e estoques de carbon nos solos: inventário do Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 22(1), pp. 235–246.
- Cambardella C.A., Elliott E.T. (1992). Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), pp. 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>
- Canedoli C., Ferrè C., Abu El Khair D., Comolli R., Liga C., Mazzucchelli F., et al. (2020). Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*, 44, 101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>
- Carpejani G., Assad A.S., Godoi L.R., Waters J., Andrade Guerra J.B.S.O. de (2020). The Anthropocene: Conceptual Analysis with Global Climate Change, Planetary Boundaries and Gaia 2.0. *Climate Change Management*, pp. 301–314. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57235-8_24
- Chabbi A., Lehmann J., Ciais P., Loeschner H.W., Cotrufo M.F., Don A., et al. (2017). Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change*, 7(5), pp. 307–309. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>
- Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5), p. 437. <https://doi.org/10.1071/SR08036>
- Chen Y., Liu J., Lv P., Gao J., Wang M., and Wang Y. (2018). IL-6 is involved in malignancy and doxorubicin sensitivity of renal carcinoma cells. *Cell Adhesion and Migration*, 12(1), pp. 28–36. <https://doi.org/10.1080/19336918.2017.1307482>
- Climate Analysis Indicators Tool-CAIT 2.0 | NDC Partnership <https://ndcpartnership.org/toolbox/climate-analysis-indicators-tool-cait-20>
- Corbeels M., Cardinael R., Naudin K., Guibert H., Torquebiau E. (2019). The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research*, 188, pp. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.015>
- Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Denef K., Paul E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), pp. 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>
- Eze S., Palmer S.M., and Chapman P.J. (2018). Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *Journal of Environmental Management*, 223, pp. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013>
- Holl D., Wille C., Sachs T., Schreiber P., Runkle B. R. K., Beckebanze L., et al. (2019). A long-term (2002 to 2017) record of closed-path and open-path eddy covariance CO₂ net ecosystem exchange fluxes from the Siberian Arctic. *Earth System Science Data*, 11(1), pp. 221–240. <https://doi.org/10.5194/essd-11-221-2019>
- Houghton J., Callander B., and Varney S. (1992). Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment.
- Karelín D.V., Zmolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Y., Kumanyaev A.S., de Gerenyu V.O.L., et al. (2020). The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest. *Eur J Forest Res*, 140, pp. 287–305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
- Kleidon A. (2004). Beyond Gaia: Thermodynamics of Life and Earth System Functioning. *Climatic Change*, 66, pp. 271–319. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000044616.34867.ec>
- Lal R. (2016). Beyond COP 21: Potential and challenges of the '4 per Thousand' initiative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(1), 20A–25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
- Lal R., Faussey N. R., and Eckert D. J. (2018). Land Use and Soil Management Effects on Emissions of Radiatively Active Gases from Two Soils in Ohio. *Soil Management and Greenhouse Effect*, pp. 41–60.
- Lehmann J. and Kleber M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- McNunn G., Karlen D.L., Salas W., Rice C.W., Mueller S., Muth D., et al. (2020). Climate smart agriculture opportunities for mitigating soil greenhouse gas emissions across the U.S. Corn-Belt. *Journal of Cleaner Production*, 268.
- Noulékoun F., Birhane E., Kassa H., Berhe A., Gebremichael Z. M., Adem N. M., et al. (2021). Grazing exclosures increase soil organic carbon stock at a rate greater than '4 per 1000' per year across agricultural landscapes in Northern Ethiopia. *Science of The Total Environment*, 782, 146821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146821>
- Ogle S. M., Alsaker C., Baldock J., Bernoux M., Breidt F.J., McConkey B., et al. (2019). Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions. *Scientific Reports*, 9, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Olson K.R., Ebelhar S.A., Lang J.M. (2010). Cover crop effects on crop yields and soil organic carbon content. *Soil Science*, 175(2), pp. 89–98. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181cf7959>
- Parkin T.B., Kaspar T.C., Jaynes D.B., and Moorman T.B. (2016). Rye Cover Crop Effects on Direct and Indirect Nitrous Oxide Emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 80(6), pp. 1551–1559. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.04.0120>
- Poulton P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powlson D. (2018). Major limitations to achieving '4 per 1000' increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology*, 24(6), pp. 2563–2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>
- Rasse D.P., Rumpel C., Dignac M.F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1–2), pp. 341–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
- Reicosky D.C. (2001). Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24–29.
- Reicosky D.C., Archer D.W. (2007). Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*, 94(1), pp. 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.004>
- Reth S., Reichstein M., Falge E. (2005). The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. *Plant and Soil*, 268, pp. 21–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0175-5>
- La Scala N., Bolonhezi D., Pereira G.T. (2006). Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 91(1–2), pp. 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>
- Shukla M.K., Lal R. (2005). Erosional effects on soil organic carbon stock in an on-farm study on Alfisols in west central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 81(2), pp. 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.006>
- Snyder C.S. (2017). Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the '4R' concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Research*, 55(5–6), pp. 463–472. <https://doi.org/10.1071/SR16335>
- Tei S., Morozumi T., Kotani A., Takano S., Sugimoto A., Miyazaki S., et al. (2021). Seasonal variations in carbon dioxide exchange fluxes at a taiga-tundra boundary ecosystem in Northeastern Siberia. *Polar Science*, 28, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100644>
- Vakhin A.V., Aliev F.A., Mukhamatdinov I.I., Sitnov S.A., Sharifullin A.V., Kudryashov S.I., et al. (2020). Catalytic aquathermolysis of boca de jaruco heavy oil with nickel-based oil-soluble catalyst. *Processes*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/pr8050532>
- VandenBygaart A.J. (2018). Comments on soil carbon 4 per mille by Minasny et al. 2017. *Geoderma*, 309, pp. 113–114.
- VandenBygaart A.J., Bremer E., McConkey B.G., Ellert B.H., Janzen H.H., Angers D.A., et al. (2011). Impact of Sampling Depth on Differences in Soil Carbon Stocks in Long-Term Agroecosystem Experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 75(1), pp. 226–234. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0099>
- Varfolomeev M.A., Yuan C., Bolotov A.V., Minkhanov I.F., Mehrabi-Kalajahi S., Saifullin E.R., et al. (2021). Effect of copper stearate as catalysts on the performance of in-situ combustion process for heavy oil recovery and upgrading. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207, 109125. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109125>
- de Vries W. (2018). Soil carbon 4 per mille: a good initiative but let's manage not only the soil but also the expectations: Comment on Minasny et al. (2017). *Geoderma*, 292, pp. 59–86. *Geoderma*, 309, pp. 111–112.
- Wang Z., Hoffmann T., Six J., Kaplan J.O., Govers G., Doetterl S., et al. (2017). Human-induced erosion has offset one-third of carbon emissions from land cover change. *Nature Climate Change*, 7, pp. 345–349. <https://doi.org/10.1038/nclimate3263>

Xie H., Tang Y., Yu M., Geoff Wang G. (2021). The effects of afforestation tree species mixing on soil organic carbon stock, nutrients accumulation, and understory vegetation diversity on reclaimed coastal lands in Eastern China. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01478. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01478>

Zinchenko A.V., Paramonova N.N., Privalov V.I., Reshetnikov A.I. (2002). Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(20), ACH 2-1-ACH 2-11. <https://doi.org/10.1029/2001JD001369>

Сведения об авторах

Данис Карлович Нурғалиев – доктор геол.-мин. наук, профессор, директор института геологии и нефтегазовых технологий, проректор по направлениям нефтегазовых технологий, природопользования и наук о Земле

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420111, Казань, ул. Чернышевского, д. 7

Светлана Юрьевна Селивановская – доктор биол. наук, профессор, директор института экологии и природопользования Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, д. 5

Мария Владимировна Кожевникова – канд. биол. наук, заместитель директора института экологии и природопользования по научной деятельности

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, д. 5

Полина Юрьевна Галицкая – доктор биол. наук, профессор кафедры прикладной экологии института экологии и природопользования

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420097, Казань, ул. Товарищеская, д. 5

Статья поступила в редакцию 02.08.2021;

Принята к публикации 09.08.2021; Опубликована 30.08.2021

IN ENGLISH

ORIGINAL ARTICLE

Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend

D.K. Nurgaliev, S.Yu. Selivanovskaya*, M.V. Kozhevnikova, P.Yu. Galitskaya

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

*Corresponding author: Svetlana Yu. Selivanovskaya, e-mail: svetlana.selivanovskaya@kpfu.ru

Abstract. This article discusses a possible scenario of energy transition in Russia, taking into account the economic structure, presence of huge oil and gas infrastructure and unique natural resources. All this allows to consider global trends of energy and economic decarbonization not only as a challenge, but also as a new opportunity for the country. Considering developed oil and gas production, transportation, refining and petrochemical infrastructure, as well as the vast territory, forest, water and soil resources, our country has unique opportunities for carbon sequestration using both biological systems and the existing oil and gas infrastructure. It is proposed to use the existing oil and gas production facilities for hydrogen generation in the processes of hydrocarbon catalytic transformation inside the reservoir. It is suggested to create and use large-scale technologies for CO₂ sequestration using existing oil and gas production infrastructure. Considering high potential of the Russian Federation for carbon sequestration by biological systems, a network of Russian carbon testing areas is being developed, including one at Kazan Federal University (KFU), – the “Carbon-Povolzhye” testing area. The creation of carbon farms based on the applications at such testing areas could become a high-demand high-tech business. A detailed description of the KFU carbon testing area and its planned objectives are given.

Keywords: energy transition, decarbonization, hydrogen generation, CO₂ disposal, carbon sequestration by biological systems, carbon testing area

Recommended citation: Nurgaliev D.K., Selivanovskaya S.Yu., Kozhevnikova M.V., Galitskaya P.Yu. (2021). Some challenges and opportunities for Russia and regions in terms of the global decarbonization trend. *Georesursy = Georesources*, 23(3), pp. 8–16. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.3.2>

References

Alekseychik P., Mammarella I., Karpov D., Dengel S., Terentjeva I., Sabrekov A., Lapshina E. (2017). Net ecosystem exchange and energy fluxes measured with the eddy covariance technique in a western Siberian bog. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(15), pp. 9333–9345. <https://doi.org/10.5194/acp-17-9333-2017>

Alferov A., Blinov V., Gitarskii M., Grabar V., Zamolodchikov D., Zinchenko A. et al. (2017). Monitoring of greenhouse gas flows in natural ecosystems. Saratov, 279 p. (In Russ.)

Alvarez R., Alvarez C. R., Lorenzo G. (2001). Carbon dioxide fluxes following tillage from a mollisol in the Argentine Rolling Pampa. *European Journal of Soil Biology*, 37(3), pp. 161–166. [https://doi.org/10.1016/S1164-5563\(01\)01085-8](https://doi.org/10.1016/S1164-5563(01)01085-8)

Angers D.A., Bolinder M.A., Carter M.R., Gregorich E.G., Drury C.F., Liang B.C., et al. (1997). Impact of tillage practices on organic carbon and nitrogen storage in cool, humid soils of eastern Canada. *Soil and Tillage Research*, 41(3–4), pp. 191–201. [https://doi.org/10.1016/S0167-1987\(96\)01100-2](https://doi.org/10.1016/S0167-1987(96)01100-2)

Bernoux M., Cerri C. C., Volkoff B., Carvalho M. da C. S., Feller C., Cerri C. E. P., et al. (2005). Gases do efeito estufa e estoques de carbon nos solos: inventario do Brasil. *Cadernos de Ciência & Tecnologia*, 22(1), pp. 235–246.

Cambardella C.A., Elliott E.T. (1992). Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. *Soil Science Society of America Journal*, 56(3), pp. 777–783. <https://doi.org/10.2136/sssaj1992.03615995005600030017x>

Canedoli C., Ferré C., Abu El Khair D., Comolli R., Liga C., Mazzucchelli F., et al. (2020). Evaluation of ecosystem services in a protected mountain area: Soil organic carbon stock and biodiversity in alpine forests and grasslands. *Ecosystem Services*, 44, 101135. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2020.101135>

Carpejani G., Assad A.S., Godoi L.R., Waters J., Andrade Guerra J.B.S.O. de (2020). The Anthropocene: Conceptual Analysis with Global Climate Change, Planetary Boundaries and Gaia 2.0. *Climate Change Management*, pp. 301–314. https://doi.org/10.1007/978-3-030-57235-8_24

Chabbi A., Lehmann J., Ciais P., Loescher H.W., Cotrufo M.F., Don A., et al. (2017). Aligning agriculture and climate policy. *Nature Climate Change*, 7(5), pp. 307–309. <https://doi.org/10.1038/nclimate3286>

Chan K.Y., Van Zwieten L., Meszaros I., Downie A., Joseph S. (2008). Using poultry litter biochars as soil amendments. *Soil Research*, 46(5), p. 437. <https://doi.org/10.1071/SR08036>

Chen Y., Liu J., Lv P., Gao J., Wang M., and Wang Y. (2018). IL-6 is involved in malignancy and doxorubicin sensitivity of renal carcinoma cells. *Cell Adhesion and Migration*, 12(1), pp. 28–36. <https://doi.org/10.1080/19336918.2017.1307482>

Climate Analysis Indicators Tool-CAIT 2.0 | NDC Partnership <https://ndcpartnership.org/toolbox/climate-analysis-indicators-tool-cait-20>

Corbeels M., Cardinael R., Naudin K., Guibert H., Torquebiau E. (2019). The 4 per 1000 goal and soil carbon storage under agroforestry and conservation agriculture systems in sub-Saharan Africa. *Soil and Tillage Research*, 188, pp. 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.015>

Cotrufo M.F., Wallenstein M.D., Boot C.M., Deneff K., Paul E. (2013). The Microbial Efficiency-Matrix Stabilization (MEMS) framework integrates plant litter decomposition with soil organic matter stabilization: do labile plant inputs form stable soil organic matter? *Global Change Biology*, 19(4), pp. 988–995. <https://doi.org/10.1111/gcb.12113>

- Eze S., Palmer S.M., and Chapman P.J. (2018). Soil organic carbon stock in grasslands: Effects of inorganic fertilizers, liming and grazing in different climate settings. *Journal of Environmental Management*, 223, pp. 74–84. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.06.013>
- Holl D., Wille C., Sachs T., Schreiber P., Runkle B. R. K., Beckebanze L., et al. (2019). A long-term (2002 to 2017) record of closed-path and open-path eddy covariance CO₂ net ecosystem exchange fluxes from the Siberian Arctic. *Earth System Science Data*, 11(1), pp. 221–240. <https://doi.org/10.5194/essd-11-221-2019>
- Houghton J., Callander B., and Varney S. (1992). Climate change 1992: the supplementary report to the IPCC scientific assessment.
- Karelin D.V., Zamolodchikov D.G., Shilkin A.V., Popov S.Y., Kumanyaev A.S., de Gerenyu V.O.L., et al. (2020). The effect of tree mortality on CO₂ fluxes in an old-growth spruce forest. *Eur J Forest Res*, 140, pp. 287–305. <https://doi.org/10.1007/s10342-020-01330-3>
- Kleidon A. (2004). Beyond Gaia: Thermodynamics of Life and Earth System Functioning. *Climatic Change*, 66, pp. 271–319. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.0000044616.34867.ec>
- Lal R. (2016). Beyond COP 21: Potential and challenges of the ‘4 per Thousand’ initiative. *Journal of Soil and Water Conservation*, 71(1), 20A–25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
- Lal R., Faussey N. R., and Eckert D. J. (2018). Land Use and Soil Management Effects on Emissions of Radiatively Active Gases from Two Soils in Ohio. *Soil Management and Greenhouse Effect*, pp. 41–60.
- Lehmann J. and Kleber M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528, pp. 60–68. <https://doi.org/10.1038/nature16069>
- Makarova M.V., Poberovskii A.V., Yagovkina S.V., Karol I.L., Lagun V.E., Paramonova N.N., Reshetnikov A.I., Privalov V.I. (2006). Study of the formation of the methane field in the atmosphere over Northwestern Russia. *Izvestiya. Atmospheric and Oceanic Physics*, 42(2), pp. 215–227.
- McNunn G., Karlen D.L., Salas W., Rice C.W., Mueller S., Muth D., et al. (2020). Climate smart agriculture opportunities for mitigating soil greenhouse gas emissions across the U.S. Corn-Belt. *Journal of Cleaner Production*, 268.
- Noulékoun F., Birhane E., Kassa H., Berhe A., Gebremichael Z. M., Adem N. M., et al. (2021). Grazing enclosures increase soil organic carbon stock at a rate greater than ‘4 per 1000’ per year across agricultural landscapes in Northern Ethiopia. *Science of The Total Environment*, 782, 146821. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.146821>
- Ogle S. M., Alsaker C., Baldock J., Bernoux M., Breidt F.J., McConkey B., et al. (2019). Climate and Soil Characteristics Determine Where No-Till Management Can Store Carbon in Soils and Mitigate Greenhouse Gas Emissions. *Scientific Reports*, 9, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47861-7>
- Olson K.R., Ebelhar S.A., Lang J.M. (2010). Cover crop effects on crop yields and soil organic carbon content. *Soil Science*, 175(2), pp. 89–98. <https://doi.org/10.1097/SS.0b013e3181cf7959>
- Parkin T.B., Kaspar T.C., Jaynes D.B., and Moorman T.B. (2016). Rye Cover Crop Effects on Direct and Indirect Nitrous Oxide Emissions. *Soil Science Society of America Journal*, 80(6), pp. 1551–1559. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.04.0120>
- Poultou P., Johnston J., Macdonald A., White R., Powelson D. (2018). Major limitations to achieving ‘4 per 1000’ increases in soil organic carbon stock in temperate regions: Evidence from long-term experiments at Rothamsted Research, United Kingdom. *Global Change Biology*, 24(6), pp. 2563–2584. <https://doi.org/10.1111/gcb.14066>
- Rasse D.P., Rumpel C., Dignac M.F. (2005). Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilisation. *Plant and Soil*, 269(1–2), pp. 341–356. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0907-y>
- Reicosky D.C. (2001). Selected papers from the 10th International Soil Conservation Organization Meeting held May 24–29.
- Reicosky D.C., Archer D.W. (2007). Moldboard plow tillage depth and short-term carbon dioxide release. *Soil and Tillage Research*, 94(1), pp. 109–121. <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.07.004>
- Reshetnikov A.I., Zinchenko A.V., Yagovkina S.V., Karol I.L., Lagun V.E., Paramonova N.N. (2009). Studying methane emission in the north of Western Siberia. *Russian Meteorology and Hydrology*, 34(3), pp. 171–179. <https://doi.org/10.3103/S1068373909030054>
- Reth S., Reichstein M., Falge E. (2005). The effect of soil water content, soil temperature, soil pH-value and the root mass on soil CO₂ efflux – A modified model. *Plant and Soil*, 268, pp. 21–33. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-0175-5>
- Safonov S., Karelin D., Grabar V., Latyshev B., Grabovskii B., Uvarova N. et al. (2012). Carbon emission from the decomposition of dead wood in the southern taiga spruce forest. *Lesovedenie*, 5, pp. 75–80. (In Russ.)
- La Scala N., Bolonhezi D., Pereira G.T. (2006). Short-term soil CO₂ emission after conventional and reduced tillage of a no-till sugar cane area in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 91(1–2), pp. 244–248. <https://doi.org/10.1016/j.still.2005.11.012>
- Shukla M.K., Lal R. (2005). Erosional effects on soil organic carbon stock in an on-farm study on Alfisols in west central Ohio. *Soil and Tillage Research*, 81(2), pp. 173–181. <https://doi.org/10.1016/j.still.2004.09.006>
- Snyder C.S. (2017). Enhanced nitrogen fertiliser technologies support the ‘4R’ concept to optimise crop production and minimise environmental losses. *Soil Research*, 55(5–6), pp. 463–472. <https://doi.org/10.1071/SR16335>
- Tei S., Morozumi T., Kotani A., Takano S., Sugimoto A., Miyazaki S., et al. (2021). Seasonal variations in carbon dioxide exchange fluxes at a taiga-tundra boundary ecosystem in Northeastern Siberia. *Polar Science*, 28, 100644. <https://doi.org/10.1016/j.polar.2021.100644>
- Vakhin A.V., Aliev F.A., Mukhamatdinov I.I., Sitnov S.A., Sharifullin A.V., Kudryashov S.I., et al. (2020). Catalytic aquathermolysis of boca de jaruco heavy oil with nickel-based oil-soluble catalyst. *Processes*, 8(5). <https://doi.org/10.3390/pr8050532>
- VandenBygaert A.J. (2018). Comments on soil carbon 4 per mille by Minasny et al. 2017. *Geoderma*, 309, pp. 113–114.
- VandenBygaert A.J., Bremer E., McConkey B.G., Ellert B.H., Janzen H.H., Angers D.A., et al. (2011). Impact of Sampling Depth on Differences in Soil Carbon Stocks in Long-Term Agroecosystem Experiments. *Soil Science Society of America Journal*, 75(1), pp. 226–234. <https://doi.org/10.2136/sssaj2010.0099>
- Varfolomeev M.A., Yuan C., Bolotov A.V., Minkhanov I.F., Mehrabi-Kalajahi S., Saifullin E.R., et al. (2021). Effect of copper stearate as catalysts on the performance of in-situ combustion process for heavy oil recovery and upgrading. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 207, 109125. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2021.109125>
- de Vries W. (2018). Soil carbon 4 per mille: a good initiative but let’s manage not only the soil but also the expectations: Comment on Minasny et al. (2017). *Geoderma*, 292, pp. 59–86. *Geoderma*, 309, pp. 111–112.
- Wang Z., Hoffmann T., Six J., Kaplan J.O., Govers G., Doetterl S., et al. (2017). Human-induced erosion has offset one-third of carbon emissions from land cover change. *Nature Climate Change*, 7, pp. 345–349. <https://doi.org/10.1038/nclimate3263>
- Xie H., Tang Y., Yu M., Geoff Wang G. (2021). The effects of afforestation tree species mixing on soil organic carbon stock, nutrients accumulation, and understory vegetation diversity on reclaimed coastal lands in Eastern China. *Global Ecology and Conservation*, 26, e01478. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2021.e01478>
- Yuzbekov A.K., Zamolodchikov D.G., Ivashchenko A.I. (2014). Spruce fir photosynthesis in the forest ecosystems of the Log Tayezhnyi test area. *Moscow University Biological Sciences Bulletin*, 69(4), pp. 169–172.
- Zagirova S., Mikhailov O., Elsakov V. (2020). Carbon dioxide, heat, and water vapor fluxes between a spruce forest and the atmosphere in Northeastern European Russia. *Biology Bulletin*, 47(3), pp. 306–317.
- Zinchenko A.V., Paramonova, N.N., Privalov, V.I. et al. (2008). Estimation of methane sources from concentration measurements in the area of gas production in the north of Western Siberia. *Russ. Meteorol. Hydrol.* 33, pp. 34–42. <https://doi.org/10.3103/S1068373908010068>
- Zinchenko A.V., Paramonova N.N., Privalov V.I., Reshetnikov A.I. (2002). Estimation of methane emissions in the St. Petersburg, Russia, region: An atmospheric nocturnal boundary layer budget approach. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 107(20), ACH 2-1-ACH 2-11. <https://doi.org/10.1029/2001JD001369>
- Zinchenko, A.V., Paramonova, N.N., Privalov, V.I. et al. (2001). Estimation of methane emission from surface concentrations in St. Petersburg and its environs. *Meteorologiya i gidrologiya*, 5, pp. 35–39. (In Russ.)

About the Authors

Danis K. Nurgaliev – DSc (Geology and Mineralogy), Professor, Director of the Institute of Geology and Petroleum Technologies, Vice-Rector for Oil and Gas Technologies, Nature Management and Earth Sciences, Kazan Federal University

7, Chernyshevsky St., Kazan, 420111, Russian Federation

Svetlana Yu. Selivanovskaya – DSc (Biology), Professor, Director of the Institute of Environmental Sciences, Kazan Federal University

5, Tovarishcheskaya St., Kazan, 420097, Russian Federation

Maria V. Kozhevnikova – PhD. (Biology), Deputy Director, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga Region) Federal University

5, Tovarishcheskaya St., Kazan, 420097, Russian Federation

Polina Yu. Galitskaya – DSc (Biology), Professor, Applied Ecology Department, Institute of Environmental Sciences, Kazan (Volga Region) Federal University

5, Tovarishcheskaya St., Kazan, 420097, Russian Federation

Manuscript received 2 August 2021;

Accepted 9 August 2021; Published 30 August 2021