

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ

УДК 574/631.48

ПОДХОДЫ И МЕТОДЫ ИЗУЧЕНИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО ВЕЩЕСТВА ПОЧВ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ РОССИИ (ОБЗОР)

© 2022 г. Е. В. Абакумов^а, В. И. Поляков^{а, *, **}, С. Н. Чуков^а

^аСанкт-Петербургский государственный университет, 16-я линия В.О., 29, Санкт-Петербург, 199178 Россия

*e-mail: slavon6985@gmail.com

**e-mail: st049428@student.spbu.ru

Поступила в редакцию 13.12.2021 г.

После доработки 10.01.2022 г.

Принята к публикации 26.01.2022 г.

Создание карбоновых полигонов для мониторинга процессов эмиссии и депонирования соединений углерода в наземных экосистемах является одной из приоритетных задач в области сохранения климата и биосферы в целом. Особенно велика роль почв, которые являются не только основным источником эмиссии парниковых газов в атмосферу Земли, но и долговременным резервуаром, депонирующим значительные количества органического углерода в виде почвенного гумуса. Обсуждены вопросы организации мониторинга парниковых газов на карбоновых полигонах, характере и методах пробоотбора почвенных горизонтов, методологических и методических подходах к определению содержания и запасов органического углерода в почвах. Указано на важность сведений о качественном и количественном составе почвенного органического вещества и гумусовых веществ, которые необходимы для работы современных имитационных моделей и адекватного расчета углеродных единиц для экономической оценки прямого и обратного “углеродного следа”, из-за которого перед Россией стоит ряд проблем, связанных с компенсацией выбросов углерода и “низкоуглеродной” экономикой. Рассмотрены необходимые объемы мониторинговых данных, которые необходимо получать на карбоновых полигонах для использования моделей ROMUL и Efimod. Подчеркнута необходимость адекватного пространственного охвата территории России сетью карбоновых полигонов. Особое внимание следует уделить северным и арктическим территориям распространения многолетнемерзлых пород, содержащих значительные количества органических веществ, которые при потеплении климата могут стать прекурсорами формирования и эмиссии значительных количеств углекислого газа и метана в атмосферу.

Ключевые слова: углеродные полигоны, секвестрация углерода, деградация ландшафта, ГИС технологии, изменение климата

DOI: 10.31857/S0032180X22070024

ВВЕДЕНИЕ

Почвенное органическое вещество (ПОВ) является основным компонентом педосферы на планете [67, 80]. ПОВ и его качественный состав, запасы элементов питания можно рассматривать как индикатор здоровья почвы; они играют решающую роль в производстве продуктов питания, изменении климата и устойчивом развитии человечества [42, 51, 52]. В условиях изменения климата ПОВ может быть подвержено активным процессам биodeградации и стать основным источником парниковых газов в атмосфере [48]. Однако общее влияние изменения климата на содержание ПОВ различается в зависимости от региона и типа почвы [3, 17, 20, 21, 23, 26, 34, 54, 57]. Изменение климата может иметь катастрофические последствия для ПОВ и почв в целом [34, 52, 68]. На сегодняшний день деградации земель под-

вержены различные природные зоны нашей планеты (Арктика, пустыни, горные зоны) [19, 25, 36]. По оценкам Продовольственной и сельскохозяйственной организации (FAO) в почвах (в слое от 0–100 см) содержится до 1415 Пг С (1.4×10^{15} г) (рис. 1) [51, 52, 57]. Самое высокое содержание ПОВ отмечается в торфяных почвах и черноземах, но почвы аридной зоны с низким содержанием углерода также могут внести вклад в изменение климата [34]. Площадь почв, подверженная воздействию многолетнемерзлых пород, составляет более 8.6 млн км², что составляет около 27% всей площади суши к северу от 50° с. ш. и до 1014 ± 175 –194 Пг С, хранящегося в почвах в слое 0–3 м [40, 56, 80]. Таким образом, менеджмент данных почв (sustainable soil management), направленный на увеличение содержания ПОВ, может усилить процесс секвестрации углерода,

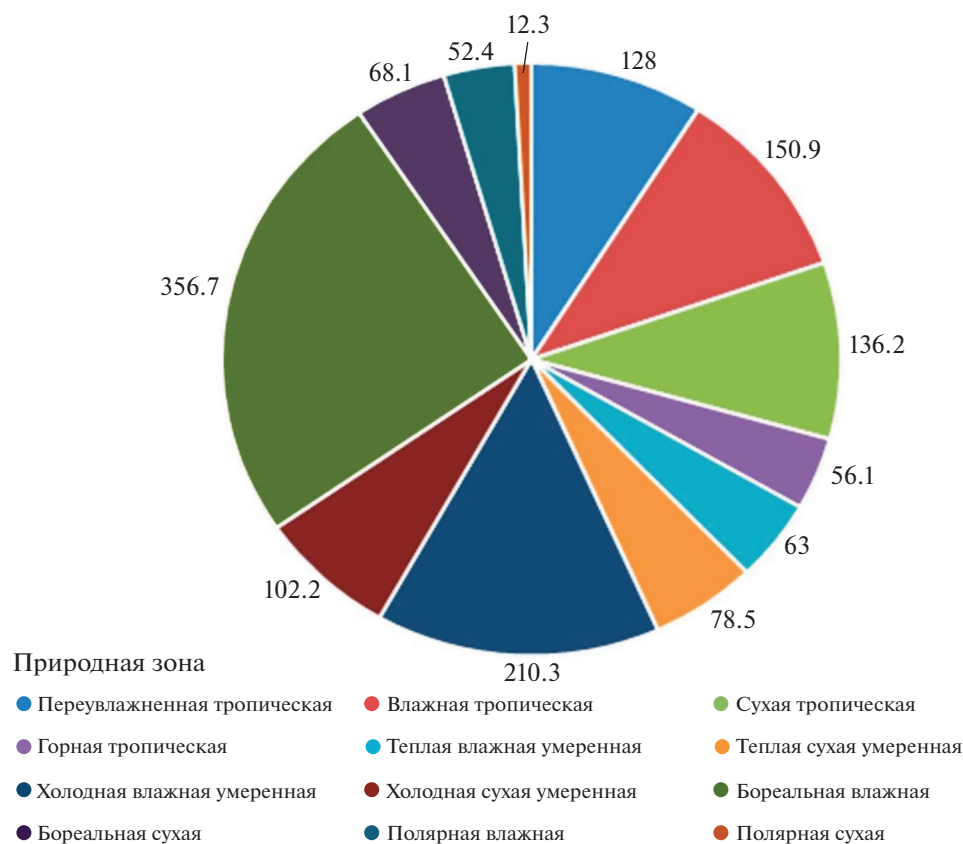


Рис. 1. Запасы (Пг С в 0–100 см слое) почвенного органического углерода в различных природных зонах мира. Источник: LEAP Measuring and modelling soil..., 2019.

тем самым способствуя смягчению последствий изменения климата на нашей планете [34, 52, 67]. В России на данный момент уже были утверждены методические указания по определению объема поглощения парниковых газов, а также секвестрации углерода на землях различного назначения [15].

Почвенный покров России – основной резервуар углерода во всем мире. Содержание почвенного органического вещества в различных природных зонах России были оценены многочисленными исследователями [23, 26, 34, 36, 66].

В конце XX в. на территории бывшего СССР скорость секвестрации углерода в почве резко возросла из-за перехода миллионов гектар пахотных земель в залежное состояние [5]. Начала происходить естественная смена сукцессий травянистой растительности на кустарниковую [70] и древесную с расширением резервуара углерода в составе лесной растительности. Таким образом, заброшенные сельскохозяйственные угодья образывались в различных биоклиматических условиях и в последнее время использовались для ретроспективного анализа почвенных параметров (содержания углерода, азота, биогенных элементов и др.) [20, 43, 44, 49, 65]. Согласно рекомендациям

FAO и Минсельхоза РФ, необходимо вовлекать залежные земли в современный агропромышленный комплекс с использованием стратегии “низкоуглеродного” развития, которое подразумевает сокращение эмиссии углекислого газа и метана за счет использования приемов, предотвращающих быструю минерализацию органических остатков в почве, а также поддержанию и накоплению в почве гумуса [12, 69]. Данный подход также согласуется с инициативой “4 на 1000” (“четыре промилле”) [5]. По оценкам FAO наибольший резервуар органического углерода находится во влажной бореальной зоне (до 356 Пг С в почвенной толще от 0 до 100 см) [38, 75]. Поэтому, согласно Киотскому протоколу, были рассмотрены два подхода управления секвестрацией углерода в лесной зоне [9]. Они подразумевают: 1 – увеличение темпов секвестрации углерода из атмосферы в почву и 2 – увеличение доли древесной биомассы. Данные подходы в рамках секвестрации углерода также были поддержаны Европейской комиссией, была установлена общеевропейская цель на поглощение углерода в эквиваленте 310 млн т выбросов CO₂ [42]. Таким образом, рекультивация залежных земель с учетом стратегии “низкоуглеродного” развития является одной из ведущих задач,

нацеленных на смягчение изменения климата на планете [4]. Помимо этого, Европейская комиссия предлагает отказаться от бесплатных квот на выбросы углерода самолетами и присоединиться к “Системе компенсации и сокращения выбросов углерода для международной авиации” (CORSIA) и ввести квоты на выбросы углерода для сухопутного транспорта [37].

В данном контексте планы по созданию специальных участков мониторинга — углеродных полигонов — должны быть рассмотрены и обсуждены с точки зрения педологической методологии с целью объединения оценки запасов углерода с рисками компенсации углеродсодержащих выбросов в национальной экологической экономике и углеродном рынке. Таким образом, формирование карбоновых полигонов в России позволит создать мониторинговую сеть, которая будет заниматься изучением процессов формирования, накопления, эмиссии и депонирования приоритетных парниковых газов в различных экосистемах нашей страны.

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ: ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ И ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

Карбоновые (углеродные) полигоны представляют собой место, где производится мониторинг выбросов и аккумуляции углекислого газа в условиях различного типа рельефа и почвенного покрова. Формирование карбоновых полигонов в России было принято указом президента РФ 8 февраля 2021 № 76 “О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений” [15]. В указе говорится о необходимости проведения работ по увеличению секвестрационного потенциала России и обеспечения экологической безопасности страны. Данные задачи могут быть реализованы путем создания карбоновых полигонов в различных климатических зонах страны. Формирование углеродных полигонов в России позволит создать сеть мониторинга, которая будет изучать процессы образования, накопления, эмиссии и секвестрирования приоритетных парниковых газов в различных экосистемах нашей страны [8, 66].

Формирование карбоновых полигонов в различных природных и антропогенных экосистемах будет способствовать созданию надежной и продуктивной сети мониторинга. Она позволит изучать планетарный цикл углерода, а также создать предпосылки для оценки секвестрации углерода территорией Российской Федерации [22]. Это предоставит России возможность выполнить цели, поставленные в рамках устойчивого развития ООН и России, а также Парижского климатического соглашения, Киотского протокола и Кли-

матического пакта, принятого в Глазго [9, 12, 41]. Карбоновые полигоны осуществляют ряд фундаментальных и прикладных задач, необходимых для борьбы с изменением климата на планете (рис. 2). Формирование карбоновых полигонов также будет способствовать выполнению стратегии экономического развития направленной на достижение принятой в Евросоюзе углеродной нейтральности (“Зеленая сделка”) к 2050 г. Основной задачей “Зеленой сделки” является уменьшение эмиссии парниковых газов как минимум на 55% к 2030 г. относительно уровня 1990 г. Главным механизмом регулирования “Зеленой сделки” является введение пограничного углеродного налога, призванного компенсировать расходы европейских производителей по сокращению выбросов [37]. Цена углеродного следа уже используется на внутреннем рынке ЕС, на 2021 г. 41 евро за 1 т CO₂. Также ЕС предполагает ввести трансграничный углеродный сбор на энергоносители и карбоноёмкую продукцию [37]. На сегодняшний день 42% российского экспорта уходит в ЕС, углеродный след его составлял на 2020 г. более 1 млрд т CO₂ [37].

Сегодня в России создан ряд карбоновых полигонов, которые были запущены в 2021 г. — “Росьянка” (Калининградская область), полигон Западно-Сибирского научно-образовательного центра расположен на биостанции “Озеро Кучак” (Тюменская область), полигон МГУ им. Ломоносова в Московской области “Чашниково”, а также “Урал-Карбон” (Свердловская область). На рис. 3 показаны существующие и планируемые карбоновые полигоны на территории России.

В мировой практике большого успеха в создании карбоновых полигонов достигла Германия. На ее территории есть ряд опорных полигонов, на которых производится круглогодичный мониторинг, к тому же ряд опорных точек расположен в России, где в рамках русско-немецкого сотрудничества существуют полигоны с проведением климатических измерений и оценкой эмиссии углекислого газа. Данные полигоны расположены в Тверской обл., Челябинской обл., Красноярском крае, ЯНАО и Республике Якутия. Работа полигонов осуществляется в рамках международных проектов таких как CarboPerm [30], CALM [29], Lena Delta [53]. Данные проекты также нацелены на создание модели планетарного углеродного баланса. Одним из механизмов обеспечения надежной и сопоставимой информации при определении почвенных параметров между различными странами является глобальная сеть почвенных лабораторий (ГЛОСОЛАН) [64]. Данная сеть охватывает весь мир и обеспечивает выполнение следующих задач: согласование стандартных рабочих процедур в определении почвенных параметров; усиление контроля качества; проведение



Рис. 2. Области применения данных, получаемых с карбоновых полигонов.



Рис. 3. Формирование сети карбоновых полигонов в РФ. Источник: Министерство науки и высшего образования РФ (<https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>).

рабочих тренингов; предоставление доступа к глобальной спектральной почвенной библиотеке, а также оценку качества удобрений. На сегодняшний день в России лишь 4 почвенные лаборатории работают в составе ГЛОСОЛАН. Вовлечение почвенных лабораторий при карбоновых полигонах позволило бы стандартизировать методы анализа почвенных параметров, а также усилить контроль качества внутри сети карбоновых полигонов. Что касается европейских стран, то все страны, входящие в Евросоюз, имеют полигоны для наблюдения климатических изменений, а также эмиссии парниковых газов из почвы. В Евросоюзе применяется трехуровневая система организации мониторинговых площадок, предложенная Межправительственной комиссией по изменению климата (IPCC) [42, 64]. На первом уровне используются эталонные значения запасов углерода, рассчитанные на основе данных о типах экосистем (полярная сухая и влажная экосистема, бореальная сухая и влажная, тропическая влажная, сухая и т. д.), таким образом для расчета запасов углерода необходимы лишь климатические данные об экосистеме, а также характеристика почв (наименование, основные квалификаторы горизонтов, данные о влажности, гранулометрическом составе). На втором уровне используются те же эталонные значения, дополненные и скорректированные на основе почвенно-климатических данных конкретной страны. Третий уровень представляет собой результат моделирования и прогнозирования выбросов и поглощения парниковых газов в конкретных региональных условиях. Этот уровень является наиболее комплексным и точным по сравнению с первыми двумя, и представляет надежную информацию о потоках углекислого газа в атмосфере и секвестрационном потенциале территории. Также применяются отдельные виды оценок для сельскохозяйственных земель, для определения их эффективности использования [45, 46].

ПОСТУПЛЕНИЕ И ЭМИССИЯ ОРГАНИЧЕСКОГО УГЛЕРОДА В ПОЧВАХ

Поступление углерода в почву определяется двумя потоками: надземным и подземным. Первый может быть измерен традиционным путем ежемесячного определения количества опадающей подстилки в опадоуловителях, что весьма полезно для расчета углеродного баланса [1]. Подземное поступление менее динамично во времени, причем расчет подземного потока углерода – более комплексная задача. Большая часть методов анализа углеродного бюджета направлена на изучение эмиссии углерода из почвы и не учитывает приход углерода в систему. Что касается общего выброса CO_2 , то для его расчета подходит классический метод закрытых камер [51] или более продвинутый метод Eddy-covariance, который основан на

измерениях флуктуаций CO_2 на исследуемой территории, включая климатические характеристики района исследования [51]. Метод закрытых камер является более удобным и простым с точки зрения измерения потоков углекислого газа, так как портативные инструменты измерения CO_2 можно быстро транспортировать и устанавливать на исследуемых участках. Недостатком данного метода является сложность охвата большой территории. Поэтому использование метода Eddy-covariance является наиболее подходящим вариантом для анализа углеродного бюджета территории. Данный метод позволяет получать динамические данные с конкретного полигона в течение длительного времени в довольно гетерогенных условиях (арктических, бореальных, тропических и др.) (рис. 4). Важным условием являются особенности размещения башни Eddy-covariance. Необходимо соблюдение таких условий, как стабильные климатические условия полигона (ветер, температура, влажность, CO_2), однородность растительного покрова, а также равнинный рельеф [24]. Установки Eddy-covariance способны охватывать площадь до нескольких гектар. Однако данный метод узкоспециализированный и дорогостоящий. Использование Eddy-covariance зависит от ряда местных условий: скорости и направления ветра, устойчивого турбулентного потока, а также однородного распределения источника и стока CO_2 [51].

Важным этапом является задача формирования мониторинга выбросов углекислого газа и метана в арктическом секторе Российской Федерации. В Российской Арктике действует ряд станций мониторинга (подчиненных государственной сети мониторинга Росгидромета), которые обеспечивают мониторинг выбросов парниковых газов, а также климатических параметров удаленных территорий. Такие центры расположены на архипелаге Шпицберген (Баренцбург), на архипелаге Северная Земля (мыс Баранова), климатической станции в Тикси (Якутия), а также станции на острове Самойловский (Якутия). Полярные почвы являются важным потенциальным источником (“hot spot”) эмиссии парниковых газов. Здесь захоронено значительное количество ПОВ, которое может стать участником эмиссии углерода и внести значительный вклад в изменение климата на планете [48, 79, 80]. Так, во время таяния многолетнемерзлых пород происходит активная эмиссия парниковых газов (CO_2 , CH_4). Например, в дельте реки Лена (Якутия) в аэробных условиях наблюдалась эмиссия CO_2 до 58.6 г CO_2 -С кг/С, а в анаэробных условиях до 17.5 и 10.7 г CH_4 -С кг/С. В условиях изменения климата, согласно прогнозу, выбросы парниковых газов могут увеличиться к 2100 г. до 113 г CO_2 -С кг/С в анаэробных условиях и до 241 г CO_2 -С (углеродных эквивалентов)

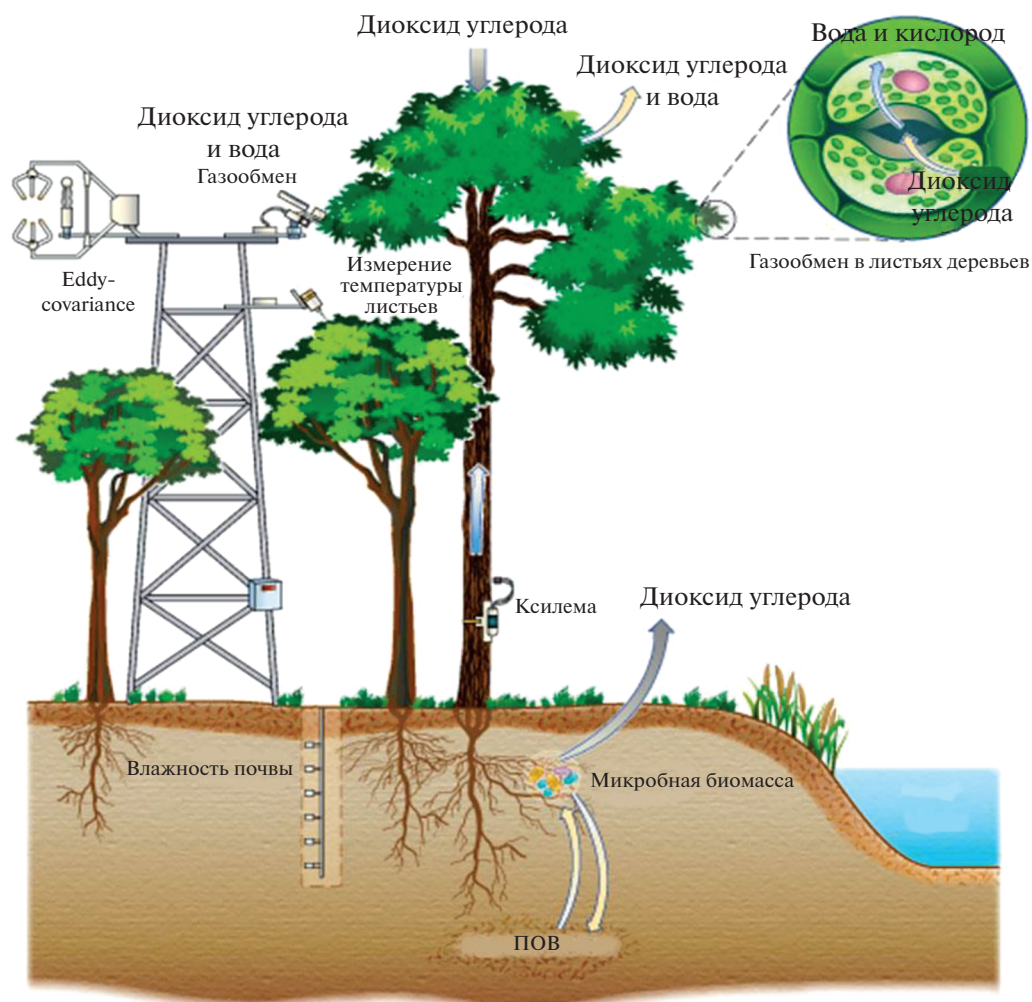


Рис. 4. Схема функционирования башни Eddy-covariance. Источник: Berkeley Lab's Earth & Environmental Sciences Area (<https://eesa.lbl.gov/>).

кг/С в анаэробных условиях [47]. Таким образом, важной задачей является мониторинг наиболее уязвимых экосистем с целью расчета их возможного вклада в эмиссию CO₂ и изменение климата.

СОДЕРЖАНИЕ И ЗАПАСЫ УГЛЕРОДА В ПОЧВЕ РОССИИ: ОЦЕНКА, СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ И КОРРЕЛЯЦИЯ

Важнейшим направлением работы на карбоновых полигонах является проблема оценки резервуара и тенденций стабилизации органического вещества в почвах природных экосистем разных природных зон. Адекватная оценка запасов должна основываться на единых представлениях о глубине и на участках отбора проб в профилях почвы и на участках мониторинга. Эта проблема особенно актуальна в контексте развития пространственной сети карбоновых полигонов в России. В настоящее время для определе-

ния гравиметрических концентраций почвенного органического углерода используются два метода. Первый основан на прямом сухом сжигании углерода и оценке выделяемого CO₂ [6, 18, 27, 61]. Данный метод достаточно точный, но не каждая лаборатория в России имеет возможность работать с анализаторами CHN. Напротив, классические методы определения углерода, метод Тюрина (его используют страны Центральной и Восточной Европы) и Walkley-Black (Западный мир) [61], основанные на окислении углерода, галогенов и ионов железа. Эти методы относительно дешевы и могут быть легко реализованы в любой лаборатории. Около 97% всех данных о содержании углерода в почве и грунтах было получено с помощью классических методов [61]. При этом метод не очень точен, не работает в засоленных почвах, почвах с высоким содержанием в ПОВ алифатических соединений и в почвах с высоким содержанием железа [61]. В контексте создаваемых сейчас

карбонных полигонов необходимо с самого начала решить, какой метод будет использоваться. Возможно, при мониторинге почв карбонных полигонов можно будет использовать классический метод Тюрина с периодической централизованной верификацией на анализаторах CHN.

ГРАВИМЕТРИЧЕСКОЕ И ОБЪЕМНОЕ СОДЕРЖАНИЕ УГЛЕРОДА

Если с гравиметрическим определением углерода в почвах в целом все понятно, то методы перевода гравиметрического содержания в объемные или запасы углерода далеки от полного разрешения [80]. В расчетах запаса углерода используется показатель плотности почвы. Средние и высокие уровни скелетности почвы встречаются довольно часто, и от этого во многом зависит поступление органических веществ в почву. Учитывая, что доля каменистых почв в мире достигает 30%, это важный методологический вопрос.

Международной комиссией (IPCC) был предложен метод расчета объемного углерода в органических и минеральных горизонтах почв в зависимости от типа древостоя, скелетности (который учитывает факт наличия камней в почве), типов генетических горизонтов, содержания углерода и плотности почвы [42, 63]. Полученные таким образом данные являются перспективными, так как их можно будет сравнить с ранее полученными в других странах данными, что позволит России равноправно выступать на международном рынке углеродных единиц. Этот метод был рекомендован для использования всеми странами, подписавшими Киотский протокол [9].

Важной задачей является создание единой системы определения содержания углерода в почвах и его запасов в зависимости от региональных условий [39]. На территории России развиваются почвы различных створов, отделов и типов, что обусловлено высоким разнообразием факторов почвообразования [38, 39]. Как уже было сказано, почвы характеризуются различной степенью каменистости, наличием минеральных и органических горизонтов, стратификацией почвенных горизонтов, наличием слоя многолетнемерзлых пород. Поэтому система мониторинга в пределах страны должна быть одинакова, и различаться могут лишь методы (отечественные и зарубежные) определения отдельных параметров (например, содержание органического углерода, обменная кислотность) [72]. Единая система определения позволит сравнивать полученные данные без использования дополнительных поправочных коэффициентов. Таким образом, мы сможем в короткое время получить репрезентативные данные по основным почвенным параметрам в различных природных зонах России. При этом необходимо обратить внимание на международный

опыт формирования мониторинговой сети карбонных полигонов, так как в условиях углеродного рынка, Россия будет выступать в качестве основного участника в вопросах углеродных компенсаций. На наш взгляд, оптимальным способом формирования сети карбонных полигонов является использование международной системы согласно IPCC [4] с различными модификациями, которые будут учитывать гетерогенность условий почвообразования в различных регионах нашей страны. При таком подходе Россия сможет торговать углеродными единицами на международном рынке и унифицирует определение почвенных параметров во всех исследуемых природных зонах.

ФОРМЫ ГУМУСА И ОСОБЕННОСТИ ОТБОРА ПРОБ ИЗ ОРГАНОГЕННЫХ ГОРИЗОНТОВ ПОЧВ

В России используются другие представления о том, что такое POV и гумус почв, чем в ЕС или США. В ЕС и США используется термин soil organic matter (SOM), он включает следующие фракции: растительные остатки, частично трансформированный растительный материал, микробную биомассу почвы и гумус [51]. В отечественном почвоведении под гумусом часто понимают коллоидное органическое вещество, состоящее из гуминовых кислот и перкураторов гумификации (белков, углеводов, лигнина и альдегидов) [2, 7, 10, 11, 78]. Органические остатки, сохранившие свое анатомическое строение (растительный опад, органические удобрения – торф, сапрпель), в российской почвенной школе не считаются гумусом [10]. Поэтому при определении органического углерода из почвы тщательно удаляются корни и детритные формы органического вещества. При этом в отечественном почвоведении существует понятие органического вещества почв, которое соответствует понятию SOM [52]. Следовательно, концепции гумуса и POV, а также общего органического углерода не вполне эквивалентны [31, 77]. Поэтому необходимо решить, что будет использоваться в качестве объекта мониторинга, из каких горизонтов будет проводиться регулярный отбор почвенных проб. Будет ли лесная подстилка и все поверхностные неразложившиеся органические остатки, которые являются довольно важной частью запасов углерода [31, 32, 58, 62, 68], включены в определение. Секвестрация углерода происходит на разных уровнях организации органического вещества, в лесной подстилке, в торфе, в органо-минеральных и минеральных горизонтах. Благодаря различным механизмам стабилизации (механическим, химическим, молекулярным) POV трансформируется в более стабильную форму и может храниться в почве в течение длительного времени (рис. 5) [36, 73]. Внесение удоб-

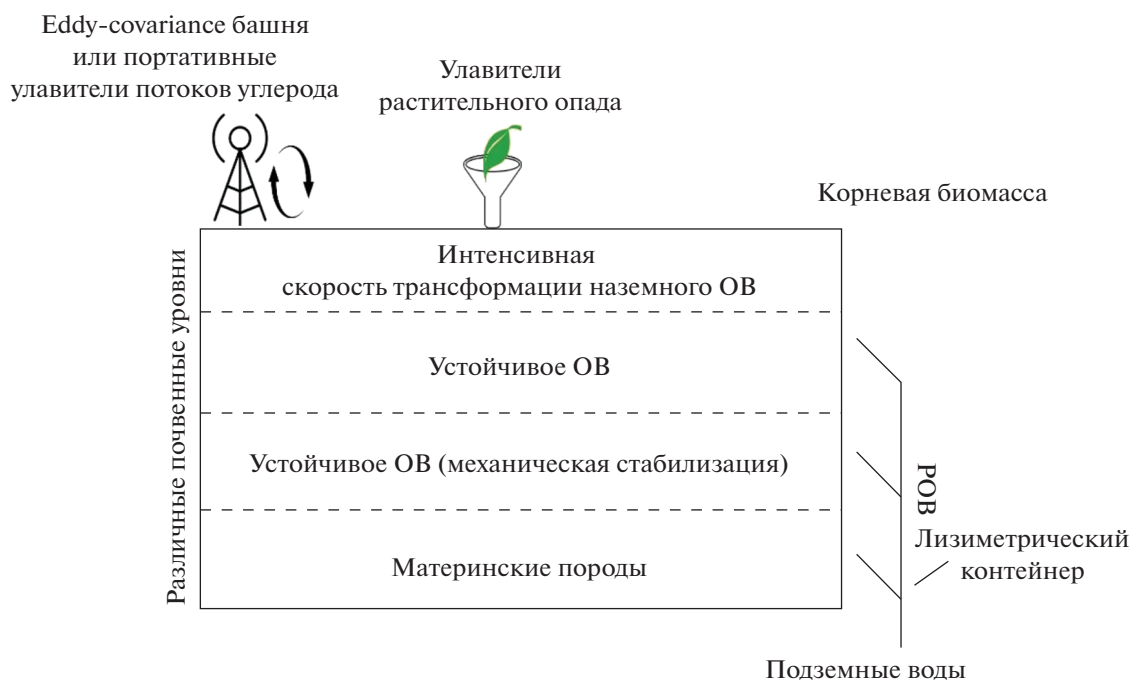


Рис. 5. Схема функционирования карбонового полигона и методов учета почвенного органического вещества на различных уровнях. ОВ – органическое вещество; РОВ – растворенное органическое вещество.

рений в почву на различных севооборотах рассчитано на обогащение веществами алифатической природы, что приводит к быстрой минерализации и вовлечению биогенных элементов в круговорот. В естественных экосистемах более выражен процесс формирования сложных углеводов и стабилизации органического материала в виде гумусовых соединений.

Другой важный вопрос – это глубина отбора проб: 0–20 (пахотные слои), 0–100 см (средняя глубина почвенного профиля в Евразии) или отбор образцов по почвенным горизонтам (1 – по почвенным горизонтам сплошной колонкой; 2 – по горизонтам из их середины или нескольких частей с различных глубин). Российскими учеными из Почвенного института им. В.В. Докучаева предложена стратегия на основе второго уровня расчета резервуара углерода в почве карбоновых полигонов с дальнейшим переходом на третий уровень, согласно IPCC [4]. В данной работе также отмечается, что выбор площадок для карбоновых полигонов должен осуществляться в различных экосистемах, так как использование лишь нескольких полигонов приведет к ошибочным расчетам и лишит карбоновые полигоны географической представительности. Согласно IPCC, для анализа резервуара углерода в почвенном покрове используется верхний слой почвы (0–30 см), в данный слой не включаются мертвые органические остатки и лиственный опад. При необходимом обосновании глубина отбора может быть изменена.

Таким образом, существует множество ключевых вопросов по стратегии формирования выборки, которые должны быть обсуждены и определены в самом начале создания полигонов.

КАРБОНОВЫЕ ПОЛИГОНЫ В ПРОСТРАНСТВЕ И РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ

В настоящее время предложенные Министерством образования и науки Российской Федерации [13] углеродные полигоны не охватывают все природные зоны (рис. 3). Предлагаемый подход основан на расположении полигонов в разных субъектах РФ. Однако не все разнообразие природных условий, даже на уровне биома, будет покрыто сетью полигонов, что приведет к искажениям и неточностям даже в приблизительной оценке. Особое внимание следует обратить на необходимость расширения сети углеродных полигонов на все природные зоны России. Планируемая сеть углеродных полигонов пока не включает криогенные почвы Арктики и Субантарктики, в которых сосредоточены существенные запасы органического вещества. Российские бореальные и полярные почвы и подземные отложения являются ключевыми хранилищами углерода и азота в Северном полушарии, тем не менее, запасы органических веществ в этих средах недооцениваются из-за сложной неоднородности территории и наличия в почвах слоя многолетнемерзлых пород [80]. Та-

ким образом, вопрос охвата страны полигонами является ключевым моментом для точных оценок запасов углерода с учетом уникальных явлений зональности почв и окружающей среды. Если Россия будет придерживаться зонального подхода в пространственном размещении полигонов, то он сможет стать стандартом для всего мира — будут охвачены все типы биомов, кроме тропического. В этом контексте следует также использовать предыдущий опыт международной биологической программы [35, 50]. Почвы России с учетом наибольшего разнообразия могут быть эталоном по гумусовому состоянию и метрологии содержания углерода для стран с аналогичными природными зонами.

МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НА ОСНОВЕ ДАННЫХ, ПОЛУЧЕННЫХ ПРИ ФУНКЦИОНИРОВАНИИ КАРБОНОВЫХ ПОЛИГОНОВ

Моделирование — важный инструмент для прогнозирования и анализа больших объемов данных, включая данные об органическом углероде. Современные математические имитационные модели (ROMUL, Efimod) позволяют обрабатывать большие объемы почвенно-климатических и почвенно-химических данных и прогнозировать динамику содержания различных фракций органического вещества — от быстроминерализуемых до устойчивых к биотическим и абиотическим воздействиям [31, 32, 58, 62]. Для функционирования карбоновых полигонов необходимо получение почвенно-климатических данных, поэтому каждый полигон должен иметь максимально полный функционал оценки параметров климата: регистраторы температуры и влажности воздуха и почвы суммы осадков и др.

Имитационное моделирование с высокой точностью важно не только с точки зрения фундаментальной науки, но и для функционирования рынка углеродных единиц, а также для расчета компенсаций углеродсодержащих выбросов. Работоспособность углеродного рынка должна поддерживаться системой прогнозирования, основанной на имитационной математической модели, которая должна проверяться и поверяться с использованием входных данных, полученных на карбоновых полигонах. Современные имитационные модели способны учитывать различные факторы, влияющие на пул углерода в почве, такие как состав прекурсоров гумификации, молекулярный состав ПОВ, а также устойчивость ПОВ к биодеградации. Тем не менее, математические модели не способны учитывать многие природные процессы (различную массу растительного опада, изменение массы корневой системы, изменение климата), происходящие на микроуровне и в локальных биогеоценозах.

Использование ГИС-систем также имеет решающее значение для обобщения больших не-обработанных данных и визуализации информационных пакетов. В ходе создания карбоновых полигонов появится необходимость в создании унифицированной базы данных на основе ГИС технологий. Внедрение спутниковых технологий позволит создать блок оперативного и низкочастотного мониторинга и обновления данных, поступающих с действующих карбоновых полигонов. Для моделирования таких процессов целесообразным считается формирование сети тестовых полигонов, которые помогут в развитии пространственного функционирования карбоновых полигонов и перехода со второго уровня расчетов резервуара углерода в почвах на третий [35, 50].

Важной задачей при обработке таких массивов данных является создание объемной базы данных, которая могла бы накапливать и давать полноценный доступ к архивам информации для работников научных и правительственных подразделений. В ходе формирования огромного массива данных, например Германия, организовала у себя базу данных “Pangea”, в которой собирается информация по наземным и водным экосистемам [60].

УГЛЕРОДНЫЕ КОМПЕНСАЦИИ

Вопросы круговорота углерода и оценки отдельных параметров углеродного цикла важны для современного общества как в интересах экономики, так и систем принятия решений являются крайне востребованными современным обществом. Углеродный след, углеродные компенсации и оценка углеродного баланса являются ключевыми вызовами и проблемами для современного практического почвоведения, прикладной экологии и экономики природопользования. Обширные пространства Российской Федерации в этом контексте могут выступить в качестве верификационной модели оценивания и прогноза углеродных эмиссий и депонирования углеродных соединений в компоненты почвенного покрова наземных экосистем. Существенная неопределенность в методиках и методах оценивания содержания и запасов углеродсодержащих соединений в почвах остается главным препятствием для выхода РФ на международную арену углеродных компенсаций и налогов.

Могут ли какие-либо природные зоны России представлять собой зону секвестрации углерода? Являются ли природные зоны и окружающая среда критически важными с точки зрения антропогенных выбросов CO₂? Как мы можем управлять потоками углерода: уменьшить выбросы, увеличить улавливание, перераспределить оба этих компонента во времени и пространстве [55, 74, 76]? Другой вопрос — как обосновать принятие решений на основе научных данных, полученных на

основе функционирования полигонов и практики управления окружающей средой в области лесного хозяйства, агрономии и горнодобывающей промышленности.

Одной из наиболее важных задач является определение количества органического углерода различного качественного состава, подлежащего оценке с точки зрения экосистемных услуг. Здесь должны играть решающую роль не только запасы (объемная концентрация), но и качество органического вещества (скорость стабилизации) [28, 71]. Заключительный вопрос данной дискуссии таков – сравнима ли углеродная единица гумуса одного качества с углеродной единицей гумуса другого качества? Другими словами, сопоставима ли 1 т углерода чернозема с 1 т углерода подзола?

Перечисленные выше вопросы относятся к практическому почвоведению, к выходу его данных в экономику окружающей среды и области монетизации экосистемных услуг (рынок углеродных единиц), которые пока далеки от решения [33].

ПОЧВА И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ РОССИИ В ИЗМЕНЯЮЩЕМСЯ КЛИМАТЕ

В рамках целей устойчивого развития ООН и России до 2030 г., поставлены задачи № 13 (Борьба с изменением климата) и № 15 (Защита и восстановление экосистем суши и содействие их рациональному использованию, рациональное лесопользование, борьба с опустыниванием, прекращение и обращение вспять процесса деградации земель и прекращение процесса утраты биоразнообразия) [16]. В рамках данных задач в России к 2030 г. должны заработать институты, решающие проблемы климатических изменений, в частности эмиссии парниковых газов. Россия находится в числе основных эмитентов парниковых газов в мире, четвертым по величине после Китая, США и Индии. Климатические изменения в контексте России также имеют негативное влияние на социально-экономические институты. Деградация мерзлоты в районах ее залегания приводит к механическим повреждениям домов, коммуникаций, проседанию земель, дорог и ежегодно оценивается в сумму около 55 млрд рублей [16]. В целом в России наблюдается тренд на сокращение сжигания топлива, согласно данным Международного энергетического агентства, при этом следы от сжигания мы будем чувствовать еще долгое время, так как продукты сжигания аккумулируются в биосфере и участвуют в современных процессах трансформации органического углерода и так называемого черного углерода, следы которого четко прослеживаются в горных областях на поверхности ледников. Данная проблема была четко определена в 1997 г. в рамках Киотского протокола, и в 2005 г. появился первый междуна-

родный документ, обязывающий страны-участники уменьшать выбросы парниковых газов. Данный документ просуществовал до 2020 г. и, согласно данным МГЭ, в России произошло сокращение выбросов парниковых газов. На смену ему в 2015 г. в Париже было принято климатическое соглашение, в котором по плану к 2030 г. в России должны уменьшиться выбросы парниковых газов до 25–30% по сравнению с 1990 г., что предполагает небольшой рост и сохранение этого уровня в дальнейшем [16].

Таким образом, создание карбоновых полигонов в Арктике, в промышленных районах, крупных городов и точечных полигонов в степных, таежных, тундровых и горных экосистемах даст возможность для формирования надежной и продуктивной мониторинговой сети, которая позволит внести вклад в изучение планетарного цикла углерода и секвестрационного потенциала территории Российской Федерации, а также соответствовать целям, поставленным в рамках Устойчивого развития ООН и России, Парижскому климатическому соглашению и Киотскому протоколу.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня Россия стоит перед глобальными вызовами в отношении изменения климата. В пределах почвенного покрова страны находится крупнейший резервуар почвенного органического углерода, трансформация которого в результате изменения климата способна привести к деградации существенной части ландшафтов. Формирование сети карбоновых полигонов сможет создать предпосылки к мониторингу и учету бюджета углерода в различных природных зонах. Данные полигоны будут не только механизмом наблюдения за атмосферой, гидросферой и педосферой, но и местом, где могут быть применены различные технологии, позволяющие сгладить последствия изменения климата за счет усиления секвестрации углерода природными и антропогенно-преобразованными ландшафтами. На данный момент существует ряд методологических задач, которые необходимо решить сейчас, до формирования полноценной сети полигонов, таких как: 1 – терминология – какое органическое вещество в почве будет определяться, стратегию отбора проб почв, а также расчет запасов углерода в почвах; 2 – пространственный охват территории страны – необходимо учитывать все существующие в стране природные зоны, а также крупные потенциальные источники углерода (антропогенно-преобразованные ландшафты); 3 – единообразие почвенно-климатических данных – данные для разных глубин, и в разные сезоны несопоставимы с точки зрения регулярного мониторинга; 4 – хранение и обработка данных – необходимы специализированные центры для сбора и интерпретации

данных, полученных с карбоновых полигонов; 5 – унификация углеродной единицы – расчет углеродных единиц зависит от способов ее измерения, так же как эквивалент углеродной валюты будет зависеть от методологических приемов и особенностей организации сети карбоновых полигонов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке научного центра мирового уровня “Агротехнологии будущего”, проект № 075-15-2020-922 от 16.11.2020.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы не имеют конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Базилевич Н.И., Титлянова А.А., Тишков А.А.* Биотический круговорот на пяти континентах: азот и зольные элементы в природных наземных экосистемах. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2008. 376 с.
2. *Гришина Л.А.* Гумусообразование и гумусное состояние почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1986. 244 с.
3. *Добровольский Г.В.* Почвы речных пойм центра Русской равнины. М.: Изд-во Моск. ун-та, 2005. 294 с.
4. *Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н.* Методологические подходы формирования единой Национальной системы мониторинга и учета баланса углерода и выбросов парниковых газов на землях сельскохозяйственного фонда Российской Федерации // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2021. № 108. С. 175–218.
5. *Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатива “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюл. Почв. ин-та им. В.В. Докучаева. 2019. № 98. С. 185–202.
6. *Козут Б.М., Фрид А.С.* Сравнительная оценка методов определения содержания гумуса в почвах // Почвоведение. 1993. № 9. С. 119–123.
7. *Кононова М.М.* Органическое вещество почвы. Его природа, свойства и методы изучения. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 314 с.
8. *Морковина С.С., Панявина Е.А., Шанин И.И., Авдеева И.А.* Экономические аспекты организации карбоновых ферм на лесных землях // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2021. Т. 9. № 1(52). С. 17–25.
9. ООН Киотский протокол. Киотский протокол к рамочной конвенции организации объединенных наций об изменении климата. ООН: Киото, 1998. 26 с.
10. *Орлов Д.С.* Гумусовые кислоты почв и общая теория гумификации. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1990. 332 с.
11. *Орлов Д.С.* Химия почв. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1992. 400 с.
12. Парижское соглашение. 2015. 30 с. URL http://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/Russian_Paris_agreement.pdf (дата обращения: 24.11.2021).
13. Приказ Минобрнауки России от 5 февраля 2021 г. № 74 “О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса”. М.: Минобрнауки России, 2021. 17 с.
14. Распоряжение Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Методические указания по количественному определению объема поглощения парниковых газов. М.: Кремль, 2017. 118 с.
15. Указ президента РФ. О мерах по реализации государственной научно-технической политики в области экологического развития Российской Федерации и климатических изменений. М.: Кремль, 2021. 13 с.
16. Цели устойчивого развития ООН и Россия. М.: Аналитический центр при правительстве Российской Федерации, 2016. 44 с.
17. *Чуков С.Н.* Структурно-функциональные параметры органического вещества почв в условиях антропогенного воздействия. СПб.: Изд-во СПб. гос. ун-та, 2001. 216 с.
18. *Abakumov E.V., Popov A.I.* Determination of the carbon and nitrogen contents and oxidizability of organic matter and the carbon of carbonates content in one soil sample // Eurasian Soil Sci. 2005. V. 38. № 2. P. 165–172.
19. *Abakumov E., Maksimova E., Tsibart A.* Assessment of postfire soils degradation dynamics: Stability and molecular composition of humic acids with use of spectroscopy methods // Land Degradation and Development. 2018. V. 29. № 7. P. 2092–2101.
20. *Abakumov E., Morgun E., Pechkin A., Polyakov V.* Abandoned agricultural soils from the central part of the Yamal region of Russia: morphology, diversity, and chemical properties // Open Agriculture. 2020. V. 5(1). P. 94–106.
21. *Abakumov E.V., Polyakov V.I., Orlova K.S.* Podzol development on different aged coastal bars of Lake Ladoga // Vestnik Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta, Biologiya. 2019. V. 48: 6–31.
22. *Abakumov E., Polyakov V.* Carbon Polygons and Carbon Offsets: Current State, Key Challenges and Pedological Aspects // Agronomy. 2021. V. 11(10). ID 2013.
23. *Alekseev I., Abakumov E.* Permafrost-affected former agricultural soils of the Salekhard city (Central part of Yamal region) // Czech Polar Reports. 2018. V. 8(1). P. 119–131.
24. *Baldocchi D.D.* Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future // Global Change Biology. 2003. V. 9(4). P. 479–492.

25. *Becker T., Kutzbach L., Forbrich I., Schneider J., Jager D., Thees B., Wilmking M.* Do we miss the hot spots?—The use of very high resolution aerial photographs to quantify carbon fluxes in peatlands // *Biogeosciences*. 2008. V. 5(5). P. 1387–1393.
26. *Beyer L., Sorge C., Blume H.P., Schulten H.R.* Soil organic matter composition and transformation in gelic histosols of coastal continental Antarctica // *Soil Biology and Biochemistry*. 1995. V. 27(10). P. 1279–1288.
27. *Bhatti J.S., Apps M.J., Tarnocai C.* Estimates of soil organic carbon stocks in central Canada using three different approaches // *Canadian J. Forest Research*. 2002. V. 32(5). P. 805–812.
28. *Bumpus A.G.* The Matter of Carbon: Understanding the Materiality of tCO₂e in Carbon Offsets // *Antipode*. 2011. V. 43(3). P. 612–638.
29. CALM. Circumpolar Active Layer Monitoring Network-CALM: Long-Term Observations of the Climate-Active Layer-Permafrost System. 1991. URL: <https://www2.gwu.edu/~calm/> (дата обращения: 24.11.2021).
30. CARBOPERM. CarboPerm: An interdisciplinary Russian-German project on the formation, turnover and release of carbon in Siberian permafrost landscapes. 2013. URL: <https://www.geo.uni-hamburg.de/en/bodenkunde/forschung/abgeschlossene-projekte/carboperm.html> (дата обращения: 24.11.2021).
31. *Chertov O., Nadporozhskaya M.* Development and application of humus form concept for soil classification, mapping and dynamic modelling in Russia // *Applied Soil Ecology*. 2018. V. 123. P. 420–423.
32. *Chertov O.G., Komarov A.S., Nadporozhskaya M., Bykhovets S.S., Zudin S.L.* ROMUL – A model of forest soil organic matter dynamics as a substantial tool for forest ecosystem modeling // *Ecological Modelling*. 2001. V. 138(1–3). P. 289–308.
33. *Cornelis van Kooten, Johnston C.M.T.* The Economics of Forest Carbon Offsets // *Annual Review of Resource Economics*. 2016. V. 8(1). P. 227–246.
34. *Davidson E.A., Janssens I.A.* Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change // *Nature*. 2006. V. 440(7081). P. 165–173.
35. *Dvornikov Y.A., Vasenev V.I., Romzaykina O.N., Grigorieva V.E., Litvinov Y.A., Gorbov S.N., Dolgikh A.V., Korneykova M.V., Gosse D.D.* Projecting the urbanization effect on soil organic carbon stocks in polar and steppe areas of European Russia by remote sensing // *Geoderma*. 2021. V. 399. P. 115039.
36. *Ejarque E., Abakumov E.* Stability and biodegradability of organic matter from Arctic soils of Western Siberia: Insights from ¹³C-NMR spectroscopy and elemental analysis // *Solid Earth*. 2016. V. 7(1). P. 153–165.
37. European commission. Directive Of The European Parliament And Of The Council. 2021. 581 p. URL: https://ec.europa.eu/info/sites/default/files/revision-eu-ets_with-annex_en_0.pdf (дата обращения: 02.12.2021)
38. FAO. Status of the World's Soil Resources: Main Report. Italy: Rome, 2015. 650 p.
39. FAO. Recarbonizing global soils – A technical manual of recommended management practices. V. 2. Hot spots and bright spots of soil organic carbon. Italy: Rome, 2021. 268 p.
40. *Gao Y., Couwenberg J.* Carbon accumulation in a permafrost polygon peatland: Steady long-term rates in spite of shifts between dry and wet conditions // *Global Change Biology*. 2015. V. 21(2). P. 803–815.
41. Glasgow Climate pact. CP 26. Scotland: Glasgow, 2021. 8 p.
42. IPCC. Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / Eds: *R.K. Pachauri, A. Reisinger*. Geneva, 2007. 104 p.
43. *Karelin D., Goryachkin S., Kudikov A., De Gerenu V.L., Lunin V., Dolgikh A., Lyuri D.* Changes in carbon pool and CO₂ emission in the course of postagrogenic succession on gray soils (Luvic Phaeozems) in European Russia // *Eurasian Soil Sci*. 2017. V. 50(5). P. 559–572.
44. *Khitrov N.B.* An approach for a retrospective assessment of soil changes // *Eurasian Soil Sci*. 2008. V. 41(8). P. 793–804.
45. *Kiryushin V.I.* Methodology for Integrated Assessment of Agricultural Land // *Eurasian Soil Sci*. 2020. V. 53(7). P. 960–967.
46. *Kiryushin V.I., Dubachinskaya N.N., Yurova A.Yu.* Comprehensive Assessment of Agricultural Land by the Example of the Southern Urals // *Eurasian Soil Sci*. 2021. V. 54(11). P. 1721–1772.
47. *Knoblauch C., Beer C., Liebner S., Grigoriev M.N., Pfeiffer E.M.* Methane production as key to the greenhouse gas budget of thawing permafrost // *Nature Climate Change*. 2018. V. 8. P. 309–312
48. *Knoblauch C., Beer C., Sosnin A., Wagner D., Pfeiffer E.M.* Predicting long-term carbon mineralization and trace gas production from thawing permafrost of Northeast Siberia // *Global Change Biology*. 2013. V. 19(4). P. 1160–1172.
49. *Kudeyarov V.N.* Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation // *Eurasian Soil Sci*. 2019. V. 52(1). P. 94–104.
50. *Kudryashova S.Y., Baikov K.S., Titlyanova A.A., Dits L.Y., Kosykh N.P., Makhatkov I.D., Shibareva S.V.* Distributed GIS for estimation of soil carbon stock of West Siberia boreal zone // *Contemporary Problems of Ecology*. 2011. V. 4(5). P. 475–486.
51. LEAP Measuring and modelling soil carbon stocks and stock changes in livestock production systems: Guidelines for assessment (Version 1). Livestock Environmental Assessment and Performance (LEAP) Partnership. Rome: FAO. 2019. 170 p.
52. *Lefèvre C., Rekik F., Alcantara V., Wiese L.* Soil organic carbon: the hidden potential, Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). Rome: Italy, 2017. 90 p.
53. Lena Delta. Project Lena Delta. A base for Russian-German permafrost research in Siberia. 1998. URL:

- <https://www.awi.de/en/expedition/stations/island-samoylov.html?L=1> (дата обращения: 24.11.2021).
54. *Lodygin E.D., Beznosikov V.A., Vasilevich R.S.* Molecular composition of humic substances in tundra soils (¹³C-NMR spectroscopic study) // *Eurasian Soil Sci.* 2014. V. 47(5). P. 400–406.
55. *Mack M.C., Walker X.J., Johnstone J.F., Alexander H.D., Melvin A.M., Jean M., Miller S.N.* Carbon loss from boreal forest wildfires offset by increased dominance of deciduous trees // *Science.* 2021. V. 372(6539). P. 280–283.
56. *Mishra U., Hugelius G., Shelef E., Yang Y., Strauss J., Lupachev A., ... Orr A.* Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks // *Science Advances.* 2021. V. 7(9). 12 p.
57. *Munoz-Rojas M., Jordan A., Zavala L.M., De La Rosa D., Abd-Elmabod S.K., Anaya-Romero M.* Organic carbon stocks in Mediterranean soil types under different land uses (Southern Spain) // *Solid Earth.* 2012. V. 3(2). P. 375–386.
58. *Nadporozhskaya M.A., Chertov O.G., Bykhovets S.S., Shaw C.H., Maksimova E.Y., Abakumov E.V.* Recurring surface fires cause soil degradation of forest land: A simulation experiment with the EFIMOD model // *Land Degradation and Development.* 2018. V. 29(7). P. 2222–2232.
59. *Okoneshnikova M.* Current state and prediction of changes in soils of the middle Lena valley (Central Yakutia) // *Tomsk State University J. Biology.* 2013. V. 3(23). P. 7–18.
60. Pangea. Data Publisher for Earth & Environmental Science. 1995. URL: <https://www.pangaea.de/> (дата обращения: 02.12.2021).
61. *Polyakov V., Orlova K., Abakumov E.* Evaluation of carbon stocks in the soils of Lena River Delta on the basis of application of “dry combustion” and Tyurin’s methods of carbon determination // *Biological Communications.* 2017. V. 62(2). P. 67–72.
62. *Priputina I.V., Bykhovets S.S., Frolov P.V., Chertov O.G., Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Saprionov D.V., Mjakshina T.N.* Application of Mathematical Models ROMUL and Romul_Hum for Estimating CO₂ Emission and Dynamics of Organic Matter in Albic Luvisol under Deciduous Forest in the South of Moscow Oblast // *Eurasian Soil Sci.* 2020. V. 53(10). P. 1480–1491.
63. Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, 2019. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2019rf/index.html> (дата обращения: 24.11.2021).
64. Report of the 27th Session of the Committee on Agriculture (28 September – 2 October 2020). FAO. Italy: Rome. 27 p.
65. *Ryzhova I.M., Telesnina V.M., Sitnikova A.A.* Dynamics of Soil Properties and Carbon Stocks Structure in Post-agrogenic Ecosystems of Southern Taiga during Natural Reforestation // *Eurasian Soil Sci.* 2020. V. 53(2). P. 240–252.
66. *Schepaschenko D.G., Mukhortova L.V., Shvidenko A.Z., Vedrova E.F.* The pool of organic carbon in the soils of Russia // *Eurasian Soil Sci.* 2013. V. 46(2). P. 107–116.
67. *Schuur E.A.G., McGuire A.D., Schädel C., Grosse G., Harden J.W., Hayes D.J., Hugelius G., Koven C.D., Kuhry P., Lawrence D.M., Natali S.M., Olefeldt D., Romanovsky V.E., Schaefer K., Turetsky M.R., Treat C.C., Vonk J.E.* Climate change and the permafrost carbon feedback // *Nature.* 2015. V. 520(7546). P. 171–179.
68. *Shanin V.N., Bykhovets S.S., Chertov O.G., Komarov A.S.* The effect of various external factors on dynamics of organic carbon in different types of forest: A simulation-based assessment // *Russian Forest Sci.* 2018. V. 5. P. 335–346.
69. *Stolbovoy V.* Carbon in agricultural soils of Russia // *Soil Organic Carbon and Agriculture: Developing Indicators for Policy Analyses. Proceedings of an OECD expert meeting.* Ottawa, Paris, 2002. P. 301–306.
70. *Titlyanova A.A., Sambuu A.D.* Determinacy and synchronicity of fallow succession in the Tuva steppes // *Biology Bulletin.* 2014. V. 41. № 6. P. 545–553.
71. *Tsai W.H.* Carbon emission reduction-carbon tax, carbon trading, and carbon offset // *Energies.* 2020. V. 13. ID 22.
72. *Vanchikova V., Shamrikova V., Zaboeva A., Bobrova Y., Kyz'yurova E., Bespyatykh N., Grishchenko N.* Comparative assessment of the methods for exchangeable acidity measuring // *Eurasian Soil Sci.* 2016. V. 49. № 5. P. 512–518.
73. *Vasilevich R., Lodygin E., Beznosikov V., Abakumov E.* Molecular composition of raw peat and humic substances from permafrost peat soils of European North-east Russia as climate change markers // *Sci. Total Environ.* 2018. V. 615. P. 1229–1238.
74. *Wara M., Victor D.G.* A realistic policy on international carbon offsets // *Program on Energy and Sustainable Development Working Paper.* 2008. V. 74. P. 1–24.
75. WRB FAO. World reference base for soil resources 2014, update 2015. Italy: Rome. 203 p.
76. *Yu J., Mallory M.L.* Carbon price interaction between allocated permits and generated offsets // *Operational Research.* 2020. V. 20(2). P. 671–700.
77. *Zanella A., Ponge J.F., Gobat J.M., Juilleret J., Blouin M., Aubert M., Chertov O., Rubio J.L.* Humusica 1, article 1: Essential bases – Vocabulary // *Applied Soil Ecology.* 2018. V. 122. P. 10–21.
78. *Zavarzina A.G., Danchenko N.N., Demin V.V., Artemyeva Z.S., Kogut B.M.* Humic Substances: Hypotheses and Reality (a Review) // *Eurasian Soil Sci.* 2021. V. 54(12). P. 1826–1854.
79. *Zubrzycki S., Kutzbach L., Grosse G., Desyatkin A.* Organic carbon and total nitrogen stocks in soils of the Lena River Delta // *Biogeosciences.* 2013. V. 10(6). P. 3507–3524.
80. *Zubrzycki S., Kutzbach L., Pfeiffer E.M.* Permafrost-affected soils and their carbon pools with a focus on the Russian Arctic // *Solid Earth.* 2014. V. 5(2). P. 595–609.

Approaches and Methods for Studying the Soil Organic Matter in the Carbon Polygons of Russia (Review)

E. V. Abakumov¹, V. I. Polyakov^{1, *, **}, and S. N. Chukov¹

¹ *Saint-Petersburg State University, Saint-Petersburg, 199178 Russia*

**e-mail: slavon6985@gmail.com*

***e-mail: st049428@student.spbu.ru*

Development of carbon polygons for monitoring the emission and deposition of carbon compounds in terrestrial ecosystems is one of the priority tasks in the case of climate and biosphere conservation. Significant is the role of soils, which are not only the main source of greenhouse gas emissions into the Earth's atmosphere, but also a long-term reservoir that stores significant amounts of organic carbon in the form of soil humus. The article discusses the organization of monitoring of greenhouse gases at carbon polygon, the methods of sampling soil horizons and methodological approaches to determining the content and reserves of organic carbon in soils. The importance of information on the qualitative and quantitative composition of soil organic matter and humic substances, which is necessary for the operation of modern simulation models and calculation of carbon units for the economic assessment of the direct and reverse carbon footprint have been revealed. Russia faces a number of challenges related to carbon offset and a low-carbon economy. The necessary volumes of monitoring data, which must be obtained at carbon polygons for the use of the ROMUL and Efimod models are considered. The necessity for an adequate spatial coverage of the territory of Russia with a network of carbon polygons is emphasized. Particular attention should be paid to the arctic territories which is containing significant amounts of organic matter in permafrost state and can become precursors of the formation and emission of significant amounts of carbon dioxide and methane into the atmosphere.

Keywords: carbon polygons, sequestration of carbon, landscape degradation, GIS technologies, climate change