

УДК 631.4

DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32



Ссылки для цитирования:

Иванов А.Л., Савин И.Ю., Столбовой В.С., Духанин Ю.А., Козлов Д.Н., Баматов И.М. Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России // Бюллетень Почвенного института имени В.В. Докучаева. 2021. Вып. 107. С. 5-32. DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32

Cite this article as:

Ivanov A.L., Savin I.Yu., Stolbovoy V.S., Dukhanin Yu.A., Kozlov D.N., Bamatov I.M., Global climate and soil cover – implications for land use in Russia, Dokuchaev Soil Bulletin, 2021, V. 107, pp. 5-32, DOI: 10.19047/0136-1694-2021-107-5-32

Глобальный климат и почвенный покров – последствия для землепользования России¹

© 2021 г. А. Л. Иванов, И. Ю. Савин*, В. С. Столбовой,
Ю. А. Духанин**, Д. Н. Козлов, И. М. Баматов

ФИЦ “Почвенный институт им. В.В. Докучаева”, Россия,
119017, Москва, Пыжжевский пер, 7, стр. 2,

*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,

** e-mail: secretary@esoil.ru.

Поступила в редакцию 10.06.2021, принята к публикации 16.06.2021

Резюме: Обосновывается необходимость комплексного описания потоков парниковых газов на разных типах почв, методология создания “карбоновых полигонов” и “карбоновых ферм” с применением современных методов оценки потоков углерода в экосистемах с учетом специфики природных условий России и конкурентных преимуществ. Даны направления разработки национальных методик расчетов потоков углерода, которые подлежат верификации заинтересованными сторонами принятого Российской Федерацией Парижского соглашения. Рассматриваются вопросы, связанные с ролью и потенциалом

¹ По материалам выступления на “Экспертной сессии Президиума РАН по стратегии низкоуглеродного развития России” 27.03.2021. Портал “Научная Россия” <https://scientificrussia.ru/articles/ekspertnaya-sessiya-po-strategii-nizkouglerodnogo-razvitiya-rossii>.

почвенного покрова России в балансе углерода планеты, факторы снижения запасов углерода из верхнего метрового слоя почвы, конкурентные преимущества перед ЕС и западным миром в части природно-климатических изменений, использование возможностей дистанционного зондирования Земли из космоса в целях получения регулярных, полных и достоверных оценок поглощения парниковых газов.

Ключевые слова: глобальный климат, почвенный покров, национальная система учета баланса углерода.

Global climate and soil cover – implications for land use in Russia²

© 2021 A. L. Ivanov, I. Yu. Savin, V. S. Stolbovoy,
Yu. A. Dukhanin*, D. N. Kozlov, I. M. Bamatov

*Federal Research Centre “V.V. Dokuchaev Soil Science Institute”,
7 Bld. 2 Pyzhevskiy per., Moscow 119017, Russian Federation,
*<https://orcid.org/0000-0002-8739-5441>, e-mail: savin_iyu@esoil.ru,
**e-mail: secretary@esoil.ru.*

Received 10.06.2021, Accepted 16.06.2021

Abstract: The necessity of a comprehensive description of greenhouse gas fluxes on different types of soils, the methodology for creating “carbon polygons” and “carbon farms” with the use of modern methods for assessing carbon fluxes in ecosystems, taking into account the specifics of the natural conditions of Russia and competitive advantages, are substantiated. Directions for developing national methods for calculating carbon fluxes are given, which should be subjected to verification by the interested parties of the Paris Agreement adopted by the Russian Federation. Such issues are considered as the role and potential of the Russian soil cover in the carbon balance of the planet, factors of reducing carbon stocks from the upper 1 meter depth layer of the soil, competitive edge in the EU and the Western world in the questions of natural and climatic changes, the use of remote sensing of the Earth from space in order to obtain regular, complete and reliable estimates of the absorption of greenhouse gases.

² Proceedings of the “Expert Session of the Presidium of the RAS on Low-Carbon Development Strategy of Russia”. 27.03.2021. “Scientific Russia” portal: <https://scientificrussia.ru/articles/ekspertnaya-sessiya-po-strategii-nizkouglerodnogo-razvitiya-rossii>.

Keywords: global climate, soil cover, national carbon accounting system.

ВВЕДЕНИЕ

Современная Россия столкнулась с новыми вызовами: социальными, экономическими, природно-климатическими. Тенденции глобализации экономики, доминировавшие в последние десятилетия, обернулись глобальными проблемами и актуализировали изоляционные процессы. Пандемия COVID-19 явилась лишь спусковым механизмом, в “одночасье” обострившим назревшие проблемы глобализации, системный, финансовый и мировой кризисы природопользования.

Несмотря на смещение информационного акцента в 2020 г., проблемы, связанные с глобальным изменением климата, остаются серьезнейшим вызовом, в т. ч. и для аграрной отрасли. Проблема глобального климата, будучи первоначально некоей “хайповой” темой, приобретает осязаемые очертания и оказывает влияние на принятие управленческих и законодательных решений при беспрецедентном международном давлении на Россию, подписавшую ряд конвенций, договоров, соглашений и т. д.

Парижским соглашением предусмотрены разработка долгосрочной национальной стратегии “низкоуглеродного” развития и сокращение выбросов парниковых газов как минимум на 40% к 2030 г. (а в дальнейшем – и до 55% к 2050 г.) ([Lugato et al., 2020](#)): “Всем сторонам следует стремиться формулировать и сообщать долгосрочные стратегии развития с низким уровнем выбросов парниковых газов с учетом статьи 2, принимая во внимание свою общую, но дифференцированную ответственность и соответствующие возможности, в свете различных национальных условий” (ст. 4, п. 19). Однако следует учесть тот факт, что в упомянутом соглашении и его реализации применительно к сельскому хозяйству, в процессе которого основной целью является использование и получение оптимального количества органического вещества и биомассы, термин “низкоуглеродное развитие” требует уточнения. Речь должна идти в данном случае о низкоэмиссионном развитии, подразумевая под таковым снижение выбросов CO₂, CH₄ и N₂O в атмосферу в результате сельскохозяйственного производства за счет приемов, препятствующих необратимой минерализации и

способствующих поддержанию и оптимальному накоплению органического вещества в почве ([Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России”, 2018](#)).

Россия поддерживает инициативу “4 промилле” (4 на 1 000), суть которой – “компенсация выбросов парниковых газов и их поглощение почвами”, т. е. создание дополнительной почвенной органики и использование постградационных агротехнологий, сдерживающих минерализацию органического вещества, что отвечает понятию низкоуглеродного развития производства ([Иванов, Столбовой, 2019](#); [Ivanov et al., 2019](#); [Schlesinger, 1999](#)). Следовательно, важнейшим условием устойчивого развития сельхозпроизводства является сохранение и увеличение содержания углерода в почвах. С переходом к низкоэмиссионному земледелию, аккумулирующему углерод, и проградационным агротехнологиям связывают также перспективу регулирования баланса выбросов парниковых газов. Необходима Национальная система учета и мониторинга баланса содержания органического углерода в почвах (сельхозугодий) с учетом огромного разнообразия природной среды в нашей стране. Цель данной работы – анализ природно-территориальных особенностей и региональной специфичности объемов поглощения углекислого газа почвами Российской Федерации, определение значения роли России в глобальном балансе парниковых газов, возможности получения современной количественной оценки запасов органического углерода в метровом слое почв России с учетом огромного их разнообразия и уникальности эволюции современного почвообразования.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Российская система оценки антропогенных выбросов и поглощения парниковых газов и российский реестр углеродных единиц созданы еще в 2006 г. Функцию уполномоченного национального органа по системе оценки баланса органического углерода в почве выполняет Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет). Методология национальной отчетности для раздела, включающего почвенный фонд Российской Федерации, и требования по учету выбросов и поглощения разными типами почв парниковых газов изложены в

Национальном докладе “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” (2018).

Педогенно-регулируемые потоки и запасы почвенного органического вещества (углерода) в газообразной, жидкой и твердой фазах на территории России имеют глобальное значение. Вместе с тем почвы нашей страны остаются недостаточно продемонстрированными в глобальных коллекциях почвенных данных. Недостаток национальных почвенных данных на международном уровне приводит к тому, что оценка резервов почвенного органического углерода нашей страны в глобальных проектах выполняется на основе усредненных показателей содержания почвенного органического углерода и доли России в почвенном фонде Мира. Такой подход к оценке искажает значения действительных запасов почвенного органического углерода в России. Сложившаяся ситуация не может быть исправлена международными проектами, к примеру, такими как ISRIC ([Sanderman et al., 2017](#)), GlobalSoilMap ([Savin, Stolbovoy, 2014](#)), FAO ([Harmonized World Soil Database, 2012](#)), Grid и т. д.

С другой стороны, в основе оценки запасов углерода в почвах лежит обобщение разнокачественных национальных данных, объединение которых в глобальные коллекции связано с большими ошибками. Так, например, изменение содержания гумуса в пределах почвенных единиц второго уровня FAO достигает ~ 200 %. При этом следует отметить, что доступ к отечественным почвенным данным на международном уровне остается ограниченным в силу языковых, научно-технических и ряда других причин.

За основу в методологической части данной статьи были взяты методики В.С. Столбового ([Национальный доклад “Глобальный климат...”](#), 2018). Расчеты углеродного баланса, согласно автору, проводились по методикам, принятым международными сообществами, которые обеспечивают сопоставимость результатов с данными других стран и глобальных проектов.

Использовались взвешенные по площадям средние значения углерода на уровне отделов почв (www.iea.org/ipcc/invsl). Этот

почвенно-таксонометрический уровень согласуется с главными особенностями цикла органических веществ наземных экосистем России ([Тюрин, 1965](#)). Определение запасов почвенного органического вещества (углерода) проводили с учетом показателей плотности почвы, получение которых, однако, сопряжено с некоторыми трудностями, связанными с отбором проб с ненарушенным строением почвы. На практике распространено определение содержания почвенного органического углерода в % или в мгС на 1 кг почвы.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Преобладание холодного гумидного климата в Российской Федерации обеспечило повышенные запасы органического углерода в почвах. Этот показатель почти в два раза выше, чем в странах ЕС, США, Австралии и др. Многолетние наблюдения показывают, что почвы Российской Федерации содержат в 6 раз больше углерода, чем растительность, и можно констатировать, что учет роли почв в регулировании и улучшении баланса углерода страны оправдан и целесообразен. Суммарный выброс в России двуокиси углерода или CO_2 -эквивалентов оценивается в 2 500 млн т, что в пересчете на углерод составляет порядка 681 млн т углерода. Резерв же секвестрации в почвах РФ около 3.67 млрд т углерода³ или более 13 млрд CO_2 -экв, что составляет более 19 суммарных годовых выбросов парниковых газов.

В действительности почвенный фонд Российской Федерации составляет около 12% почвенного фонда всего земного шара, но верхние горизонты почв аккумулируют не менее 23% глобальных запасов почвенно-органического вещества. В таблице 1 приведены расчетные данные концентрации почвенного органического вещества в верхнем слое (0–30 см) основных типов почв России, где наибольшая (20.9 кгС/м²) и наименьшая (1.7 кгС/м²) концентрации секвестрированного углерода были отмечены в органо-генных и малогумусовых аккумулятивно-карбонатных почвах соответственно.

³ ГтС – гигатонна ($1 \cdot 10^9$) – миллиард тонн углерода.

Таблица 1. Взвешенная по площади средняя концентрация (кгС/м²) органического углерода по слоям (м) нативных почв России
Table 1. Area-weighted average concentrations (kgC/m²) of organic carbon in different layers (m) of native Russian soils

Типы почвообразования	Органический (м)		
	0–0.3	0–1.0	0–2.0
Органогенные	20.9	81.3	134.1
Глееземы	17.6	23.1	24.1
Метаморфические	12.2	15.2	15.7
Гумусово-аккумулятивные	11.7	20.2	22.4
Дерновые органо-аккумулятивные	10.3	13.9	15.1
Вулканические	7.0	18.2	22.3
Текстурно-дифференцированные	7.0	10.8	11.9
Литоземы	6.8	Не определено	Не определено
Al-Fe-гумусовые	6.7	9.7	10.0
Аллювиальные	6.2	14.1	18.0
Галоморфные	5.0	9.0	10.4
Щелочные глинисто-дифференцированные	4.8	7.3	8.2
Криоземы	4.6	Не определено	Не определено
Маломощные слаборазвитые	3.1	Не определено	Не определено
Малогумусовые аккумулятивно-карбонатные	1.7	2.6	2.9

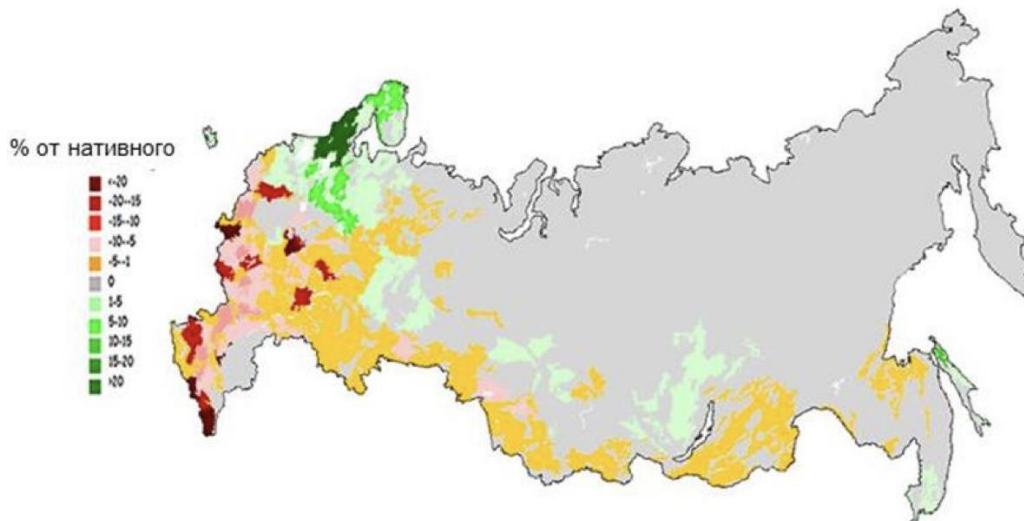


Рис. 1. Снижение запасов углерода в сельскохозяйственных почвах РФ. Желто-красными спектрами выделены районы снижения содержания почвенного органического углерода. Зеленым цветом показаны регионы повышения концентрации почвенного углерода. Серым тоном продемонстрированы регионы, не включенные в анализ ([Stolbovoi, McCallum, 2002](#)).

Fig. 1. Reduction of carbon stocks in agricultural soils of the Russian Federation. Yellow and red spectra highlight the regions of decreasing soil organic carbon content. Green color shows the regions with increased soil carbon concentration. The regions not included in the analysis are shown in gray ([Stolbovoi, McCallum, 2002](#)).

Факторами снижения запасов углерода в почве выступают технологии возделывания культур (85%) и эрозия (15%).

Основываясь на результатах анализа цифровой базы почвенных данных России, включая применение современных информационных технологий и оригинальных моделей ([Крылатов и др., 1998](#)), известно, что почвы пашни потеряли около 3.6 млрд тонн углерода из верхнего метрового слоя, и возвращение этого углерода в почву является условно-максимальным потенциалом инициативы “4 промилле” для Российской Федерации (табл. 2).

Таблица 2. Содержание органического углерода (ГтС) по слоям почв сельхозугодий

Table 2. The content of organic carbon (GtC) in different layers of agricultural soils

Использование	0–0.3 м				0–1.0 м			
	нативные	используемые	потеря	% от нативных	нативные	используемые	потеря	% от нативных
Пашня	13.47	10.84	2.63	20	22.60	19.02	3.58	16
Пастбища	6.37	5.92	0.45	7	10.02	8.92	1.10	11
Всего	19.84	16.75	3.09	16	32.61	27.94	4.68	14

На основании этих данных можно сделать вывод о том, что сельскохозяйственные почвы (пашня) потеряли около 16% запасов гумуса. Для сравнения: в западных странах этот же показатель достигает 50% и более ([Столбовой, 2018](#)).

Необходимо учитывать и другие конкурентные преимущества России в рассматриваемом аспекте, в частности изменения природно-климатических условий потенциального развития сельскохозяйственного производства и социума Нечерноземья. Так по прогнозам, сценариям Межправительственной группы экспертов по изменению климата (МГЭИК), изменение продолжительности

волн холода и тепла становятся контрастными и усиливаются на всей территории Российской Федерации, включая Нечерноземье. При этом длительность волн холода сократится, а волн тепла – существенно увеличится. За 30–40 лет изменились в Нечерноземье и базовые показатели, которые считались “неизменяемыми”, такие как сумма эффективных температур ($>10\text{ }^{\circ}\text{C}$) и гидротермический коэффициент увлажнения Селянинова (ГТК). Они явно становятся более благоприятными. При этом на севере потепление более ярко выражено, чем на северо-востоке, особенный артефакт – Вологодская область ($\Sigma t^{\circ} > 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ увеличилась на $380\text{ }^{\circ}\text{C}$, ГТК, соответственно, также улучшился ([“Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года”](#), 2021).

В аридных регионах ситуация сложнее, так многолетний мониторинг пастбищ северного Прикаспия показывает, что перевыпас привел к дигрессии степных фитоценозов и развитию дефляционных процессов на площади 1.3 млн га, из которых 0.4 млн га превратились в развеваемые ветром пески. Опустыниванием охвачена половина Сальских степей (Ростовская область), около 37 % территории Кулундинских степей в Алтайском крае, до 15 % равнинных территорий Республики Тыва. К настоящему времени достоверно известно, что значительная равнинная часть Дагестана и часть территории Калмыкии представляет собой наиболее крупные очаги антропогенного опустынивания в Европе.

В Астраханской, Волгоградской, Саратовской, Самарской областях и в Республике Татарстан деградационные аридные земли занимают около 50 % их общей территории. Особым аспектом данной проблемы являются засухи, частота которых усиливается, а последствия ужесточаются. Судя по динамике “зеркала” грунтовой воды в Докучаевском колодце № 1, в Каменной степи, текущее состояние можно отнести к очередному катаклизму (рис. 2).

Такое падение, которое зарегистрировано в 2020 г., было отмечено накануне страшнейших засух в 30-х, в начале 40-х, в начале 50-х, и 2009–2020 гг.

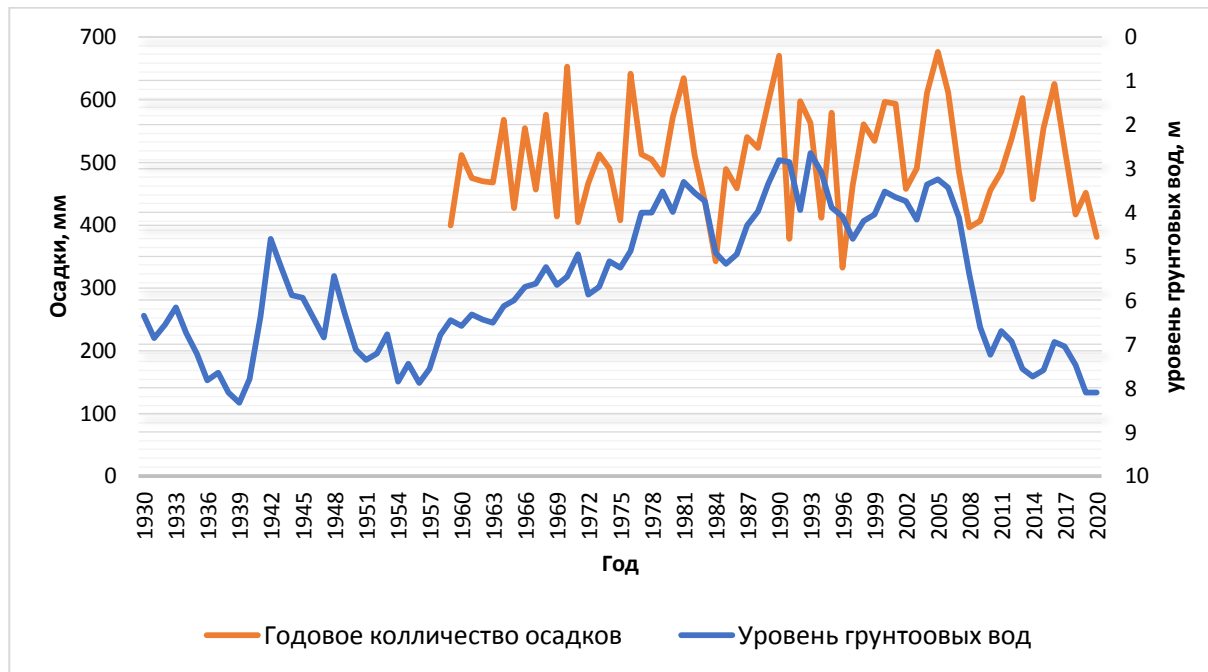


Рис. 2. Уровень воды в колодце № 1, Каменная степь.

Fig. 2. Water level in the well No. 1, Kamennaya steppe.

Также важно отметить и неудовлетворительное состояние озимых (более 40 % площади сева), а пересев 4–5 млн га еще никогда не приводил к увеличению сборов зерна ([Министерство сельского хозяйства РФ, 2020](#)).

В связи с этим, несмотря на некоторые иллюзорные благоприятные оценки, подчеркнем, что ресурсный потенциал земель для устойчивого производства продукции остается прежним (11.5 %) и расположен ниже 60-й параллели, начиная с зоны южной тайги. Кроме того, долговременная позитивная тенденция нивелируется возросшей нервозностью климата – повышением погодных рисков и снижением устойчивости сельскохозяйственного производства. Нужно отметить, однако, что уникальная географическая протяженность страны определяет устойчивость АПК России к погодно-климатическим рискам и именно эта территория (130 млн га) будет контролировать продовольственную безопасность Российской Федерации в ближайшей перспективе.

Контроль продовольственной безопасности страны очень важен в силу того, что диктат со стороны ЕС и др. стран в отношении России, подписавшей ряд конвенций, протоколов, ужесточился. Обсуждался, в частности, вопрос о создании “Киото-плантаций”, с выделением 1.5 млрд рублей, на сомкнутых лесных землях сельхозназначения. Запуск такого рода проектов недопустим, поскольку представляет собой прямую угрозу продовольственной безопасности страны.

По линии работы межведомственного экспертного совета “Глобальный климат и рациональное природопользование” (сельское и лесное хозяйство) Межведомственной рабочей группой при администрации Президента Российской Федерации по вопросам, связанным с изменением климата и обеспечением устойчивого развития, подготовлена серия Национальных докладов “Глобальный климат и почвенный покров России”, посвященных:

- оценке рисков, системам и технологиям адаптации ([Национальный доклад “Глобальный климат...”, 2018](#));
- опустыниванию и деградации земель, инфраструктурным, институциональным, технологическим мерам адаптации ([Национальный доклад “Глобальный климат...”, 2019](#));

- засухам в России ([Национальный доклад “Глобальный климат...”, 2021](#)).

Кроме того, Комитетом Совета Федерации по агропродовольственной политике и природопользованию одобрены “Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий Нечерноземной зоны Российской Федерации до 2030 года” (2021).

Такие документы являются базовыми для экономики, они уже отвечают на многие вопросы и, более того, дают возможность успешно их решать. Вместе с тем для реализации программных документов необходимо разработать и принять ряд поддерживающих нормативных правовых документов.

В первую очередь следует завершить работу по оформлению перечня индикаторов в части оценки деградации почв и земель, законодательному утверждению ряда определений, которыми пользуются в отчетах Правительства Российской Федерации, а также индикаторов целей устойчивого развития, гармонизированных с международными базами данных. Безусловной поддержки заслуживает инициатива Минобрнауки России и других ведомств по созданию сети “карбоновых полигонов” (приказ Минобрнауки России от 05.02.2021 № 74 “О полигонах для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса”). Необходимо разработать методики закладки и ведения наблюдений за продуктивностью экосистем на таких участках.

“Карбоновый полигон” представляет собой специально оборудованный участок местности, используемый для разработки и испытаний технологий дистанционного и наземного контроля эмиссии парниковых газов и других значимых для изменения климата параметров, а также для проведения исследований по изучению источников и поглотителей парниковых газов с целью разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса.

“Карбоновая ферма” – это структурное подразделение, где на практике применяются новые методы контроля углекислого газа, разрабатываются высокоэффективные технологии поглощения парниковых газов для создания экосистемы с внедрением этих технологий. Это должны быть высокопродуктивные агроэко-

стемы с регулируемым балансом углерода в почве, использующие современные инструменты биотехнологии, повышающие эффективность фотосинтеза и использования запасов минерального питания (из почвы и удобрений (минеральных, органических, биоудобрений и др.)) и депонирующие углерод в почве, пожнивных и корневых остатках.

Ферма будет считаться “успешной” в том случае, если прирост углерода в почве в результате новационного управления растительными и земельными ресурсами будет превышать его потери.

На сегодняшний день объем мировой торговли карбоновыми фьючерсами уже достиг более 100 млрд долларов, однако в течение следующего десятилетия ожидается его многократный рост, что сделает карбоновую отрасль одной из ведущих в глобальной экономике.

Для достоверного расчета углеродного баланса (антропогенного и природного) система национального мониторинга углерода должна включать стационарные подспутниковые наземные исследования, в том числе и почвенное опробование с опытными площадями для интенсивного и экстенсивного мониторинга динамики потоков углерода. Согласно недавнему отчету Европейской комиссии, все наземные системы должны иметь широкую полосу охвата и высокую частоту сканирования ([Национальный доклад “Глобальный климат...”](#), 2019). Также нужно учитывать какой объем парниковых газов выделяют различные биотопы в зависимости от видового состава и структуры растительных и животных сообществ, погодных условий, состава почв и множества других факторов.

В 2020 г. в границах Национального парка “Угра” Калужской области был создан прототип первого в стране карбонового полигона для разработки и испытаний технологий контроля эмиссии парниковых газов. В феврале 2021 г. Минобрнауки России запустило пилотный проект по созданию на территории регионов России карбоновых полигонов для разработки и испытаний технологий контроля углеродного баланса (https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077).

Предполагается, что карбоновые полигоны будут проводить разработку и адаптацию технологий дистанционного учета надземной и подземной фитомассы, ризосферы, агрохимического контроля почв и респирации парниковых газов, разработку и адаптацию математических моделей для первичной валовой продуктивности, первичной нетто-продуктивности, нетто-обмена CO₂ между экосистемой и атмосферой, респирации и для других параметров углеродного баланса экосистем на эталонных участках.

В 2021 г. углеродные полигоны будут созданы в Чеченской Республике, Краснодарском крае, Калининградской, Новосибирской, Свердловской, Тюменской и Сахалинской областях.

По мнению Министра науки и высшего образования Российской Федерации – В.Н. Фалькова, необходимо иметь не менее 80 карбоновых полигонов для создания российской системы мониторинга поглощения углерода.

Однако для внедрения технологий “улавливания” углерода необходима разработка Единой методики, которая была бы признана мировым сообществом, а также Национальная система учета выбросов парниковых газов экосистемами. В Минобрнауки России подчеркивают важность и значимость разработки отечественной методики расчетов потоков диоксида углерода для исполнения Парижского соглашения.

Между тем необходимо отметить, что прецедент создания общепринятой методики оценки поглощения углерода уже есть (карбоновые полигоны в Италии), и что основное участие в его подготовке принимали российские почвоведы и географы. Приведем в качестве иллюстрации электронное письмо, направленное фермерами Европейского Союза в Европейское почвенное бюро. Необходимо учитывать, что фермеры серьезно воспринимают проблемы изменения климата, хотят участвовать в программах снижения концентрации парниковых газов и получать дополнительный бенефит от продажи углеродных квот ([Торговля выбросами парниковых газов..., 2017](#)). Кроме того, климатологи, при участии российских почвоведов, разработали модели учета углерода в почвах.

Эти подходы используют статистические методы, но статистически достоверное определение небольших изменений в со-

держании гумуса при огромных его запасах в почвах требует за-
 предельно больших объемов проб ([IPCC, Guidelines..., 2006](#)).

Ниже приведены базовые модели международного сообще-
 ства (IPCC) определения углерода в почвах.

1. Содержание углерода (кгС/м²; тС/га) в слое почвы

$$SCD_{site} = \sum_{layer=1}^{layer=j} (SOC_{content} * BulkDensity * Depth * (1 - frag))_{layer}$$

2. Запасы углерода (кгС; тС) в слое почвы участка

$$SOC_{refstock} = \left(\sum_{site=1}^{site=m} SCD / m \right) * A_{plot}$$

3. Изменение запасов (кгС; тС) в слое почвы участка

$$\Delta SOC_{stock} = SOC_{refstock} - SOC_{curstock} - f_{org} - f_{lim}$$

Стандартная методика, рекомендованная международным сообществом для оценки запасов углерода в почвах, в адаптированном виде должна применяться и в России. Важно, чтобы методика обеспечивала сопоставимость результатов учета парниковых газов между странами. На сегодняшний день учеными уже создана и предлагается принципиально новая основа землепользования, которая развивается в теорию и практику проектирования сельскохозяйственных ландшафтов, причем не только агроландшафтов, но и водохозяйственных, мелиоративных, рекреационных, животноводческих, агропромышленных, селитебных и других отраслей. Однако необходимо учитывать и тот факт, что ни в России, ни в международной практике нет согласованной и утвержденной нормативной правовой базы и методологии использования данных дистанционного зондирования для учета, контроля и применения правомочных управленческих решений. Без этого все рекомендации, в основу которых положены данные дистанционного зондирования Земли, нелегитимны, даже если и верны. Более того, на такой информации часто строится государственная и ведомственная страховая, кредитная и субсидиарная политика. Хотя для конкретных аналитических оценок нужна конкретная спутни-

ковая конфигурация, регламентирование числа залетов и предоставление информации.

Использование данных дистанционного зондирования (ДДЗ) для количественной оценки углеродного баланса – очень сложный, но хорошо известный процесс. Метод объединяет подробную информацию о земном покрове с наземными наблюдениями почвенного кадастра ([Sanga-Ngoie et al., 2012](#)). Методы учета секвестрирования углерода в почве можно провести с использованием отечественных или зарубежных ДДЗ (спутников). К примеру, одним из популярных продуктов для косвенного измерения органического углерода в почве является спектрорадиометр среднего разрешения (MODIS), который позволяет получить снимки с хорошим временным разрешением ([Turner et al., 2006](#)). Однако в зависимости от потребности использование системы MODIS может быть неудовлетворительным, поскольку пространственное разрешение 1 км на 1 км слишком “грубое”, особенно для учета секвестрации углерода в региональном масштабе, и, соответственно, пространственное разрешение в 1 км не может точно определить реальную местную среду. В региональном масштабе для анализа обычно используются изображения с высоким разрешением, такие как Landsat (Operational Land Imager – OLI), которые применяют для оценки точных значений содержания органического углерода и выделения деталей в типах почвенного покрова ([USGS, Landsat Science Products](#)). Landsat, по сравнению с MODIS, обеспечивает гораздо более высокое пространственное разрешение (30 м), что позволяет определить неоднородность природной среды, однако это влечет за собой фундаментальную проблему использования оптических изображений из-за облачного покрова ([Wang et al., 2015](#)). Изображения с высоким пространственным разрешением имеют более низкое временное разрешение, и иногда бывает трудно собрать ДДЗ без облачности с помощью всего нескольких наблюдений. Если сравнивать отечественный продукт (спутник Канопус-В) с зарубежными аналогами (Landsat, MODIS) для учета секвестрации углерода, то можно получить сопоставимые оценки соответствия базовых продуктов ([Васильев и др., 2018](#)). Использование отечественных или зарубежных спутниковых систем (методов) для Национальной системы учета секвестрации органического

го углерода имеет свои положительные и отрицательные стороны. При использовании отечественных спутников существует недоверие к полученным данным со стороны ЕС и США, при использовании зарубежных – есть риски недоучета реальной оценки углеродного показателя. В таблице 3 приведено краткое описание платформ дистанционного зондирования для мониторинга органического углерода в почве с точки зрения преимуществ и недостатков.

Главный недостаток использования спутника для учета секвестрации углерода состоит в том, что оценки ограничены для нескольких “первых” сантиметров верхнего слоя почвы, хотя информация о нижних слоях также имеет решающее значение для полного учета органического вещества ([Тюрин, 1965](#)). Эффективность беспилотного летательного аппарата (БПЛА) ограничена продолжительностью полета и грузоподъемностью, следовательно, спектральный диапазон устанавливаемых датчиков также ограничен, так как коротковолновые и инфракрасные датчики довольно тяжелые ([Theodora et al., 2019](#); [Iizuka, Tateishi, 2015](#)). Определение наиболее важных длин волн для оценки органического углерода в почве может привести к использованию гиперспектральных датчиков небольшого размера, которые можно использовать для конкретных приложений. Также существует необходимость интеграции ДДЗ, полученных портативными спектрометрами на месте, чтобы разработать целостный подход, способный преодолеть вышеупомянутые препятствия.

В Федеральном исследовательском центре “Почвенный институт им. В.В. Докучаева” создан Ситуационный аналитический центр “Почвенные и земельные ресурсы России”, позволяющий обобщать и актуализировать информацию о состоянии почв и земель Российской Федерации с использованием спутниковой группировки (табл. 4), который вполне возможно использовать при наличии соответствующей нормативно-правовой базы в целях получения регулярных, полных и достоверных оценок поглощения парниковых газов и принятия управленческих и прикладных решений.

Таблица 3. Суммарное описание различных платформ ДДЗ для мониторинга органического углерода в почве
Table 3. Overview of different remote sensing data platforms for soil organic carbon monitoring

Платформа	Преимущества	Недостатки
Спутники	<ul style="list-style-type: none"> • Получение информации о верхнем слое почвы с больших площадей • Предоставление информации для сложно-доступных областей • Последовательно-временное разрешение для создания временных циклов • Короткое время для повторного учета 	<ul style="list-style-type: none"> • Атмосферные поглощения, мешающие спектральным измерениям • Низкое соотношение сигнал/шум из-за короткого времени интегрирования по целевой области • Необходимость геометрических и атмосферных корреляций
Гиперспектральная съемка с воздуха	<ul style="list-style-type: none"> • Предоставление информации для трудно-доступных районов • Мало инструментов для обработки изображений, однако они становятся все более доступными в диапазоне 1 000–2 500 нм • Высокое пространственное разрешение 	<ul style="list-style-type: none"> • Предоставление информации для трудно-доступных районов • Необходимость определенных метеорологических условий для приложений дистанционного зондирования • Ограничение измерений только в тонком слое верхнего слоя почвы • Юридические ограничения для полетов • Высокая операционная сложность • Высокая цена
Беспилотные воздушные системы	<ul style="list-style-type: none"> • План полета может быть составлен в соответствии с погодными условиями • Высокое пространственное разрешение 	<ul style="list-style-type: none"> • Ограниченная продолжительность полета • Необходимость атмосферных и геометрических поправок • Юридические ограничения для полетов

Таблица 4. Потребность в спутниковых данных для функционирования Ситуационного аналитического центра “Почвенные и земельные ресурсы России”

Table 4. Demand for satellite data required by the Situational Analytical Center “Soil and Land Resources of Russia”

Тип данных	Пространственное разрешение	Временное разрешение	Территория съемки	Подходящие сенсоры и платформы на 2021 г.
Видимые – ИК	1–5 км	15 мин – 1 час	Глобально, вся территория страны	MSG3-4 (ESA), Электро-Л, (Роскосмос, Росгидромет, НПО “Планета”)
Гравитационное поле	1 градус	1 месяц	Глобально, вся территория страны	GRACE (NASA, DLR)
Микроволновые	1–25 км	1 день	Глобально, вся территория страны	SMOS, Sentinel-1, SAR, SMAR

Продолжение **таблицы 4**
Table 4 continued

Мультиспектральные	250 м	1 день	Глобально, вся территория страны	MODIS
Мультиспектральные	10–30 м	5–15 дней	Вся территория страны	Landsat, Sentinel-2
Гиперспектральные	10–30 м	5–15 дней	Отдельные участки	Zhuhai-1, PRISMA, Gaofen-5, Ресурс-П (НЦ ОМЗ “РКС”)
Мультиспектральные, панхроматические	0.3–2 м	По запросу (2–3 раза в год)	Отдельные участки	WorldView-3, WorldView-2, Ресурс-П (Роскосмос), поставка “Совзond”, “Сканекс”

В развиваемых сегодня и эффективно реализуемых проектах ландшафтного земледелия агротехнологическая дифференциация корректируется с учетом тепло- и влагообеспеченности культур, крутизны и экспозиции склонов, гидрогеологических, микро- и мезоклиматических параметров и других условий. Иначе говоря, новые агротехнологии и системы земледелия уже соотнесены с новейшими представлениями о глобальных изменениях климата и с развитием смежных фундаментальных и прикладных наук.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Принимая во внимание, что почвы Российской Федерации содержат в 6 раз больше углерода, чем растительность, учет вклада почв как базового компонента (статьи) баланса углерода страны оправдан, целесообразен и требует скорейшего количественного описания.

В целях ускорения разработки доказательной базы в российской системе мониторинга поглощения углерода и принятия мировым сообществом отечественных методик расчета поглощения диоксида углерода необходимо сконцентрировать усилия на следующих направлениях:

- расширить участие ведущих Федеральных научно-исследовательских и научно-образовательных центров в разработке методологии, организации и проведении работ на “карбоновых полигонах” и “карбоновых фермах” для количественного определения потоков углерода в экосистемах;
- создать единую Национальную методику расчетов потоков диоксида углерода на землях сельскохозяйственного назначения с учетом типов почв, категорий земель сельхозназначения, агроэкологической оценки культур, направлений хозяйственной деятельности для разных почвенно-климатических зон страны, согласованную с мировой нормативно-правовой практикой;
- создать нормативную правовую базу использования возможностей дистанционного зондирования Земли в целях получения регулярных, полных и достоверных оценок поглощения парниковых газов и принятия управленческих и прикладных

решений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Васильев А.И. и др.* Методика сопоставления базовых продуктов МСС КА “Канопус-В” и OLI/ETM+ Landsat // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 4. С. 36–48.
2. *Иванов А.Л., Столбовой В.С.* Инициатив “4 промилле” – новый глобальный вызов для почв России // Бюллетень Почвенного института им. В.В. Докучаева. 2019. Вып. 98. С. 185–202. DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).
3. Карбоновые полигоны. Министерство науки и высшего образования Российской Федерации. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077.
4. *Крылатов А.К. и др.* Динамика баланса гумуса на пахотных землях Российской Федерации. М.: Госкомзем России, 1998. 60 с.
5. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: оценка рисков и эколого-экономических последствий деградации земель. Адаптивные системы и технологии рационального природопользования (сельское и лесное хозяйство)” / под ред. *А. И. Бедрицко*. М.: Почвенный ин-т им. В.В. Докучаева, ГЕОС. 2018. 357 с.
6. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: опустынивание и деградация земель, институциональные, инфраструктурные, технологические меры адаптации (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. *Р.С.-Х. Эдельгериева*. Т. 2. М.: Изд-во МБА, 2019. 476 с.
7. Национальный доклад “Глобальный климат и почвенный покров России: проявления засухи, меры предупреждения, борьбы, ликвидация последствий и адаптационные мероприятия (сельское и лесное хозяйство)” / Под ред. *Р.С.-Х. Эдельгериева*. Т. 3. М.: Изд-во МБА, 2021. 820 с.
8. Посевная площадь озимых культур в 2020 году составит порядка 19 млн га. Министерство сельского хозяйства РФ. URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/posevnaya-ploshchad-ozimyx-kultur-v-2020-godu-sostavit-poryadka-19-mln-ga/>.
9. “Рекомендации по развитию агропромышленного комплекса и сельских территорий в Нечерноземной зоне России до 2030 года”. Версия 2.0. М: ООО “Издательство МБА”, 2021, 400 с.

10. Седьмое национальное сообщение Российской Федерации, представленное в соответствии со статьями 4 и 12 Рамочной Конвенции Организации Объединенных Наций об изменении климата и статьей 7 Киотского протокола. М.: 2017. 348 с. URL: https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/application/pdf/20394615_russian_federation-nc7-1-7nc.pdf.
11. *Столбовой В.С.* Углерод пахотных почв России в стратегии смягчения изменений климата // Современные тенденции в научном обеспечении АПК Верхневолжского региона. 2018. С. 356–363.
12. Торговля выбросами парниковых газов по всему миру: Ежегодный отчет 2017. Берлин: ICAP. URL: https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_attach&task=download&id=444.
13. *Тюрин И.В.* Органическое вещество почв и его роль в плодородии почв. М.: Наука, 1965. 319 с.
14. *Филипчук А.Н., Малышева Н.В., Мусеев Б.Н., Страхов В.В.* Аналитический обзор методик учета выбросов и поглощения лесами парниковых газов из атмосферы // Лесохоз. информ.: электрон. сетевой журн. 2016. № 3. С. 36–85. URL: <http://lhi.vniilm.ru/>.
15. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC. Harmonized World Soil Database (version 1.2). FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria. 2012.
16. *Iizuka K., Tateishi R.* Estimation of CO₂ Sequestration by the Forests in Japan by Discriminating Precise Tree Age Category using Remote Sensing Techniques // Remote Sensing. 2015. Vol. 7. Iss. 11. 15082-15113. DOI: [10.3390/rs71115082](https://doi.org/10.3390/rs71115082).
17. *Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink GBM, Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A. et al.* Soil Grids 250 m: Global gridded soil information based on machine learning // PLoS ONE. 2017. Vol. 12. Iss. 2. e0169748. DOI: [10.1371/journal.pone.0169748](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748).
18. IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use. Geneva. 2006. URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
19. *Ivanov A., Stolbovoy V., Petrosian R.* The Initiative of 4 % in perspective from Russia, In: Food security and climate change: 4 per 1000 initiative new tangible global challenges for the soil. Poitiers (France). 2019. 46 p. URL: <https://symposium.inra.fr/4p1000>.
20. *Lugato E., Ctscatti A., Jones A., Ceccherini G., Duveiller G.* Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops // Environmental Research Letters. 2020. Vol. 15. No. 9. 094075. DOI: [10.1088/1748-9326/aba137](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba137).

21. *Nelson D.W., Sommers L.E.* Total carbon, organic carbon and organic matter, In: Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and Microbiological Properties. 1982. P. 539–579.
22. *Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M.* Full Carbon Account for Russia. Interim Report. IR-00–021. International Institute for Applied Systems Analysis. Laxenburg. Austria. 2000. 180 p.
23. *Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J.* Soil carbon debt of 12,000 years of human land use // PNAS. 2017. Vol. 114 (36). 9575–580. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.
24. *Sanga-Ngoie K., Iizuka K., Kobayashi S.* Estimating CO₂ sequestration by forests in Oita Prefecture, Japan, by combining Landsat ETM+ and ALOS satellite remote sensing data // Remote Sensing. 2012. Vol. 4. Iss. 11. P. 3544–3570. DOI: [10.3390/rs4113544](https://doi.org/10.3390/rs4113544).
25. *Savin I., Stolbovoy V.* Soils of Russia – GlobalSoilMap Perspective. Proc. GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proc. of the 1st GlobalSoilMap Conference. 2014. P. 47–50.
26. *Schlesinger W.* Carbon Sequestration in Soils // Science. 1999. Vol. 284. Iss. 5423. P. 137.
27. *Stolbovoi V.I., McCallum I.* Land Resources of Russia. Laxenburg. IIASA, RAS. 2002. URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/lcov_des.htm.
28. *Theodora A., Nikolas T., Athanasios B.* Remote Sensing Techniques for soil Organic Carbon Estimation: A Review // Remote Sensing. 2019. Vol. 11. Iss. 6. 676. DOI: [10.3390/rs11060676](https://doi.org/10.3390/rs11060676).
29. *Turner D.P., Ritts W.D., Cohen W.B., Gower S.T., Running, S.W., Zhao M., Costa M.H., Kirschbaum A.A., Ham J.M., Saleska S.R. et al.* Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes // Remote Sens. Environ. 2006. Vol. 102. P. 282–292.
30. USGS. Landsat Science Products. URL: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-science-products?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con.
31. *Wang J., Li C.* Adaptively weighted decision fusion in 30 m land-cover mapping with Landsat and MODIS data // International Journal of Remote Sensing. 2015. Vol. 36. Iss. 14. P. 3659–3674.

REFERENCES

1. *Vasil'ev A.I. et al.*, Metodika sopolovneniya bazovykh produktov MSS KA “Kanopus-V” i OLI/ETM+ Landsat (Comparison of the basic products of the MSS of the Kanopus-V and OLI/ETM+ Landsat), *Sovremennyye problemy*

distantсионного зондирования Земли из космоса, 2018, Vol. 15, No. 4, pp. 36–48.

2. Ivanov A.L., Stolbovoy V.S., The Initiative “4 per 1000” – a new global challenge for the soils of Russia, *Dokuchaev Soil Bulletin*, 2019, Vol. 98, pp. 185–202, DOI: [10.19047/0136-1694-2019-98-185-202](https://doi.org/10.19047/0136-1694-2019-98-185-202).

3. Carbon polygons. Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. URL: https://minobrnauki.gov.ru/action/poligony/index.php?sphrase_id=108077.

4. Krylatov A.K. et al., *Dinamika balansa gumusa na pakhotnykh zemlyakh Rossiiskoi Federatsii* (Dynamics of the balance of humus on arable lands of the Russian Federation), Moscow: Goskomzem Rossii, 1998, 60 p.

5. *National report* “Global climate and soil cover in Russia: assessment of risks and ecological and economic consequences of land degradation. Adaptive systems and technologies for rational use of natural resources (agriculture and forestry)”, A.I. Bedritsky (ED.). Moscow: Pochvennyi in-t im. V.V. Dokuchaeva, GEOS, 2018, 357 p.

6. *National report* “Global climate and soil cover in Russia: desertification and land degradation, institutional, infrastructural, technological adaptation measures (agriculture and forestry)”, R.S.-H. Edelgeriev, Vol. 2, Moscow: Izd-vo MBA, 2019, 476 p.

7. *National report* “Global climate and soil cover of Russia: manifestations of drought, preventive measures, control, elimination of consequences and adaptation measures (agriculture and forestry)”, R.S.-H. Edelgeriev (Ed.), Vol. 3, Moscow: Izd-vo MBA, 2021, 820 p.

8. *Posevnaya ploshchad' ozimyykh kul'tur v 2020 godu sostavit poryadka 19 mln ga. Ministerstvo sel'skogo khozyaistva RF* (The sown area of winter crops in 2020 will be about 19 million hectares. Ministry of Agriculture of the Russian Federation), URL: <https://mcx.gov.ru/press-service/news/posevnaya-ploshchad-ozimyykh-kultur-v-2020-godu-sostavit-poryadka-19-mln-ga/>.

9. “*Rekomendatsii po razvitiyu agropromyshlennogo kompleksa i sel'skikh territorii v Nechernozemnoi zone Rossii do 2030 goda*”. Versiya 2.0 (“Recommendations for the development of the agro-industrial complex and rural areas in the Non-Chernozem Zone of Russia until 2030”. Version 2.0), Moscow: OOO “Izdatel'stvo MBA”, 2021, 400 p.

10. Seventh national communication of the Russian Federation submitted in accordance with Articles 4 and 12 of the United Nations Framework Convention on Climate Change and Article 7 of the Kyoto Protocol, Moscow: 2017, 348 p. URL:

https://unfccc.int/files/national_reports/annex_i_natcom/application/pdf/20394615_russian_federation-nc7-1-7nc.pdf.

11. Stolbovoi V.S., Uglerod pakhotnykh pochv Rossii v strategii smyagcheniya izmenenii klimata (Carbon of arable soils in Russia in the climate change mitigation strategy), *Sovremennye tendentsii v nauchnom obespechenii APK Verkhnevolskogo regiona*, 2018, pp. 356–363.
12. *Trading Greenhouse Gas Emissions Worldwide: Annual Report 2017*. Berlin: ICAP. URL: https://icapcarbonaction.com/en/?option=com_attach&task=download&id=444.
13. Tyurin I.V., *Organicheskoe veshchestvo pochv i ego rol' v plodorodii pochv* (Soil organic matter and its role in soil fertility), Moscow: Nauka, 1965, 319 p.
14. Filipchuk A.N., Malysheva N.V., Moiseev B.N., Strakhov V.V., Analiticheskii obzor metodik ucheta vybrosov i pogloshcheniya lesami parnikovykh gazov iz atmosfery (), *Lesokhoz. inform.: elektron. setevoi zhurn.*, 2016, No. 3, pp. 36–85, URL: <http://lbi.vniilm.ru/>.
15. FAO/IIASA/ISRIC/ISS-CAS/JRC, Harmonized World Soil Database (version 1.2), FAO, Rome, Italy and IIASA, Laxenburg, Austria, 2012.
16. Iizuka K., Tateishi R., Estimation of CO₂ Sequestration by the Forests in Japan by Discriminating Precise Tree Age Category using Remote Sensing Techniques, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, Iss. 11, 15082–15113, DOI: [10.3390/rs71115082](https://doi.org/10.3390/rs71115082).
17. Hengl T., Mendes de Jesus J., Heuvelink GBM, Ruiperez Gonzalez M., Kilibarda M., Blagotić A. et al., Soil Grids 250 m: Global gridded soil information based on machine learning, *PLoS ONE*, 2017, Vol. 12, Iss. 2, e0169748, DOI: [10.1371/journal.pone.0169748](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0169748).
18. IPCC. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Volume 4: Agriculture, Forestry and Other Land Use, Geneva, 2006, URL: <https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>.
19. Ivanov A., Stolbovoy V., Petrosian R., The Initiative of 4 % in perspective from Russia, In: *Food security and climate change: 4 per 1000 initiative new tangible global challenges for the soil*, Poitiers (France), 2019, 46 p., URL: <https://symposium.inra.fr/4p1000>.
20. Lugato E., Ctscatti A., Jones A., Ceccherini G., Duveiller G., Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops, *Environmental Research Letters*, 2020, Vol. 15, No. 9, 094075, DOI: [10.1088/1748-9326/aba137](https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba137).
21. Nelson D.W., Sommers L.E., Total carbon, organic carbon and organic matter, In: *Methods of soil analysis, Part 2, Chemical and Microbiological Properties*, 1982, pp. 539–579.

22. Nilsson S., Shvidenko A., Stolbovoi V., Gluck M., Jonas M., Obersteiner M., *Full Carbon Account for Russia*, Interim Report. IR-00–021, Laxenburg, IIASA, 2000, 180 p.
23. Sanderman J., Hengl T., Fiske G.J., Soil carbon debt of 12,000 years of human land use, *PNAS*, 2017, Vol. 114 (36), 9575–580, DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>.
24. Sanga-Ngoie K., Iizuka K., Kobayashi S., Estimating CO2 sequestration by forests in Oita Prefecture, Japan, by combining Landsat ETM+ and ALOS satellite remote sensing data, *Remote Sensing*, 2012, Vol. 4, Iss. 11, pp. 3544–3570, DOI: [10.3390/rs4113544](https://doi.org/10.3390/rs4113544).
25. Savin I., Stolbovoy V., Soils of Russia – GlobalSoilMap Perspective. *Proc. GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System – Proc. of the 1st GlobalSoilMap Conference*, 2014, pp. 47–50.
26. Schlesinger W., Carbon Sequestration in Soils, *Science*, 1999, Vol. 284, Iss. 5423, 137 p.
27. Stolbovoi V.I., McCallum I., *Land Resources of Russia*, Laxenburg, IIASA, RAS, 2002, URL: http://www.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/lcov_des.htm.
28. Theodora A., Nikolas T., Athanasios B., Remote Sensing Techniques for soil Organic Carbon Estimation: A Review, *Remote Sensing*, 2019, Vol. 11, Iss. 6, 676, DOI: [10.3390/rs11060676](https://doi.org/10.3390/rs11060676).
29. Turner D.P., Ritts W.D., Cohen W.B., Gower S.T., Running, S.W., Zhao M., Costa M.H., Kirschbaum A.A., Ham J.M., Saleska S.R. et al., Evaluation of MODIS NPP and GPP products across multiple biomes, *Remote Sens. Environ.*, 2006, Vol. 102, pp. 282–292.
30. USGS, Landsat Science Products, URL: https://www.usgs.gov/core-science-systems/nli/landsat/landsat-science-products?qt-science_support_page_related_con=2#qt-science_support_page_related_con.
31. Wang J., Li C., Adaptively weighted decision fusion in 30 m land-cover mapping with Landsat and MODIS data, *International Journal of Remote Sensing*, 2015, Vol. 36, Iss. 14, pp. 3659–3674.