

МАРИЯ ГЕННАДЬЕВНА ЮРКЕВИЧ

кандидат сельскохозяйственных наук, старший научный сотрудник лаборатории экологии и географии почв, ИБ КарНЦ РАН (Петрозаводск, Российская Федерация)
svirinka@mail.ru

КРУГОВОРОТ УГЛЕРОДА В ЕСТЕСТВЕННЫХ И АНТРОПОГЕННО ИЗМЕНЕННЫХ ТАЕЖНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ*

Представлен обзор современного состояния исследований по проблеме круговорота углерода в биосистемах. В последние столетия резко увеличилась активность человека по трансформации природных ландшафтов. Антропогенное воздействие местами полностью меняет биогеохимический цикл важнейшего биогенного элемента – углерода. Особенно существенные изменения наблюдаются в таких относительно консервативных системах, как почвы, которые не могут восстанавливаться так же быстро, как растительные и животные сообщества.

Ключевые слова: углерод, органическое вещество, круговорот

Основу механизма функционирования биосферы и ее устойчивости, по В. И. Вернадскому, составляет циркуляция органического вещества, элементов и энергии в естественных и искусственных экосистемах, то есть биологический круговорот веществ. Биологический круговорот – сложный полициклический процесс, слагающийся из множества элементарных почвенных процессов, из производства живого органического вещества, его разложения, минерализации и гумификации [5]. Биологический круговорот в значительной степени определяется взаимоотношением почвы и растительности. В настоящее время на естественный ход биокруговорота оказывается мощное антропогенное воздействие как при вовлечении в сельское хозяйство, так и при техногенезе. В техногенных искусственных ландшафтах все компоненты находятся в начальной стадии формирования, обменные процессы в биогеоценозах замедлены в сравнении с естественными [16]. Почва является своеобразным резервуаром органических и минеральных веществ, регулируя направленность, скорость и масштабы их миграции и трансформации в наземных экосистемах [10]. Именно почва определяет условия для направленности варьирования изменений биофильных элементов. При восстановлении на бывших пахотных почвах многолетней растительности в них меняется направленность потоков углерода и происходит его накопление как в почвах, так и в произрастающих там растениях [38]. В связи с этим приоритетными задачами почвоведения являются изучение внутреннего оборота веществ в различных природных экосистемах и оценка сбалансированности биологического круговорота как необходимого условия их устойчивости. Круговорот органического углерода изменяет поверхностные оболочки Земли и на протяжении эволюции планеты обеспечивает стабильность ее углерод-кислородной системы.

Наземные экосистемы оказывают решающее влияние на природные потоки углекислого газа и его концентрацию в атмосфере. Под влиянием деятельности человека на больших площадях происходит изменение запасов углерода, что влияет на потоки углерода в его наземном цикле.

Малый биологический круговорот в экосистемах служит, как известно, одним из механизмов, обеспечивающих устойчивость природной среды. Прежде всего это касается выделения из круговорота значительных масс углерода, обусловившего формирование различных оболочек Земли, что и определило биогеохимический круговорот элементов [3]. Состояние природной среды будет устойчивым, если любое спонтанное увеличение содержания углерода в атмосфере сопровождается таким же ростом поглощения углерода биотой суши и океана [24]. Явным признаком этого нарушения является случай, когда биота из стока углерода превращается в его источник, то есть при внешнем воздействии сама выбрасывает углекислый газ в атмосферу. Оценка содержания и баланса углерода в различных природных сферах осуществлялась многими исследователями в нашей стране [11], [18], [19], [21]. Оценки глобального баланса углерода однозначно свидетельствуют: наземные экосистемы на неопределенный период собирают этот химический элемент, улавливая 2,1–2,5 Гт углекислого газа в год. Обширные российские леса, луга и болота лидируют в этом процессе [8].

Для восстановления малого круговорота углерода зачастую применима практика компенсации отдельных циклов биогенных элементов, углерода, азота, фосфора на искусственной абиотической основе, что ведет к деградации природных регулирующих механизмов, превращению почвы из сложной экологически сбалансированной системы в субстрат для передачи вносимых минеральных удобрений к корням растений.

Во второй половине XX века отмечено увеличение концентрации углерода в атмосфере. Самым значимым по величине пулом углерода на нашей планете является органический углерод, содержащийся в почвенной толще. По оценкам разных специалистов, мировые запасы $C_{опр}$ в гумусосфере составляют 1477–1700 Гт [28], что почти в 3 раза превосходит количество углерода, содержащееся в растительном покрове [33], и в 2 раза – в атмосфере [41]. Наша страна с территорией выше 1/9 земной поверхности обеспечивает не менее 1/5 всеобщего «бюджета» углерода, играющего особую роль в ряду планетарных биогеохимических циклов [12].

Исследования по органической геохимии углерода и других биофильных элементов являются одним из приоритетных направлений в почвоведении. Они стали еще более актуальными в связи с вопросами цикла углерода и изменений климата, в том числе долгосрочного хранения органического вещества в океанических отложениях и почве [4], [20], [27], [31]. Изменения в использовании сельскохозяйственных земель выступают как фактор в отношении величин и направленности потоков углерода между поверхностью наземных сообществ и атмосферой. В России образовались огромные площади залежных постагренических земель, на которых идет сукцессионное восстановление природных экосистем, их растительного и почвенного покрова [19]. В результате этого на обширных территориях происходит значительная трансформация углеродного баланса, запасов углерода в почвах и растительности, интенсивности почвенного дыхания и др.

Московская группа исследователей под руководством С. Я. Трофимова [6], [25] в течение долгого времени исследовала биохимию, устойчивость и динамику накопления органического вещества в почвах таежно-лесной зоны. Ими была выдвинута гипотеза несбалансированной трансформации органического вещества почв с накоплением инертных продуктов. Эта гипотеза не подразумевала облигатной пирогенной трансформации органических остатков. Географический анализ продуктивности, характеристик органического вещества почв обширных территорий осуществлялся, как правило, в рамках целостных природных образований в соответствии с естественными границами, например, для основных биомов, зональных и интразональных растительных формаций, семейств экосистем, природно-сельскохозяйственных зон, типов почв и почвенных комплексов с учетом типов почвообразующих пород.

Вышеуказанные публикации показывают основные пути накопления и круговорота биофильных элементов в почве, ставя в одном случае акцент на динамику биохимических циклов, в другом – на оценку запасов веществ в разных типах экосистем [35], [40]. В ряде случаев произ-

водится сравнение запасов биогенных элементов в естественных и агрогенно трансформированных экосистемах [13], [22]. В ранних работах по влиянию земледелия на почвы подчеркивался положительный эффект вспашки, известкования и внесения удобрений, который приводил к образованию пахотного горизонта, обогащенного углеродом и другими биофильными элементами [26]. В последние годы упор делается на потери органического углерода почвами, его эмиссию в атмосферу, то есть на негативное влияние земледелия на почву [37].

Одна из особенностей биогеохимического цикла углерода – его незамкнутость. Так, из глобального круговорота данного элемента выбывает CO_2 , попадающий в разные «ловушки»: на современном этапе эволюции биосфера эту роль играют торфообразование и закрепление углерода в стабильных фракциях органического вещества почвы. Он хранится сотни и тысячи лет в составе гумуса, а при микробиологическом разложении последнего вновь выделившаяся двуокись углерода «консервируется» в виде минеральных карбонатов в глубоких слоях почвы [14].

Хорошо известно, что любые изменения в системе использования почв неизбежно ведут к изменениям в запасах $C_{опр}$. Так, перевод целинных земель в пахотные угодья вызывает значительные потери органического углерода, как вследствие усиления процессов минерализации органического вещества, так и за счет ежегодного изъятия растительного материала (в виде урожая), ранее служившего источником пополнения органического углерода в почвах [29]. В зависимости от климатических условий, степени и характера изменений в землепользовании через некоторое время после распашки устанавливается новый стационарный уровень содержания $C_{опр}$ в почвах [7], [39]. Потери органического углерода за период переходного режима могут составлять от 10 до 40 % от их начального запаса. После выведения почв из сельскохозяйственного использования содержание углерода в них постепенно увеличивается – на 19 % на пастбищах и на 53 % во вторичных лесах [15].

Скорость накопления углерода больше в первые годы восстановления почв (1–15 лет) и заметно уменьшается с возрастом залежных земель (до 20–30 лет). Средняя скорость аккумуляции углерода в слое 0–20 см для первых 15 лет с агростановления составляет 131 г C/m^2 год в дерново-подзолистых почвах. Для почв, где восстановление шло в течение более длительного периода времени (16–30 лет), средняя скорость накопления углерода в бывшем пахотном слое была почти в 2 раза меньшей – 72 ± 9 г C/m^2 год [36]. Обновление углерода почв в верхних почвенных горизонтах слабо увеличивается с севера на юг в безлесной области, следуя за возрастанием био-

логической активности. В лесной зоне наблюдается выраженное увеличение скоростей обновления углерода, причем в зависимости от характера рельефа и почвообразующих пород их разница может достигать 10 раз. Наибольшей скоростью обновления обладает карбонатная почва карстовых ландшафтов, а наименьшей – подзолистые почвы моренных ландшафтов северной тайги. Биоклиматически обусловленная разница в скоростях обновления почвенного углерода показывает, что потепление климата может довольно слабо ускорить разложение гумуса почв, но в то же время оно может увеличить продуктивность экосистем арктического региона. Следовательно, если не произойдет сдвига северной границы леса, потепление может вызвать более активный сток углерода в дренированные почвы высоких широт Евразии и увеличить разницу в скоростях обновления углерода между почвами в различных литолого-геоморфологических условиях [32].

В последнее время актуальным стал вопрос о необходимости получения объективных данных о влиянии человеческой деятельности на баланс углерода и других биофильных элементов в почвах. Вследствие экономических преобразований в аграрном секторе страны наблюдается прекращение возделывания и перевод значительных площадей пахотных почв в земли кормовых угодий. Замена природных экосистем в агроценозы привела к изменению бюджета углерода [23]. Баланс биофильных элементов при окультуривании почв зависит в большой степени от природной зоны, конкретных почвенно-экологических условий и от практики землепользования. В ходе постагротенной сукцессии величина эмиссии углерода из почвы изменяется нелинейно и имеет два периода максимума – в первые десятилетия после засеваивания пашни и во второй половине процесса восстановления. Эти максимумы разделены заметным по величине и продолжительности периодом спада интенсивности почвенного дыхания. Первый максимум связан с интенсивной потерей углерода, накопленного в минеральных горизонтах пашни при ее длительном удобрении. Второй – с активным развитием подстилки, подземной фитомассы, в основном, древесного яруса, а также с некоторым увеличением запасов углерода в минеральной толще.

Спад объясняется тем, что «агротенные излишки» углерода к этому времени уже потеряны из почвы в ходе эмиссии, а запасы его в подстилке и подземной фитомассе еще недостаточно велики. Таким образом, долговременная динамика величины эмиссии углерода в ходе постагротенной сукцессии в южной тайге определяется в первую очередь изменением запасов углерода в почвенной толще – в минеральных горизонтах, в подстилке и в подземной фитомассе, причем

два из этих параметров в ходе процесса восстановления изменяются нелинейно. При этом изменение поверхностного суммарного дыхания зависит от динамики всех трех параметров, дыхания подстилки – от запасов углерода именно в ней, дыхания минеральных горизонтов – от запасов в них почвенного углерода и величины подземной фитомассы. Внутригодовая динамика эмиссии углерода на разных стадиях постагротенной сукцессии определяется в первую очередь температурой почвы, тогда как ее влажность играет заметную роль только на луговой стадии [17].

В период постагротенной сукцессии на пашне, как правило, формируются зональные типы экосистем по классическим сукцессионным схемам. Сначала они проходят рудеральную стадию (3–5 лет). Дальнейшее восстановление растительного покрова и его скорость зависят от природно-климатических условий. Считается, что в условиях севера минеральные почвы подзолистого ряда в ходе освоения обогащаются биофильными элементами. В результате вспашки, известкования и внесения удобрений происходит образование пахотного горизонта, обогащенного углеродом и другими биофильными элементами [1].

В зональных экотонах леса и степи, где преобладает непромывной или периодически промывной режим почвы и развивается дерновый процесс, участие гумуса в укороченном цикле биологического круговорота достаточно мало [9].

В бореальных лесах, с их доминирующим подзолистым процессом почвообразования в условиях преобладающего промывного режима, действует автономный круговорот элементов между живыми организмами и их отмирающими остатками [9]. В целом постагротенные экосистемы занимают более 20 % площади южной тайги. На этих залежах в ходе постагротенной сукцессии формируются высокобонитетные еловые и сосновые леса со значительными запасами подземной и надземной фитомассы, мощной подстилкой, что значительно трансформирует углеродный баланс территории при замене ими пахотных угодий. Все это способствовало тому, что проблеме изменения углеродного баланса в ходе постагротенных сукцессий в южной тайге посвящено уже немало работ [2], [30], [34].

Современные антропогенные воздействия на агроландшафты преследуют цель увеличения их биологической продуктивности или ресурсо-воспроизводящей способности. Антропогенная нагрузка на почвы нередко сопровождается изменением уровня их плодородия и снижением продуктивности сельскохозяйственных культур. Чтобы оценить те или иные изменения, происходящие в агроландшафтах, необходим контроль над их функционированием.

* Работа выполнена в рамках государственного задания 0221-2014-0036.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Агрэкологическое состояние и перспективы использования земель России, выбывших из активного сельскохозяйственного оборота. М.: Российский НИИ информации и технико-экономических исследований по инженерно-техническому обеспечению агропромышленного комплекса, 2008. 64 с.
- Арчегова И. Б., Панюков А. Н., Кузнецова Е. Г., Ковалева И. А. Роль биологического фактора в процессе формирования почвы в таежной зоне // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. 3. Биология. 2016. Вып. 2. С. 127–139.
- Белюченко И. С. Роль сложного компоста в биологическом круговороте элементов и веществ и устойчивости агроландшафтов // Научный журнал КубГАУ. 2014. № 101 (07). С. 1–32.
- Глазовская М. А. Педолитогенез и континентальные циклы углерода. М.: ЛИБРОКОМ, 2009. 330 с.
- Гродзинский М. Д. Применение оценок устойчивости геосистем к нормированию антропогенных воздействий // Ландшафты, нагрузки, нормы. М.: Ин-т географии РАН, 1990. С. 43–54.
- Заварзин Г. А., Кудеяров В. Н. Почва как главный источник углекислоты и резервуар органического углерода на территории России // Вестник РАН. 2006. Т. 76. С. 14–29.
- Кириюшин В. И., Ганжара Н. Ф., Кауричев И. С., Орлов Д. С., Титлянова А. А., Фокин А. Д. Концепция оптимизации режима органического вещества в агроландшафтах. М.: Изд-во ТСХА, 1993. 99 с.
- Коломыц Э. Г., Шарая Л. С. Устойчивость лесных экосистем, методы ее исчисления и картографирования // Известия Самарского НЦ РАН. 2014. Т. 16. № 1. С. 93–99.
- Коломыц Э. Г., Юнина В. П., Сидоренко М. В., Воротников В. П. Экосистемы хвойного леса на зональной границе. Организация, устойчивость, антропогенная динамика. Нижний Новгород: Ин-т экологии Волж. бассейна РАН, 1993. 346 с.
- Кудеяров В. Н., Демкин В. А., Гиличинский Д. А., Горячкин С. В., Рожков В. А. Глобальные изменения климата и почвенный покров // Почвоведение. 2009. № 9. С. 1027–1042.
- Кудеяров В. Н., Хаминов Ф. И., Деева Н. Ф., Ильина А. А., Кузнецова Т. В., Тимченко А. В. Оценка дыхания почв России // Почвоведение. 1995. № 1. С. 21–42.
- Курганова И. Н., Кудеяров В. Н. Экосистемы России и глобальный бюджет углерода // Наука в России. 2012. № 5 (191). С. 25–32.
- Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О. К чему ведет сокращение пахотных земель // Природа. 2009. № 11. С. 20–24.
- Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Мякишина Т. Н., Сапронов Д. В., Кудеяров В. Н. Эмиссия CO₂ из почв различных экосистем южно-таежной зоны: анализ данных непрерывных 12-летних круглогодичных наблюдений // Доклады АН. 2011. Т. 436. № 6. С. 843–846.
- Курганова И. Н., Лопес де Гереню В. О., Швиденко А. З., Сапожников П. М. Изменение общего пула органического углерода в залежных почвах России в 1990–2004 гг. // Почвоведение. 2010. № 3. С. 361–368.
- Лебедева И. И., Базыкина Г. С., Гребенников А. М., Чевердин Ю. И., Беспалов В. А. Опыт комплексной оценки влияния длительности земледельческого использования на свойства и режимы агрочерноземов Каменной степи // Бюллетень Почвенного института им. В. Д. Докучаева. 2016. Вып. 83. С. 77–102.
- Люри Д. И., Карелин Д. В., Кудиков А. В., Горячкин С. В. Изменение почвенного дыхания в ходе постагротехнической сукцессии на песчаных почвах в южной тайге // Почвоведение. 2013. № 9. С. 1060–1072.
- Моисеев Б. Н., Алябина И. О. Оценка и картографирование потоков органического углерода, поступающего в почвы основных биомов России // Почвоведение. 2002. № 6. С. 675–681.
- Орлов Д. С., Бирюкова О. Н. Запасы углерода органических соединений в почвах Российской Федерации // Почвоведение. 1995. № 1. С. 21–32.
- Перельман А. И., Касимов Н. С. Геохимия ландшафта. М.: Астрея-2000, 1999. 610 с.
- Родин Л. Е., Базилевич Н. И. Динамика органического вещества и биологический круговорот в основных типах растительности. М.; Л.: Наука, 1965. 253 с.
- Розанов Б. Г. Орошаемые черноземы. М.: Изд-во МГУ, 1989. 240 с.
- Самбуу А. Д., Дапылдай А. Б., Кулар А. Н. Пул углерода в травяных экосистемах и агроценозах Тувы // Вестник КрасГАУ. 2009. № 12. С. 50–56.
- Тарко А. М. Антропогенные изменения глобальных биосферных процессов. Математическое моделирование. М.: Физматлит, 2005. 232 с.
- Трофимов С. Я. Биотическая регуляция циклов биофильных элементов в ненарушенных южнотаежных экосистемах // Функции почв в биосферно-геосферных системах. М., 2001. С. 134–135.
- Тюрик И. В. Органическое вещество почвы и его роль в плодородии. М.: Наука, 1965. 319 с.
- Basile-Doelsch I., Amundson R., Stone W. E. E., Maselli C. A., Bottero J. Y., Colin F., Masin F., Borschneck D., Meunier J. D. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Réunion // Europ. J. Soil Sci. 2005. Vol. 56. № 6. P. 689–703.
- Batjes N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // Europ. J. Soil Sci. 1996. Vol. 47. P. 151–163.
- Davidson E. A., Ackerman I. L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils // Biogeochem. 1993. Vol. 20. P. 161–193.
- Frouz J., Keplin B., Pižl V., Tájovský K., Starý J., Lukešová A., Nováková A., Balík V., Háněl L., Materna J., Düker C., Chalupský J., Rusek J., Heinkele T. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences // Ecolog. Engineer. 2001. Vol. 17. P. 275–284.
- Goldberg S. Chemical modeling of anion competition on goethite using the constant capacitance model // Soil Sc. Soc. America J. 1985. Vol. 49. № 4. P. 851–856.
- Goryachkin S. V., Cherkinsky A. E., Chichagova O. A. The soil organic carbon dynamics in high latitudes of Eurasia using ¹⁴C data and the impact of potential climate change // Global Climate and Cold Regions Ecosystems / R. Lal, J. M. Kimble, B. A. Stewart (eds.). Lewis Publishers, 2000. P. 145–161.
- IPCC. Scientific assessment report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
- Klaas G. J. N., van Lagen B., Buurma P. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession // Geoderma. 2001. Vol. 100. P. 1–24.
- Knicker H., Schmidt M. W. I., Kogel-Knabner I. Nature of organic nitrogen in fine particle size separates of sandy soils of highly industrialized areas as revealed by NMR spectroscopy // Soil Biol. Biochem. 2000. Vol. 32. № 2. P. 241–252.

36. Post W. M., Kwon K. C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // *Global Change Biol.* 2000. Vol. 6. P. 317–327.
37. Post W. M., Mann L. K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation // A. F. Bouwman (eds.). *Soils and the Greenhouse Effect*. John Wiley & Sons, New York, 1990. P. 401–406.
38. Poulton P. R., Pye E., Hargreaves P. R., Jenkins D. S. Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland // *Global Change Biol.* 2003. Vol. 9. P. 942–955.
39. Schär C., Vidale P. L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Linger M., Appenzeller C. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves // *Nature*. 2004. Vol. 427. P. 332–336.
40. Skjemstad J. O., Taylor J. A. Does the Walkley-Black Method determine soil charcoal // *Communic. in Soil Sci. Plant Analysis*. 1996. Vol. 30. № 15/16. P. 2299–2310.
41. Smith P. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol // *Soil Use Management*. 2004. Vol. 20. P. 264–270.

Yurkevich M. G., Institute of Biology of Karelian Research Centre of RAS
(Petrozavodsk, Russian Federation)

THE CARBON CYCLE IN NATURAL AND ANTHROPOGENICALLY CHANGED ECOSYSTEMS OF TAIGA

The article presents an overview of the current state of the research on the carbon cycle in biological systems. In the last century the human activity related to transformation of natural landscapes has dramatically increased. In some places the human impact has completely changed the biogeochemical cycle of one of the most important biogenic elements – carbon. Especially significant changes are observed in such relatively conservative systems as soils that are not able to recover as fast as plant and animal communities.

Key words: carbon, organic matter, cycle

REFERENCES

1. *Agroekologicheskoe sostoyanie i perspektivy ispol'zovaniya zemel' Rossii, vybyvshikh iz aktivnogo sel'skokhozyaystvennogo oborota* [Agroecological status and prospects of the use of lands of Russia withdrawn from active agricultural rotation]. Moscow, 2008. 64 p.
2. Archegova I. B., Panyukov A. N., Kuznetsova Ye. G., Kovaleva I. A. The role of biological factors in the formation of soils in the taiga zone [Rol' biologicheskogo faktora v protsesse formirovaniya pochvy v taezhnoy zone]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Ser. 3. Biologiya*. 2016. Issue. 2. P. 127–139.
3. Belyuchenko I. S. The role of complex compost in the biological cycle of elements and substances, and landscape stability [Rol' slozhnogo komposta v biologicheskem krugovorote elementov i veshchestv i ustoychivosti agrolandshaftov]. *Nauchnyy zhurnal KubGAU*. 2014. № 101 (07). P. 1–32.
4. Glazovskaya M. A. *Pedolitogenet i kontinental'nye tsikly ugleroda* [Politogeneza and continental cycles of carbon]. Moscow, LIBROKOM Publ., 2009. 330 p.
5. Grodzinsky M. D. The use of estimates the sustainability of geosystems to the anthropogenic regulation effects [Primenenie otcenok ustoychivosti geosistem k normirovaniyu antropogennyykh vozdeystviy]. *Landshafty, nagruzki, normy*. Moscow, In-t geografii RAN Publ., 1990. P. 43–54.
6. Zavarzin G. A., Kudeyarov V. N. Soil as a key source of carbonic acid and reservoir of organic carbon on the territory of Russia [Pochva kak glavnyy istochnik uglekisloty i rezervuar organicheskogo ugleroda na territorii Rossii]. *Vestnik RAN*. 2006. Vol. 76. P. 14–29.
7. Kiryushin V. I., Ganzhara N. F., Kaurichev I. S., Orlov D. S., Titlyanova A. A., Fokin A. D. *Konseptsiya optimizatsii rezhima organicheskogo veshchestva v agroladshaftakh* [The concept of optimization of organic matter in agrolandscape]. Moscow, Izd-vo TSKhA, 1993. 99 p.
8. Kolomyts E. G., Sharaya L. S. Sustainability of forest ecosystems, the methods of calculation and mapping [Ustoychivost' lesnykh ekosistem, metody ee ischisleniya i kartografirovaniya]. *Izvestiya Samarskogo NTs RAN*. 2014. Vol. 16. № 1. P. 93–99.
9. Kolomyts E. G., Yunina V. P., Sidorenko M. V., Vorotnikov V. P. *Ekosistemy khvoynogo lesa na zonal'noy granitsse. Organizatsiya, ustoychivost', antropogenaya dinamika* [Ecosystems of coniferous forests on the zonal border. Organization, stability, anthropogenic dynamics]. Nizhniy Novgorod, In-t ekologii Volzhskogo basseyna RAN Publ., 1993. 346 p.
10. Kudeyarov V. N., Demkin V. A., Gilichinsky D. A., Goryachkin S. V., Rozhkov V. A. Global climate change and soil cover [Global'nye izmeneniya klimata i pochvennyy pokrov]. *Pochvovedenie*. 2009. № 9. P. 1027–1042.
11. Kudeyarov V. N., Khakimov F. I., Deva N. F., Ilina A. A., Kuznetsova T. V., Timchenko A. V. Evaluation of respiration of Russian soils [Otsenka dykhaniya pochv Rossii]. *Pochvovedenie*. 1995. № 1. P. 21–42.
12. Kurganova I. N., Kudeyarov V. N. Ecosystems of Russia and global carbon budget [Ekosistemy Rossii i global'nyy byudzhet ugleroda]. *Nauka v Rossii*. 2012. № 5 (191). P. 25–32.
13. Kurganova I. N., Lopes de Gerenu V. O. What leads to the decrease of arable land [Kchemu vedet sokrashchenie pakhotnykh zemel']. *Priroda*. 2009. № 11. P. 20–24.
14. Kurganova I. N., Lopes de Gerenu V. O., Myakshina T. N., Sapronov D. V., Kudeyarov V. N. The CO₂ emission from soils of different ecosystems of the South taiga zone: an analysis of data from continuous 12-year-old year-round observations [Emissiya SO₂ iz pochv razlichnykh ekosistem yuzhno-taezhnoy zony: analiz dannykh nepreryvnykh 12-letnikh kruglogodichnykh nablyudenii]. *Doklady AN*. 2011. Vol. 436. № 6. P. 843–846.
15. Kurganova I. N., Lopes de Gerenu V. O., Shvidenko A. Z., Sapozhnikov P. M. The change in the total pool of organic carbon in fallow soil of Russia in 1990–2004 [Izmenenie obshchego pula organicheskogo ugleroda v zaleznykh pochvakh Rossii v 1990–2004 gg.]. *Pochvovedenie*. 2010. № 3. P. 361–368.

16. Lebedeva I. I., Bazyrkina G. S., Grebenikov A. M., Cheverdin Yu. I., Bespalov V. A. Comprehensive assessment experience of the impact of agricultural use duration on the properties and modes of agroecosystems of Stone steppes [Opyt kompleksnoy otsenki vliyaniya dilitel'nosti zemledel'cheskogo ispol'zovaniya na svoystva i rezhimy agrochernozemov Kamennoy stepi]. *Byulleten' Pochvennogo instituta im. V. V. Dokuchaeva*. 2016. Issue. 83. P. 77–102.
17. Luryi D. I., Karelina D. V., Kudikov A. V., Goryachkin S. V. The change in soil respiration during the postagrogenic succession on sandy soils in the southern taiga [Izmenenie pochvennogo dykhaniya v khode postagrogennoy sukcessii na peschanykh pochvakh v yuzhnoy tayge]. *Pochvovedenie*. 2013. № 9. P. 1060–1072.
18. Moiseev B. N., Alyabina I. O. Evaluation and mapping the flows of organic carbon entering the soil of the main biomes of Russia [Otsenka i kartografirovaniye potokov organiceskogo ugleroda, postupayushchego v pochvy osnovnykh biomov Rossii]. *Pochvovedenie*. 2002. № 6. P. 675–681.
19. Orlov D. S., Bir'yukova O. N. Carbon stocks of organic compounds in the soils of the Russian Federation [Zapasy ugleroda organiceskikh soedineniy v pochvakh Rossiyskoy Federatsii]. *Pochvovedenie*. 1995. № 1. P. 21–32.
20. Perelman A. I., Kasimov N. S. *Geokhimiya landschafta* [Geochemistry of landscape]. Moscow, Astreya-2000 Publ., 1999. 610 p.
21. Rodin L. Ye., Bazilevich N. I. *Dinamika organiceskogo veshchestva i biologicheskiy krugovorot v osnovnykh tipakh rasitel'nosti* [Dynamics of organic matter and biological turnover in the major vegetation types]. Moscow, Leningrad, Nauka Publ., 1965. 253 p.
22. Rozanov B. G. *Oroshaemye chernozemy* [Irrigated chernozems]. Moscow, Izd-vo MGU, 1989. 240 p.
23. Sambuu A. D., Dapylay A. B., Kuular A. N. The pool of carbon in grass ecosystems and agroecosystems of Tuva [Pul ugleroda v travyanykh ekosistemakh i agrotsenozakh Tuvy]. *Vestnik KrasGAU*. 2009. № 12. P. 50–56.
24. Tarko A. M. *Antropogennye izmeneniya global'nykh biosfernykh protsessov. Matematicheskoe modelirovaniye* [Anthropogenic changes of global biospheric processes. Mathematical modeling]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005. 232 p.
25. Trofimov S. Ya. Biotic regulation of the cycles biophilic elements in undisturbed southern taiga ecosystems [Bioticheskaya reguliyatsiya tsiklov biofil'nykh elementov v nenarushennykh yuzhnootezhnykh ekosistemakh]. *Funktsii pochv v biosferno-geosfernykh sistemakh*. Moscow, 2001. P. 134–135.
26. Tyurin I. V. *Organicheskoe veshchestvo pochvy i ego rol' v plodorodii* [Soil organic matter and its role in fertility]. Moscow, Nauka Publ., 1965. 319 p.
27. Basile-Doebsch I., Amundson R., Stone W. E. E., Masiello C. A., Bottero J. Y., Colin F., Marin F., Borschneck D., Meunier J. D. Mineralogical control of organic carbon dynamics in a volcanic ash soil on La Reunion // *Europ. J. Soil Sci.* 2005. Vol. 56. № 6. P. 689–703.
28. Batjes N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world // *Europ. J. Soil Sci.* 1996. Vol. 47. P. 151–163.
29. Davidson E. A., Ackerman I. L. Changes in soil carbon inventories following cultivation of previously untilled soils // *Biogeochem.* 1993. Vol. 20. P. 161–193.
30. Frouz J., Keplin B., Pižl V., Tajovský K., Starý J., Lukešová A., Nováková A., Balík V., Háněl L., Materna J., Düker C., Chalupský J., Rusek J., Heinkel T. Soil biota and upper soil layer development in two contrasting post-mining chronosequences // *Ecolog. Engineer.* 2001. Vol. 17. P. 275–284.
31. Goldberg S. Chemical modeling of anion competition on goethite using the constant capacitance model // *Soil Sc. Soc. America J.* 1985. Vol. 49. № 4. P. 851–856.
32. Goryachkin S. V., Cherkinsky A. E., Chichagova O. A. The soil organic carbon dynamics in high latitudes of Eurasia using ¹⁴C data and the impact of potential climate change // *Global Climate and Cold Regions Ecosystems* / R. Lal, J. M. Kimble, B. A. Stewart (eds.). Lewis Publishers, 2000. P. 145–161.
33. IPCC. Scientific assessment report. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1990.
34. Klaas G. J. N., van Lagen B., Buurman P. Composition of plant tissues and soil organic matter in the first stages of a vegetation succession // *Geoderma*. 2001. Vol. 100. P. 1–24.
35. Knicker H., Schmidt M. W. I., Kogel-Knabner I. Nature of organic nitrogen in fine particle size separates of sandy soils of highly industrialized areas as revealed by NMR spectroscopy // *Soil Biol. Biochem.* 2000. Vol. 32. № 2. P. 241–252.
36. Post W. M., Kwon K. C. Soil carbon sequestration and land use change: processes and potential // *Global Change Biol.* 2000. Vol. 6. P. 317–327.
37. Post W. M., Mann L. K. Changes in soil organic carbon and nitrogen as a result of cultivation // A. F. Bouwman (eds.). *Soils and the Greenhouse Effect*. John Wiley & Sons, New York, 1990. P. 401–406.
38. Poulton P. R., Pye E., Hargreaves P. R., Jenkinson D. S. Accumulation of carbon and nitrogen by old arable land reverting to woodland // *Global Change Biol.* 2003. Vol. 9. P. 942–955.
39. Schär C., Vidale P. L., Lüthi D., Frei C., Häberli C., Liniger M., Appenzeller C. The role of increasing temperature variability in European summer heat waves // *Nature*. 2004. Vol. 427. P. 332–336.
40. Skjemstad J. O., Taylor J. A. Does the Walkley-Black Method determine soil charcoral // *Communic. in Soil Sci. Plant Analysis*. 1996. Vol. 30. № 15/16. P. 2299–2310.
41. Smith P. Monitoring and verification of soil carbon changes under Article 3.4 of the Kyoto Protocol // *Soil Use Management*. 2004. Vol. 20. P. 264–270.

Поступила в редакцию 17.05.2017