

На пути к экономике замкнутого цикла

DOI: 10.34828/UdSU.2024.96.12.003

УДК 502.131.1

Ю.Л. Ткаченко, С.Д. Морозов, И.С. Щербакова

СЕКВЕСТРАЦИОННАЯ ИНДУСТРИЯ КАК ВАЖНАЯ ЧАСТЬ ЭКОНОМИКИ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА

Аннотация. В статье рассматривается негативное воздействие отходов современной техносферы на биосферу, вызванное этим воздействием нарушение замкнутости глобального углеродного цикла и возможные решения по восстановлению баланса круговорота углерода. Решение этой глобальной задачи требует создания отдельной отрасли мировой экономики – секвестрационной индустрии. Освещена нормативная база, созданная в России для формирования секвестрационной индустрии, учёта углеродных единиц и устройства карбоновых ферм. Приведены примеры практической реализации первых проектов карбоновых полигонов для изучения поглотительной способности различных экосистем с целью верификации углеродных единиц.

Ключевые слова: техносфера, отходы техносферы, углекислый газ, карбоновый цикл, карбоновый полигон, карбоновая ферма, экономика замкнутого цикла.

Для цитирования: Ткаченко Ю.Л., Морозов С.Д., Щербакова И.С. Секвестрационная индустрия как важная часть экономики замкнутого цикла // Управление техносферой: электрон. журнал, 2024. Т. 7. Вып. 2. URL: <https://technosphere-ing.ru> С.190–206.
DOI: 10.34828/UdSU.2024.96.12.003

Введение. Отходы техносферы

Под техносферой в настоящее время понимается измененная и преобразованная людьми с помощью техники и технологий часть биосферы, так, чтобы новая, искусственная среда обитания удовлетворяла материальные и культурные потребности человека, служила для защиты от природных опасностей и неблагоприятных явлений окружающей среды. [1, 2]. Одним из аспектов противоречия построенной техносферы и естественной биосферы является образование большого количества отходов. Под отходами техносферы

понимаются выбросы аэрозолей и газов в атмосферу, сброс в гидросферу сточных вод, загрязнённых взвешенными частицами и растворёнными веществами, твёрдые отходы производства и потребления. Большинство (> 90 % по массе) отходов техносферы не имеет естественных организмов-редуцентов, поэтому не обезвреживается в окружающей среде, а выпадает из биотического круговорота вещества и создаёт загрязнение среды, как показано в работе [3].

Проблема загрязнения возникает также в случае, если естественные мощности переработки оказываются недостаточными и не справляются с поступающим объёмом отходов, которые могут быть утилизированы природной средой [4]. Так, современная техносфера оперирует разнообразным по своему составу веществом – минеральными ресурсами и биомассой живых организмов [5].

При этом эффективность переработки техносферой природных ресурсов в полезную продукцию – «техновещество», невелика. Согласно данным Т.А. Акимовой и В.В. Хаскина, «коэффициент полезного действия» техносферы составляет всего 0,3 % [6]. То есть в техносфере создан линейный поток вещества «ресурсы – отходы». Это противоречит принципу построения биосферы Земли, с её замкнутым биотическим круговоротом, в котором практически постоянный объём вещества проходит многократное количество циклов трансформации: «ресурсы – отходы – ресурсы».

Академик В.И. Вернадский писал по поводу участия в замкнутых циклах обращения вещества организмов биосферы: «Это вещество вечно разрушается и создаётся. Перед нами динамическое равновесие. Очевидно, что даже в сутки создаются и разрушаются смертью, рождением, метаболизмом, ростом колоссальные массы живого вещества» [7].

Отступление от принципа природоподобия вполне объяснимо – техносфера создавалась человечеством на протяжении длительного периода времени, при отсутствии необходимых экологических знаний. А.А. Липаев

относит начало техносферогенеза к периоду появления и усложнения техновещества, начавшемуся примерно 35 тыс. лет назад [8]. Представления о биотических круговоротах вещества обрели законченный вид только на рубеже XIX и XX веков в работах В.И. Вернадского, посвящённых биосфере.

1. Нарушение углеродного баланса

Так как углерод является основным элементом живой природы, то его биотический круговорот является наиболее важным в биосфере. Круговорот углерода – основного «кирпичика» жизни является самым быстрым среди других циклов химических элементов и вторым по массе обращающегося вещества после круговорота воды. В.Г. Горшков установил, что замкнутость карбонового цикла составляла более 99,9999 % на протяжении сотен миллионов лет. При этом биосфера компенсировала не только поступление углерода от органических источников (разложение биомассы), но и от случайных источников неорганического происхождения, например – извержений вулканов [9].

К настоящему времени выбросы техносферы нарушают сложившийся сотни миллионов лет назад баланс углерода. В атмосферу ежегодно поступает избыток углерода в количестве около 9 Гт (млрд тонн) (в основном в форме диоксида углерода и метана). Из этого количества 67 % приходится на прямую хозяйственную деятельность, а 33 % составляют косвенные выбросы от разложения органического вещества, не скомпенсированного вследствие антропогенного нарушения функций экосистем. [10].

Из этих дополнительных выбросов примерно 39 % растворяется в приповерхностном слое Мирового океана (что приводит к закислению природных вод, гибели рыб, кораллов и других водных организмов), 31 % поглощается водными экосистемами и 11 % экосистемами суши [11]. Оставшиеся 19 % выбросов накапливаются в атмосфере. Следовательно, в

пересчёте на чистый углерод в атмосфере каждый год остаётся более 1,7 Гт различных углеродных соединений – поэтому в воздухе растёт их концентрация. Регулярный мониторинг химического состава атмосферы показал, что с 50-х годов прошлого века до нашего времени среднегодовое содержание CO_2 возросло с 315 ppm до 400 ppm по объёму, а метана с 675 ppb до 1813 ppb [12].

Сейчас главное внимание парниковым газам уделяется вследствие их воздействия на глобальный климат Земли. И хотя «парниковый» потенциал, оцениваемый по энергетическому форсингу на климат с учётом концентрации, у CH_4 выше, чем у CO_2 (0,28 и 0,004 Вт/(м² · ppm), соответственно) [13], его концентрация в атмосфере ниже в сотни раз, поэтому вклад метана в общий приток теплоты в тропосферу не превышает 17%, в то время как у диоксида углерода этот вклад составляет 76 % [14]. Вследствие этого основное внимание уделяется сокращению накопления в атмосфере CO_2 .

До 70-х годов XX века считалось, что углекислый газ не относится к газовым отходам техносферы, так как является ресурсом для фотосинтеза биомассы зелёными растениями-продуцентами экосистем и не оказывает вредного воздействия на человека в небольших концентрациях. Однако в настоящее время, кроме влияния на глобальный климат, известно о хроническом воздействии повышенных (500 – 800 ppm) концентраций диоксида углерода на здоровье людей.

Д.С. Робертсон в статье [15] показал зависимость между ростом концентрации углекислого газа во вдыхаемом воздухе и снижением рН крови человека вследствие образования из поглощённого CO_2 угольной кислоты. Так как для жизнедеятельности организма необходимо очень строгое поддержание величины рН крови, то гомеостаз повышает буферную ёмкость крови, для чего запускаются процессы вымывания в кровь кальция и фосфора из костей, что в дальнейшем приводит к образованию бикарбонатов этих элементов.

Бикарбонаты постепенно выводятся из крови почками, а при очень большом их накоплении – откладываются в мышцах, почках, печени, лёгких, сосудах и даже в мозге человека в форме кальциатов, являющихся патогенными для организма биоминералами [16]. Рост содержания бикарбонатов в сыворотке крови с 23,7 ммоль/л в 2000 г. до 25,2 ммоль/л в 2012 г., выявленных в ходе массовых медицинских исследований населения США [17], свидетельствует о компенсации лёгких форм массового ацидоза, что подтверждает данные Робертсона. Дальнейший рост концентрации CO_2 в атмосфере Земли способен поставить под вопрос выживание всего человечества вследствие усиления проявлений ацидоза у жителей планеты.

2. Способы секвестра углеродного дисбаланса

Чтобы избежать негативного сценария, связанного с нарушением карбонового цикла, человечеству необходимо будет решить сложную задачу, названную по имени д.б.н., профессора А.С. Керженцева [18]. Он сформулировал её так, что кроме своей естественной экосистемной функции консумента (потребителя природных ресурсов), человеку на планете придется выполнять ещё две функции: продуцента (производителя первичной биомассы) и редуцента (утилизатора ненужного биосфере вещества – отходов).

Применительно к восстановлению баланса круговорота углерода одним из решений «задачи Керженцева» может стать создание секвестрационной индустрии, работа которой направлена как на сокращение выбросов углеродсодержащих газов в атмосферу, так и на повышение объёма их стока из атмосферы в естественные или искусственные резервуары. В настоящее время уже создана группа технологий, которая получила общее название «Carbon Capture and Storage» (CCS) [19]. Их основой являются процессы захвата диоксида углерода из выбросов источников загрязнения или непосредственно из атмосферы и накопление его в резервуарах для дальнейшего использования.

В настоящее время CO_2 оказался достаточно ценным ресурсом. Поэтому его улавливание и переработка становятся экономически выгодными. Важной областью применения диоксида углерода является производство так называемого «углеродно-нейтрального топлива» (метан, метанол, этанол, бутанол, диметиловый эфир) [20]. Такое топливо хотя и производит при сжигании выбросы углекислого газа, но так как оно было получено с использованием атмосферного, а не ископаемого CO_2 в качестве сырья, то не вызывает дисбаланса между поступлением и стоком углерода в атмосфере.

Применение биотехнологий с использованием различных штаммов микроорганизмов позволяет получать непосредственно из газовой фазы CO_2 и продуктов его переработки (метана, метанола и этанола) белковый концентрат [21]. Таким же образом можно использовать метан, входящий в состав биогаза, улавливаемого от систем анаэробной очистки сточных вод и от переработки органических отходов сельского хозяйства. Согласно данным работы [22], использование диоксида углерода в современной экономике распределяется следующим образом: холодильные установки – 45 %; пищевая промышленность – 20 %; нефте- и газодобыча – 10 %; химическая и нефтехимическая промышленность – 10 %; биотехнология – 10 %; металлургия – 5 %.

Все эти технологии требуют высокотехнологичного оборудования, больших капитальных и эксплуатационных затрат и дополнительного расхода энергии, которых можно избежать, если использовать природный способ утилизации CO_2 , который осуществляется зелёными растениями-продуцентами в процессах фотосинтеза с использованием солнечной энергии. Поэтому в настоящее время речь идёт уже не только о создании технико-технологической экономики замкнутого цикла, а о формировании «биоэкономики замкнутого ресурсного цикла» [23], включающей в свои производственные процессы функции (экосистемные услуги) региональных систем биосферы, в том числе фотосинтез первичной продукции биомассы.

3. База секвестрационной индустрии

Основой экономического механизма секвестрационной индустрии является соблюдение баланса, то есть необходимость компенсации затрат утилизаторов углерода из атмосферы, путём установления обязательных платежей за углеродные выбросы для производителей товаров и услуг всех остальных секторов экономики. [24]. Для оценки величины взаиморасчётов «Законом об ограничении выбросов парниковых газов» № 296-ФЗ от 02 июля 2021 г. было введено понятие «углеродной единицы», что заложило законодательную базу для создания в России секвестрационной индустрии, призванной в будущем интегрироваться в биоэкономику замкнутого цикла. Одна углеродная единица эквивалентна 1 тонне углекислого газа. Закон № 296-ФЗ от 02 июля 2021 г. установил, что владельцами углеродных единиц могут быть юридические и физические лица, индивидуальные предприниматели, которые смогут свободно их продавать и покупать на специальном рынке.

Основным производителем углеродных единиц являются карбоновые фермы. Это большие (не менее 1 тыс га) участки земли, занятые высокопродуктивными по биомассе экосистемами, обеспечивающими высокие объёмы поглощения углекислого газа. Причем для обустройства такой фермы подходят практически любые участки, в том числе заброшенные сельхоз земли, места добычи природных ресурсов, промышленные отвалы. Для создания карбоновых ферм необходимо провести лесонасаждение на месте вырубок или пожарищ, на выведенных из использования землях сельхозназначения или на заброшенных территориях. Также, можно обводнять участки территории, чтобы восстановить болота, разводить большие объёмы морских водорослей в прудах [25].

«Низкоуглеродная стратегия» [26], разработанная Минэкономразвития России предусматривает снижение чистой «нетто-эмиссии» парниковых газов за счёт повышения поглотительной способности технологических систем и экосистем с 0,535 млрд тонн в 2019 году до 1,2 млрд тонн в 2050 г. Главным

способом для этого предполагается увеличение поглотительной способности лесов и болот, так как в древесине углерод способен сохраняться в неразложившемся виде десятки лет, а в торфяных отложениях болот – сотни.

Для реализации этой программы Правительство РФ распределило несколько проектов между ведущими научными и образовательными организациями. Целью этих проектов является разработка моделей поглощения парниковых газов экосистемами и методов (в том числе биологических), позволяющих максимизировать фотосинтетическую продукцию биомассы с единицы площади конкретного типа территории или акватории, находящихся в различных климатических зонах.

Для решения этих задач планируется устройство карбоновых полигонов – небольших участков территории с природными или специально сформированными экосистемами, позволяющие изучать сток парниковых газов из атмосферы и отрабатывать способы повышения поглотительной и депонирующей способности биоты и почвы. В феврале 2021 г. для изучения поглощающей способности природных экосистем Минобрнауки РФ была запущена программа устройства карбоновых полигонов в различных уголках России [27]. Карбоновые полигоны (в скобках указан тип территории) создаются или уже созданы в Чеченской Республике (степь, пастбища, горы), Краснодарском крае (море), Ямало-Ненецком автономном округе (лесотундра), Воронежской (смешанный лес, земли сельхозназначения), Калининградской (море, торфяники), Новосибирской (лесостепь, предгорная тайга), Свердловской (таёжный лес) и Тюменской (смешанный лес, водоёмы) областях. Всего в России по гос. программе планируется создать 80 карбоновых полигонов.

Главным в исследованиях поглотительной способности и инвентаризации территорий является обработка больших массивов информации (Big Data), поступающей от космических аппаратов, беспилотных дронов, многозональных видеокамер, наземных датчиков и постов наблюдения. По проекту МГТУ

им. Н.Э. Баумана «**Bauman Go Green**» [28] создан карбоновый полигон (смешанный лес, болота) с системами верхового и низового мониторинга на базе Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Важной задачей создания секвестрационной индустрии является создание сети отечественных экспертных органов, способных проверить достоверность и полноту данных, представленных в отчетах предприятий. Первым получил государственную аккредитацию центр при Российском университете дружбы народов (РУДН). Инновационный технологический центр (ИТЦ) МГТУ им. Н.Э. Баумана был внесен в реестр аккредитованных лиц органов по валидации и верификации парниковых газов 31 января 2022 года [29].

Заключение. Россия «Go Green»

Применение методов увеличения продуктивности производства первичной фотосинтетической биомассы является первым шагом на пути решения части «задачи» Керженцева о необходимости выполнения человечеством функций продуцента в глобальной экосистеме.

Наша страна обладает громадным запасом «углеродных единиц», то есть обладает обширными территориями, занятыми практически не нарушенными хозяйственной деятельностью экосистемами, в первую очередь – таёжными лесами. Россия, обладающая огромным багажом фундаментальных знаний способна пойти путём превращения территории страны в мировой центр экологической стабилизации биосферы, став главным донором природно-экологического потенциала, способного обеспечить глобальный баланс карбонового цикла.

Кроме разработки и внедрения «зелёных» инновационных мероприятий в экономику России можно предложить ещё одно направление – расширение площади территорий, занятых естественными или восстановленными экосистемами, в том числе находящимися в частной собственности. По

оценкам, доля неиспользуемых земель в России составляет от 40 до 60 % их общей площади [30]. Многие из этих участков заросли настолько, что на них вырос густой многолетний вторичный лес. Общая площадь таких «самозалесенных» территорий составляет 100 млн га или 1/10 часть от территории всего Лесного Фонда России.

Таким образом, выражение **Go Green** возможно будет означать не просто внедрение «зелёных» технологий в экономику страны, но и реально, зримо будет отражать то, как постепенно зеленеет Россия, то есть восстанавливает свои нарушенные в прошлом экологические системы, увеличивая площади торфяников, лесов, степей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Липаев А.А. К вопросу об определении понятия «техносфера». Управление техносферой: электрон. журнал, 2023. Т. 6. Вып. 4. С. 490–497. URL: <https://technosphere-ing.ru/ru/technosphere/issue/24/2401/> DOI: [10.34828/UdSU.2023.14.84.001](https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.14.84.001)
2. Ильин А.Н., Данилова И.Ю. Техносфера как основание современной жизни. Управление техносферой: электрон. журнал, 2018. Т. 1. Вып. 2. С. 133–143. URL: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/Ильин_T1-2_2018.pdf
3. Семенова Е.А., Залитова М.В. Техногенное загрязнение экосферы. Управление техносферой: электрон. журнал, 2019. Т. 2. Вып. 4. С. 405–418. URL: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/000564-4_2_4_19_Залитова.pdf
4. Красноперова С.А. Масштабные техногенные воздействия на окружающую природную среду и их последствия. Управление техносферой: электрон. журнал, 2019. Т. 2. Вып. 2. С. 188–199. URL: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/000516-4_статья_Красноперова_2_2_19.pdf
5. Липаев А.А. Материальное обеспечение построения техносферы и экология. Управление техносферой: электрон. журнал, 2018. Т. 1. Вып. 1. С. 4–16. URL: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/статья_Липаев_T1.pdf
6. Акимова Т.А., Хаскин В.В. Экология. Человек – Экономика – Биота – Среда: учебник для студентов вузов. 3-е изд., перераб. и доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2012. 495 с.

7. Вернадский В.И. Биосфера в Космосе. В сборнике «Биосфера и ноосфера». М.: Айрис-пресс, 2007. 576 с.
8. Липаев А.А. Биотехносфера: этапы создания и проблемы управления. Управление техносферой: электрон. журнал, 2019. Т. 2. Вып. 1. С. 1–33. URL: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/1_статья_Липаев_2_1_19.pdf
9. Горшков В.Г. Физические и биологические основы устойчивости жизни. М.: ВИНТИ, 1995. 470 с.
10. Epple C. et al. Managing ecosystems in the context of climate change mitigation: A review. CBD Technical Series. № 86. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2016, 55 p.
11. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С., Рейф И.Е. Перед главным вызовом цивилизации: Взгляд из России. М.: ИНФРА-М, 2005. 224 с.
12. Кароль И.Л., Решетников А.И. Парниковые газы, аэрозоли, климат. Труды ГГО им. А.И. Воейкова, 2014. № 573. С. 5–38.
13. Shindell D.T. et al.: Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations. Atmospheric Chemistry and Physics, 2013, vol. 13, pp. 2939 – 2974.
14. Al-Yasiri Q., Géczi G. Global Warming Potential: Causes and Consequences. Academia Letters, 2021. Article 3202. <https://doi.org/10.20935/AL3202>.
15. Robertson D.S. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Current Science, 2006, vol. 90, no. 12, pp. 1607–1609.
16. Гошка Л.Л. Климатические системы и образование патогенных минералов в организме человека. Инженерно-строительный журнал, 2009. № 2. С. 23–30.
17. Jacobson T.A. et al. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. Nature Sustainability, 2019, vol. 2, no. 2, pp. 691–701.
18. Ткаченко Ю.Л., Гошка Л.Л. «Задача Керженцева» и будущее человечества. Энергия: экономика, техника, экология, 2021. № 9. С. 48–57.
19. Vercelli S. & Lombardi S. CCS as part of a global cultural development for environmentally sustainable energy production. Proceedings of the 9-th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9). Energy Procedia, 2009. Vol. 1 (No. 1), Washington DC, USA, pp. 4835–4841.
20. Тимошенко Д.В., Пассар А.В. Углеродно-нейтральные топлива автомобильных ДВС. Автомобильный транспорт Дальнего Востока, 2021. № 1. С. 232–237.

21. Троицкая Е.В., Артамонов И.В. Пути получения кормового белка методами биотехнологии. *АгроЗооТехника*, 2021. Т. 4. № 1. С. 3(1–14).
22. Шалмагамбетов К.М. Решение проблемы парникового эффекта. *Вестник ФГОУ ВПО МГАУ им. В.П. Горячкина*, 2012. № 1. С. 67–69.
23. На пути к европейской стратегии по созданию биоэкономики замкнутого цикла. Доклад. [Электронный ресурс]. URL: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_fstp5_2017_RU.pdf (дата обращения: 25.03.2024).
24. Митина М.С. Секвестрационная индустрия. *Вестник Академии управления и производства*, 2022. № 1. С. 307–322.
25. Лазарев В.М., Корнеев Д.А. Использование карбоновых ферм для фиксации углекислого газа. *Успехи в химии и химической технологии*, 2021. Т. 35. № 2 (237). С. 7–9.
26. Стратегия социально-экономического развития Российской Федерации с низким уровнем выбросов парниковых газов до 2050 года. Утверждена Распоряжением Правительства РФ № 3052-р от 29 октября 2021 г. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402894476/>. (Дата обращения: 25.03.2024).
27. Карбоновые полигоны. [Электронный ресурс]. URL: <https://www.minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>. (Дата обращения: 25.03.2024).
28. «Приоритет 2030». Стратегические проекты МГТУ им. Н.Э. Баумана. [Электронный ресурс]. URL: <https://bmstu.ru/news/strategicheskie-proekty-mgtu>. (Дата обращения: 25.03.2024).
29. Орган по валидации и верификации парниковых газов (ОВиВПП) Инновационного технологического центра МГТУ им. Н.Э.Баумана (ИТЦ МГТУ им. Н.Э.Баумана). [Электронный ресурс]. URL: https://itc.bmstu.ru/valid_verif_gases.html. (Дата обращения: 25.03.2024).
30. Лесные территории в России теперь можно будет купить. [Электронный ресурс]. URL: <https://nedvio.com/lesnye-territorii-v-rossii-teper-mozhno-budet-kupit/>. (Дата обращения: 25.03.2024).

Поступила в редакцию: 31.05.2024

Сведения об авторах

Ткаченко Юрий Леонидович

кандидат технических наук, доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, Россия.

E-mail: tkachenko_y_1@bmstu.ru

Морозов Сергей Дмитриевич

старший преподаватель кафедры экологии и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, Россия.

E-mail: sergiomorozov@bmstu.ru

Щербакова Ирина Сергеевна

старший преподаватель кафедры экологии и промышленной безопасности, ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (Национальный исследовательский университет)», г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, Россия.

E-mail: i.scherbak@bmstu.ru

Yu.L. Tkachenko, S.D. Morozov, I.S. Scherbakova

SEQUESTRATION INDUSTRY AS AN IMPORTANT PART OF THE CLOSED CYCLE ECONOMY

Annotation. The article deals with the negative impact of wastes of the modern technosphere on the biosphere, the disruption of the global carbon closed cycle caused by this impact and possible solutions to restore the balance of the carbon cycle. The solution of this global problem requires the creation of a separate branch of the world economy - sequestration industry. The regulatory framework created in Russia for the formation of sequestration industry, accounting of carbon units and carbon farms is highlighted. Examples of practical realization of the first projects of carbon landfills for studying the absorption capacity of various ecosystems for the purpose of verification of carbon units are given.

Keywords: technosphere, technosphere waste, carbon dioxide, carbon cycle, carbon landfill, carbon farm, closed-cycle economy.

For citation: Tkachenko Yu.L., Morozov S.D., Shcherbakova I.S. [Sequestration industry as an important part of the closed cycle economy] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2024, vol. 7, issue 2. (In Russ.) Available at: <https://technosphere-ing.ru/> pp. 190–206. DOI: 10.34828/UdSU.2024.96.12.003

REFERENCES

1. Lipaev A.A. K voprosu ob opredelenii ponjatija «tehnosfera» [On defining of the concept «technosphere»]. *Upravlenie tekhnosferoi* [Management of the Technosphere], 2023, vol. 6, iss. 4, pp. 490–497. Available at: <https://technosphere-ing.ru/ru/technosphere/issue/24/2401/> DOI: [10.34828/UdSU.2023.14.84.001](https://doi.org/10.34828/UdSU.2023.14.84.001) (In Russ.).
2. Il'in A.N., Danilova I.Ju. *Tehnosfera kak osnovanie sovremennoj zhizni* [Technosphere as basis of modern life]. *Upravlenie tekhnosferoi* [Management of the Technosphere], 2018. vol. 1, iss. 2, pp. 133–143. Available at: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/Ильин_Т1-2_2018.pdf (In Russ.).
3. Semenova E.A., Zalitova M.V. *Tehnogennoe zagriznenie ekosfery* [The technogenic pollution of the ecosphere]. *Upravlenie tekhnosferoi* [Management of the Technosphere], 2019. vol.2. iss.4, pp. 405–418. Available at: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/000564-4_2_4_19_Залитова.pdf (In Russ.).
4. Krasnoperova S.A. *Masshtabnye tehnogennye vozdejstviya na okruzhajushhuju prirodnuju sredu i ih posledstviya* [The large-scale effects of the technogenic impact on the natural environment and their consequences]. *Upravlenie tekhnosferoi* [Management of the

- Technosphere], 2019, vol. 2, iss. 2. pp. 188–199. Available at: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/000516-4_статья_Красноперова_2_2_19.pdf (In Russ.).
31. Lipaev A.A. *Material'noe obespechenie postroenija tehnosfery i ekologija* [Material support for the construction of the technosphere and ecology]. *Upravlenie tehnosferoi* [Management of the Technosphere], 2018, vol. 1, iss. 1. pp. 4–16. Available at: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/статья_Липаев_Т1.pdf (In Russ.).
 5. Akimova T.A., Haskin V.V. *Ekologija. Chelovek – Ekonomika – Biota – Sreda: uchebnik dlja studentov vuzov, 3-e izd.* [Ecology. Man – Economy – Biota – Environment: textbook for university students, 3-d ed.]. Moscow, UNITI-DANA, 2012. 495 p. (In Russ.).
 6. Vernadskij V.I. *Biosfera v Kosmose / V sbornike «Biosfera i noosfera»* [Biosphere in the Cosmos. In the collection «Biosphere and Noosphere»]. Moscow, Ajris-press, 2007, 576 p. (In Russ.).
 7. Lipaev A.A. *Biotehnosfera: jetapy sozdanija i problemy upravlenija* [The biotechnosphere: stages of establishing and problems of management]. *Upravlenie tehnosferoi* [Management of the Technosphere], 2019, vol. 2, iss. 1, pp. 1–33. Available at: https://technosphere-ing.ru/files/EL-J-MT/1_статья_Липаев_2_1_19.pdf (In Russ.).
 8. Gorshkov V.G. *Fizicheskie i biologicheskie osnovy ustojchivosti zhizni* [Physical and biological bases for the sustainability of life]. Moscow, VINITI, 1995, 470 p. (In Russ.).
 9. Epple C., et al. Managing ecosystems in the context of climate change mitigation: A review. CBD Technical Series. № 86. Montreal: Secretariat of the Convention on Biological Diversity, 2016, 55 p.
 10. Danilov-Danil'jan V.I., Losev K.S., Rejf I.E. *Pered glavnym vyzovom civilizacii: Vzgljad iz Rossii* [Facing the Main Challenge of Civilization: A View from Russia]. Moscow, INFRA-M, 2005, 224 p. (In Russ.).
 11. Karol' I.L., Reshetnikov A.I. *Parnikovy`e gazy`, ae`rozoli, klimat* [Greenhouse gases, aerosols, climate]. *Trudy` GGO im. A.I. Voejkova* [Proceedings of GGO named after A.I. Voyeykov], 2014, no 573, pp. 5–38. (In Russ.).
 12. Shindell D.T. et al.: Radiative forcing in the ACCMIP historical and future climate simulations. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, vol. 13, pp. 2939–2974.
 13. Al-Yasiri Q., Géczi G. Global Warming Potential: Causes and Consequences. *Academia Letters*, 2021. Article 3202. <https://doi.org/10.20935/AL3202>.
 14. Robertson D.S. Health effects of increase in concentration of carbon dioxide in the atmosphere. *Current Science*, 2006, vol. 90, no. 12, pp. 1607–1609.

15. Goshka L.L. *Klimaticheskie sistemy i obrazovanie patogennyh mineralov v organizme cheloveka* [Climate systems and the formation of pathogenic minerals in humans]. *Inzhenerno-stroitel'nyj zhurnal* [Magazine of Civil Engineering], 2009, no. 2, pp. 23–30. (In Russ.).
16. Jacobson T.A. and others. Direct human health risks of increased atmospheric carbon dioxide. *Nature Sustainability*, 2019, vol. 2, no. 2. pp. 691–701.
17. Tkachenko Yu.L., Goshka L.L. «Zadacha Kerzhentseva» i budushhee chelovechestva [«Kerzhentsev's task» and the future of humanity]. *Energija: jekonomika, tehnika, jekologija* [Energy: economy, technique, ecology], 2021, no. 9, pp. 48–57. (In Russ.).
18. Vercelli S. & Lombardi S. CCS as part of a global cultural development for environmentally sustainable energy production. Proceedings of the 9-th International Conference on Greenhouse Gas Control Technologies (GHGT-9). *Energy Procedia*, 2009, vol. 1, no. 1. Washington DC, USA, pp. 4835–4841.
19. Timoshenko D.V., Passar A.V. *Uglerodno-nejtral'nye topliva avtomobil'nyh DVS* [Carbon neutral fuels for automobile internal combustion engines]. *Avtomobil'nyj transport Dal'nego Vostoka* [Road transport in the Far East], 2021, no. 1, pp. 232–237. (In Russ.).
20. Troickaja E.V., Artamonov I.V. *Puti poluchenija kormovogo belka metodami biotekhnologii* [Ways to obtain feed protein by biotechnology methods]. *AgroZooTehnika* [Agro Zoo Technology]. 2021, vol. 4, no. 1, pp. 3 (1–14). (In Russ.).
21. Shalmagambetov K.M. *Reshenie problemy` parnikovogo e`ffekta* [Solving the greenhouse effect]. *Vestnik FGOU VPO MGAU im. V.P. Goryachkina* [Bulletin of V.P. Goryachkin Moscow State Agroengineering University of Higher Professional Education.], 2012, no 1, pp. 67–69. (In Russ.).
22. *Na puti k evropejskoj strategii po sozdaniju biojekonomiki zamknutogo cikla. Doklad* [Towards a European strategy for a closed-loop bioeconomy. Report]. Available at: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_fstp5_2017_RU.pdf. (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).
23. Mitina M.S. *Sekvestracionnaja industrija* [Sequestration industry]. *Vestnik Akademii upravlenija i proizvodstva* [Bulletin of the Academy of Management and Production], 2022, no. 1, pp. 307–322. (In Russ.).
24. Lazarev V.M., Korneev D.A. *Ispol'zovanie karbonovyh ferm dlja fiksacii uglekislogo gaza* [Use of carbon farms for carbon dioxide fixation]. *Uspehi v himii i himicheskoj tehnologii* [Advances in chemistry and chemical technology], 2021, vol. 35, no. 2 (237), pp. 7–9. (In Russ.).

25. *Strategija social'no-jekonomicheskogo razvitija Rossijskoj Federacii s nizkim urovnem vybrosov parnikovyh gazov do 2050 goda. Utverzhdena Rasporjazheniem Pravitel'stva RF № 3052-r ot 29 oktjabrja 2021 g.* [Strategy of socio-economic development of the Russian Federation with low greenhouse gas emissions until 2050. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation No. 3052-r dated October 29, 2021.] Available at: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/402894476/>. (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).
26. *Karbonovye poligony.* [Carbon dioxide polygons]. Available at: <https://www.minobrnauki.gov.ru/action/poligony/>. (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).
27. «*Prioritet 2030*». *Strategicheskie proekty MGTU im. N.E. Baumana.* [«Priority 2030». Strategic projects of BMSTU]. Available at: <https://bmstu.ru/news/strategicheskie-proekty-mgtu> (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).
28. *Organ po validacii i verifikacii parnikovyh gazov (OVivPG) Innovacionnogo tehnologicheskogo centra MGTU im. N.Je. Baumana (ITC MGTU im. N.Je. Baumana)* [The Greenhouse Gas Validation and Verification Authority (GHGVA) of the Innovation Technology Center of Bauman Moscow State Technical University (ITC BMSTU)]. Available at: https://itc.bmstu.ru/valid_verif_gases.html (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).
29. *Lesnye territorii v Rossii teper' možno budet kupit'.* [Forest areas in Russia will now be available for purchase]. Available at: <https://nedvio.com/lesnye-territorii-v-rossii-teper-mozhno-budet-kupit/>. (Accessed: 25.03.2024). (In Russ.).

Received: 31.05.2024

About the Authors

Tkachenko Yuri Leonidovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Department of Ecology and Industrial Safety, N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow, Russia.

E-mail: tkachenko_y_1@bmstu.ru

Morozov Sergey Dmitrievich

Senior Lecturer, Department of Ecology and Industrial Safety, N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5, 2-nd Baumanskaya St., Moscow, Russia.

E-mail: sergiomorozov@bmstu.ru

Irina Sergeevna Scherbakova

Senior Lecturer, Department of Ecology and Industrial Safety, N.E. Bauman Moscow State Technical University (National Research University), 5, 2-nd Bauman St., Moscow, Russia.

E-mail: i.scherbak@bmstu.ru