Техносферология

DOI: 10.35634/UdSU.2026.14.55.003

УДК 502.131.1

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

«МАШИНЫ С БИОЛОГИЧЕСКИМИ БЛОКАМИ» БУДУЩЕЙ ЭКОТЕХНОСФЕРЫ

Аннотация. В статье рассмотрен вопрос о возможной технологической базе природоподобной экотехносферы будущего. Показана необходимость перехода от техносферы с линейным потоком вещества к экотехносфере, построенной на основе ключевого принципа природоподобия – замкнутого круговорота вещества. В качестве первого шага к экотехносфере будущего, возможно формирование циклической биоэкономики, концепция, которой уже разрабатывается учёными. Наиболее подходящими техническими решениями для реализации биоэкономики замкнутого ресурсного цикла можно считать установки, содержащие «живое вещество» биосферы – разнообразные организмы, для которых создаются оптимальные условия жизнедеятельности. Приведены примеры таких «машин с биологическими блоками», разработанных для утилизации газообразных, жидких и твёрдых отходов. Показан возможный потенциал развития биоэкономики и её роль для будущего человечества.

Ключевые слова: техносфера, экотехносфера, природоподобие, биоэкономика, «живое вещество», отходы, биоутилизация золошлаков.

Для цитирования: Ткаченко Ю.Л., Морозов С.Д., Щербакова И.С. «Машины с биологическими блоками» будущей экотехносферы // Управление техносферой: электрон. журнал, 2026. Т. 9. Вып. 3. С. 618 – 637. DOI: 10.35634/UdSU.2026.14.55.003

Введение

В настоящее время человечество формирует цивилизационный ответ на вызовы глобального экологического кризиса. Причиной этого кризиса является существование техносферы – искусственной среды обитания, построенной самим человеком. Такая ситуация возникла вследствие того, что современная техносфера построена на принципах, противоречащих

функционированию естественной среды обитания – биосферы. Например, в процессе эволюции биосферы, фотосинтез биомассы организмов-продуцентов приводил к накоплению кислорода атмосфере и выводу из неё углекислого газа. В техносфере же, на протяжении всей истории её развития, процессы сжигания органического топлива наоборот – потребляли кислород и выбрасывали в атмосферу углекислый газ.

Так же, ещё одним противоречием искусственной и естественной среды обитания является линейный поток вещества в техносфере и замкнутый круговорот химических элементов в биосфере. Это привело к поступлению в планетарную среду обитания различного рода твёрдых, жидких и газообразных отходов. Очевидными последствиями накопления отходов техносферы является образование протяжённых аномалий в природных средах, в которых изменён их сложившийся естественный химический состав, что оказывает негативное воздействие на жителей таких зон, приводящее к повышению заболеваемости и смертности.

Другим аспектом негативного воздействия на биосферу является связывание в отходах техносферы химических элементов, необходимых для жизнедеятельности всех обитателей Земли. Как отмечал А.С. Керженцев, избыток отходов жизнедеятельности человека достиг таких размеров, что сформировал совершенно новый вид вещества на планете – третичную антропогенную продукцию [1]. Она включает бытовые, промышленные и сельскохозяйственные отходы, искусственные материалы и вещества, отработавшие ресурс машины и механизмы, здания и сооружения, то есть всё, что создано человеком для обеспечения комфортной жизни. Этот особый класс веществ не поддаётся естественному процессу разложения и преобразования силами природных организмов-редуцентов и, потому они накапливаются в биосфере, выводя большие массы химических элементов из потоков биологического круговорота и надолго консервируют их в третичной

антропогенной продукции.

Без необходимых ресурсов, дальнейшее существование биосферы и соответственно, выживание человечества, находятся под вопросом. Однако биосфера Земли успешно преодолевала все возникающие на её пути эволюционные барьеры. Для выхода на очередную ступень развития, биосфера совершала ряд «изобретений», позволяющих устранить ограничивающие факторы. Высшим достижением эволюции жизни на современном этапе А.С. Керженцев называл экосистему, для создания которой был введён ряд инноваций, среди которых наиболее значимыми являются: смена видового состава биоценоза для адаптации экосистем к внешним воздействиям, увеличение биоразнообразия для максимизации биомассы экосистемы в процессе периодических колебаний климатических условий, гумификация и кристаллизация отходов метаболизма экосистемы для депонирования биофильных химических элементов и захоронения токсичных веществ [2].

Таким образом, для преодоления экологического кризиса, человечество должно опираться на опыт биосферы и действовать совместно с биосферой. Этот процесс Н.Н. Моисеев называл «коэволюцией» – совместной эволюцией биосферы и человечества на взаимовыгодных условиях [3]. Для осуществления коэволюции, человечеству необходимо «учиться у биосферы», как строить свою искусственную среду обитания – техносферу.

1. Основной принцип природоподобия

Современная техносфера не способна преодолеть сложившийся эволюционный барьер сокращения запаса биофильных элементов, связанных в третичной антропогенной продукции. Вероятно, преодолеть проблему экологического кризиса возможно только с техносферой нового типа, построенной по принципу природоподобия, то есть функционирующей по тем же правилам, что и биосфера. Такая искусственная среда обитания может быть

названа экотехносферой.

Первым шагом на пути к экотехносфере, который можно сделать уже сейчас, является переход к экономике замкнутого ресурсного цикла, или циклической экономике, концепция которой впервые была предложена британским экономистом Кейт Раворт в своей книге [4]. Циклическая экономика является альтернативой линейной экономике, основанной на принципе «ресурсы – товары – отходы». Экономика замкнутого цикла работает по принципу «ресурсы-товары-отходы-ресурсы», поэтому её часто называют экономикой неограниченных ресурсов.

Циклическая экономика позволяет придать техносфере одно из главных свойств природоподобия – замкнутость потоков вещества. Использование свойств «живого вещества», позаимствованного в биоценозах биосферы или искусственно воспроизведённого позволит сократить время, которое будет затрачено на разработку физико-химических технологий. Поэтому, в настоящее время уже предложена концепция циклической биоэкономики [5]. Важной отличительной особенностью концепции циклической биоэкономики является то, что в ней ведущая роль отводится региональным экосистемам биосферы, которые формируют природно-экологический потенциал, в том числе возобновляемые ресурсы биомассы. Ключевой подход здесь состоит в том, чтобы использовать природно-экологический потенциал «живого вещества» биосферы и интегрировать его в биоэкономику замкнутого цикла.

2. Опыт создания систем с замкнутым потоком вещества

Впервые, использовать принцип природоподобия для создания среды обитания человека, предложил К.Э. Циолковский, применительно к жизнеобеспечению экипажей межпланетных кораблей и жителей космических поселений. В начале 20-го века он описал принципы построения орбитальной станции, рассчитанной на 1000 жителей [6] Для воспроизводства кислорода,

очистки воды, переработки отходов и получения пищи Циолковский предложил использовать земные растительные виды, например банановые пальмы и плантации злаков и корнеплодов.

В 1962 г. С.П. Королёв сформулировал комплекс первоочередных задач космической биотехнологии, поставив перед научными и производственными коллективами практическую задачу по разработке «оранжереи по Циолковскому», с наращиваемыми постепенно биологическими звеньями или блоками. В 1964 г. началось практическое создание замкнутых искусственных экологических систем, включающих в свой круговорот вещества метаболизм человека. В Красноярске, в Институте биофизики Сибирского отделения Академии наук СССР стартовала работа по подготовке к эксперименту «Биос».

В 1972 г. на установке «Биос-3» были начаты работы с проведением многомесячных экспериментов по полной изоляции людей от внешней среды. Установка «Биос-3», которая работоспособна и в настоящее время, представляет собой герметичное помещение объёмом 315 куб.м. Внутреннее пространство установки разделено на четыре отсека: два предназначены для выращивания высших растений методом гидропоники, один отсек занимают культиваторы хлореллы для производства кислорода и очистки воды, а последний отсек служит жилым помещением.

Всего на установке «Биос-3» было проведено десять экспериментов-заселений разной продолжительности. Самый длительный эксперимент по полной непрерывной изоляции людей продолжался 180 суток – с 24 декабря 1972 г. по 22 июня 1973 г. Все эксперименты были успешными, программы научных исследований были выполнены полностью, параметры внутренней среды в установке оставались благоприятными для жизни.

Наиболее близким к проекту «Биос» является китайская установка «Юэгун-1» (Лунный дворец) [7]. Комплекс моделирует замкнутую экологическую систему жизнеобеспечения лунной базы. Экспериментальная

установка «Юэгун-1» общей площадью около 160 м^2 и объемом 500 м^3 состоит из трех модулей полуцилиндрической формы. Первый модуль – интегрированный рабочий и жилой модуль, имеющий в своем составе рабочую зону, кают-компанию, три каюты, помещение личной гигиены, блок переработки отходов и отсек для насекомых.

Два модуля, каждый из которых разделен на две изолированные секции, представляют собой оранжереи для выращивания растений. Первый полномасштабный эксперимент начался 3 февраля 2014 г. В нем участвовали трое добровольцев. 20 мая 2014 г. по окончании 105-суточного эксперимента первый китайский экипаж успешно завершил эксперимент и вышел из изоляции в экспериментальной установке «Юэгун-1».

Успех создания биорегенеративных систем жизнеобеспечения «БИОС-3» и «Юэгун-1» объясняется научно-инженерным подходом к их проектированию. Как отмечают авторы работы [8], при разработке установки «БИОС-3» заранее рассчитывалась продуктивность и эффективность работы всех звеньев, поэтому система строилась как «машина с биологическими блоками». Задача людей в такой искусственной экосистеме сводится к повседневному управлению «машиной жизнеобеспечения» и её блоками в тех процессах, которые не поддаются автоматизации. Опыт разработки техники и технологий для систем жизнеобеспечения, работающих по природоподобному принципу замкнутости внутренних потоков вещества, может быть востребован при формировании замкнутой биоэкономики и всей техносферы будущего в целом.

3. Техника и технологии циклической биоэкономики

Переработка метана с получением меприна. В настоящее время уже разработана и используется технология получения кормового белка (гаприна) непосредственно из газовой фазы ископаемого природного газа. Однако возможности применения этой технологии в циклической биоэкономике гораздо

шире. Кормовой белок (меприн) можно получать так же из газовой фазы вредных выбросов полигонов твёрдых отходов производства и потребления и других источников его выделения. Свалочный газ (биогаз) состоит по объёму примерно из 50–75 % метана, 25–50 % углекислого газа, а также небольшого количества азота, кислорода, паров воды, водорода, монооксида углерода, сероводорода, аммиака, формальдегида, меркаптана.

Известны штаммы бактерий, которые синтезируют кормовой белок из газовой фазы смеси метана и кислорода, так как являются метанокисляющими бактериями-метанотрофами. Эти микроорганизмы обладают высокой скоростью накопления биомассы, которая в 500 раз выше, чем у растений и в 1000 раз выше, чем у сельскохозяйственных животных [9]. Метанотрофные бактерии массой 500 кг способны производить до 1,5 т белка в сутки.

В работе [10] описана установка получения кормового белка из свалочного газа полигона Торбеево. «Биологическим блоком» технологической системы является ферментёр – аппарат для создания благоприятных условий жизнедеятельности метанотрофов, осуществляющих биохимические процессы синтеза белка. Белковая биомасса метанотрофов включает в себя в определённых пропорциях углерод, водород, кислород, азот и фосфор, поэтому, кроме подачи в ферментёр метана и воздуха, содержащего кислород, так же необходимо подавать питательную смесь, в которой содержится раствор H_3PO_4 и NH_4OH в качестве источников фосфора и азота.

Для получения белка в ферментёре возможно использование известных штаммов бактерий-метанотрофов, защищённых патентами и депонированных во Всероссийской Коллекции Промышленных Микроорганизмов (ВКМ): Methylocystis parvus (ВКМ В-2129), Methylosinus sporium (ВКМ В-2123), Methylosinus trichosporium (ВКМ В-2117) и других.

Общее количество образующегося биогаза на полигоне «Торбеево» составляет 600 куб. м/ч. При содержании метана в биогазе 50 % по объёму

и удельном расходе метана 2 $м^3$ на 1 кг меприна, возможно получать до 150 кг продукта в час (3,6 т/сут). Одна тонна биомассы микроорганизмов (в сухом виде) дает возможность экономить до 7 т зерна и дополнительно производить 0,8 т свинины, 5 т мяса птицы или до 15 тыс. штук яиц. Таким образом, предотвращаются выбросы в атмосферу вредных компонентов свалочного газа, одновременно с возможностью получения ценных пищевых ресурсов как для человека, так и для других живых организмов.

Биологическая очистка сточных вод с получением органоминеральных удобрений. Достаточно широко применяется способ аэробной биологической очистки сточных вод при помощи аэротенков [11, 12], Этот элемент является «биологическим блоком» очистных систем. Биологический метод очистки сточных вод основан на способности организмов, в процессе жизнедеятельности использовать органические загрязнения в качестве источника питания. В итоге, в результате биологической очистки органические загрязнения сточных вод превращаются в простые продукты окисления: H_2O, CO_2, NO^{3-}, SO_4^{2-} и многие другие.

При оптимальной работе аэротенка, в нём со временем формируется разнообразный биоценоз. Организмы, заселяющие биоценоз, получают из сточных вод всё необходимое для своей жизнедеятельности. Видовой состав биоценоза активного очень разнообразен, в нём встречаются как представители микрофлоры (гетеротрофные бактерии и цианобактерии, грибы, одноклеточные водоросли), так и микрофауны: одноклеточной (жгутиконосцы, саркодовые, инфузории, амёбы) и многоклеточной (черви, коловратки, тихоходки, водные клещи класса паукообразных) [13]. Участники биоценоза выделяют во внутреннюю среду аэротенка продукты обмена веществ, формируя активный ил – смесь биомассы микроорганизмов и продуктов окисления органических веществ сточных вод.

Вещество активного ила на 70% состоит из живых организмов и на 30 % из твердых частиц неорганической природы. При соответствующей обработке, активный ил может служить источником вторичных ресурсов. Как показано в работе [14], подготовка активного ила к повторному использованию включает в себя механическое или термическое обезвоживание, флотационное уплотнение, анаэробное и аэробную микробиологическую стабилизацию, термореагентное кондиционирование.

Далее, обработанный активный ил может быть использован в энергетике путём сжигания и пиролиза или в качестве сырья для получения стройматериалов (выгорающие добавки и пластификаторы в производстве керамического кирпича, заполнители и корректирующие добавки в производстве бетона, армирующий компонент в композитных материалах на основе полипропилена, заполнитель в резиновых композитах и др.).

В работе [15] показано, как с помощью компостирования и вермикультивирования из обработанных осадков активного ила, возможно, получить ценное органоминеральное удобрение. Для этого требуется дополнительная обработка активного ила с целью удаления возможных примесей тяжелых металлов. Сделать это возможно, например, с помощью биологических методов десорбции [16].

Биологическая утилизация золы и шлаков угля с получением минеральных растворов. По данным на 2018 год, в мире накоплено около 11,5 млрд. тонн золошлаковых отходов тепловых электростанций, из них в России – 2 млрд. т, размещенных на территориях, превышающих в сумме 22 000 гектар [17]. Ежегодно к ним добавляется ещё 90 млн. тонн таких отходов. Золошлаковые отходы очень сильно различаются по физическим, химическим, гранулометрическим характеристикам, ввиду большого разнообразия видов твердого топлива и различных процессов его сжигания. Поэтому утилизация золошлаков затруднена.

Золошлаковые отвалы с размещёнными на них отходами являются источниками негативного воздействия на природные среды, растительный и животный мир. Загрязнение атмосферного воздуха происходит при рассеивании пылевидных частиц золы с поверхности золошлаковых отвалов. Загрязнение грунтовых и поверхностных водных источников вредными химическими веществами может происходить при попадании дождевых и талых вод, которые вымывают токсичные соединения из золошлаков.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана создана установка [18] для бактериальной биоутилизации техногенных золошлаковых отходов, с возможностью выщелачивания редкоземельных металлов в качестве вторичных ресурсов (патент RU 2537631 C1). Технологическая установка по переработке золошлаков включает в себя «биологический блок» – аппарат для накопления биомассы микроорганизмов в жидкой среде, содержащей техногенные отходы.

В качестве аппарата для накопления биомассы микроорганизмов используется резервуар с турбинной мешалкой, аэрацией внутренней камеры и выносным контуром охлаждения. Для выщелачивания металлов используется многокамерный флотационный аппарат с устройствами перетока жидкой среды с техногенными отходами из камеры в камеру. В установке так же имеется блок регенерации выщелачивающих растворов, что позволяет получать на выходе пульпу, из которой с помощью реагентного метода можно отделить чистые минеральные растворы и небольшое количество твёрдого осадка, который возможно использовать, например, в качестве вторичного сырья для производства стройматериалов.

В резервуар накопления биомассы подаётся культуральная жидкость, содержащая серо- и железоокисляющие микроорганизмы. Как указывают авторы работы [19] для оптимальной работы установки было подобрано смешанное сообщество, состоящее из ацидофильных хемолитотрофных бактерий. В процессе метаболизма эти микроорганизмы окисляют соединения серы

и закисного железа, которые служат им источниками энергии для жизнедеятельности. В качестве бактериальной культуры в технологической установке используется сообщество, включающее в себя биологические виды *Acidithiobacillus ferrooxidans, Acidithiobacillus thiooxidans*, а также бактерии родов *Sulfobacillus u Leptospirillum*.

4. Потенциал биоэкономики замкнутого цикла

Приведённая информация показывает, что непрерывно увеличивается количество разработок образцов техники, в которой используется «живое вещество» – различные биологические организмы, для которых создаются оптимальные условия жизнедеятельности. Поэтому можно говорить о формировании тренда на развитие не только новой группы технологий, но и новой сферы индустрии и отрасли экономики. Условно эту отрасль можно назвать «утилизационной промышленностью», которая может обеспечить получение различных ресурсов путём переработки отходов техносферы. Но потенциальные возможности «машин с биологическими блоками» гораздо шире, чем утилизация образующихся отходов техносферы. Опыт эксперимента БИОС показывает возможность организации в биоэкономике непрерывного цикла воспроизводства необходимых людям ресурсов, в первую очередь – пищевых.

Решение такой задачи стало бы реализацией идеи В.И. Вернадского об автотрофности человечества. В работе с таким названием [20] он писал о необходимости изменить форму питания и вид источников энергии, используемых людьми. Человечество вполне способно освободить канал естественного фотосинтеза на основе Солнечного излучения, оставив биосфере всю производимую растениями-продуцентами первичную биомассу и перейти к фото и биосинтезу пищи путём конверсии энергии от различных источников, отказавшись, в том числе и от теплоэнергетики, основанной на сжигании

ископаемого органического топлива. В начале 20-го века В.И. Вернадский отмечал не только возможность применения атомной энергии, но и перечислял практически все источники, которые в наше время использует альтернативная энергетика: силу приливов и морских волн, ветра, теплоту Земли, и т.д.

Для достижения этой цели необходимо изучать принципы работы природной среды. Например, при разработке описанной выше технологической установки для переработки золошлаковых отходов, разработчики провели подбор микроорганизмов для неё на золоотвалах тепловой электростанции г. Алексин (Тульская область). Оказалось, что спонтанно сформировавшаяся аборигенная микрофлора золоотвалов уже перерабатывает несгоревшие остатки углей, переводя твердую фазу отходов в растворенное состояние, пригодное для извлечения другими живыми организмами, в первую очередь растениями, необходимых им химических элементов. Задача разработчиков заключалась в создании внутри технологической установки наиболее благоприятных для подобранных микроорганизмов условий жизнедеятельности, чтобы они «работали» быстрее. На открытой местности жизнедеятельность микроорганизмов угнетается сезонными колебаниями климатических факторов. В «биологическом блоке» можно постоянно поддерживать одни и те же параметры среды, что позволить микрофлоре «работать» с постоянной производительностью.

Заключение

Использование технических систем с биологическими блоками открывает путь не только к формированию циклической биоэкономики, но и для перехода к природоподобной экотехносфере. Критерием природоподобия может служить величина замкнутости потоков вещества в техносфере. Чем больше индекс замкнутости внутреннего круговорота техногенного вещества, тем выше экологическое совершенство техносферы. Для разработки теоретических основ создания такой среды А.А. Липаев в работе [21] предлагает

сформировать новое научное направление – техносферологию. Новое научное направление на основе экологических знаний должно будет разрабатывать природоподобные технологии построения экотехносферы.

Получение новых знаний о принципах функционирования природной среды позволит расширить задачи «утилизационной промышленности» техносферы. Человечеством должна осуществляться не только переработка текущих отходов, но и ликвидация накопленного ущерба биосфере. Для сохранения жизни на Земле и для своего выживания в будущем человечество обязано вернуть в глобальный круговорот необходимые другим живым существам химические элементы.

В настоящее время большой объём химических элементов омертвлен в накопленной третичной антропогенной продукции, образующих техногенные аномалии с изменённым составом воздушной, водной, почвенной среды, включая территории радиоактивного загрязнения. Для жизни и работы людей в зонах геохимических аномалий в процессе их ликвидации, можно использовать замкнутые биорегенеративные системы жизнеобеспечения, которые защитят жителей от внешнего химического, радиационного и климатического воздействия, так как внутри среды обитания в круговоротах будет преобразовываться чистое вещество, свободное от загрязнений. Система изоляции внутренней среды от внешних воздействий так же позволит обеспечить благоприятный климат в искусственной среде обитания.

Разумеется, экотехносфера не подразумевает жизнь всего человечества под куполом изолированной от биосферы среды обитания. Достаточно грамотно организовать взаимоподдерживающие потоки обмена энергией и веществом как внутри экотехносферы, так и между экотехносферой и биосферой. Чтобы вести дальнейшую экспансию биосферы, нужно уметь её воспроизводить в различных внешних условиях. Для этого сначала нужно освоить в земных условиях создание полностью замкнутой по веществу природоподобной искусственной

среды обитания людей, растений, животных, насекомых и микроорганизмов, а затем применить полученные разработки на соседних космических телах Солнечной системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Керженцев А.С. Бесконфликтный переход биосферы в ноосферу – разумный выход из экологического кризиса // Вестник РАН, 2008. Т. 78. № 6. С. 513–520.
2. Керженцев А.С. «Изобретения» эволюции на уровне экосистем / «Функциональная экология», 2016. [Электронный ресурс]. URL: https://functecology.ucoz.ru/blog/izobretenija_ehvoljucii_na_urovne_ehkosistem/2016-02-19-9. (Дата обращения 27.03.2026).
3. Моисеев Н.Н. Коэволюция природы и общества. Пути ноосферогенеза // Экология и жизнь. 1997. № 2–3. С. 4–7.
4. Raworth K. Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist. Chelsea Green Publishing, Chelsea, Vermont, USA, 2017.
5. Hetyäkki L., Hanevinkel M., Muis B. et al. Towards a European strategy for a circular bioeconomy, 2017. URL: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_fstp5_2017_RU.pdf. (Accessed 29.03.2026).
6. Tkachenko Y.L., Morozov S.D., Shcherbakova I.S. K.E.Tsiolkovsky and S.P.Korolev at the Sources of Creating Artificial Ecosystems. AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: dedicated to the memory of academician S.P. Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration. Editors: Evgeny A. Mikrin, Dmitry O. Rogozin, Anatoly A. Aleksandrov et al, 2019. С. 020001. DOI: 10.1063/1.5133164.
7. Павельцев П. «Юэгун-1» – наследник проекта БИОС-3 // Новости космонавтики, 2014. Т. 24. № 7. С. 63–65.
8. Хлебопрос Р.Г., Фет А.И. Природа и общество: Модели катастроф / Новосибирск: Сибирский хронограф, 1999. 344 с.
9. Троицкая Е.В., Артамонов И.В. Пути получения кормового белка методами биотехнологии // Агрозоотехника, 2021. № 4(1). С. 1–14. DOI: 10.15838/alt.2021.4.1.3.
10. Луканин А.В., Харламова М.Д., Левин А.А. и др. Производство белково-витаминной добавки (гаприн) на основе свалочных газов полигонов ТКО // Экология и промышленность России, 2023. № 27(3). С. 4–11. DOI: 10.18412/1816-0395-2023-3-4-11.

11. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Таранов Р.А. и др. Разработка инженерных решений по модернизации очистных сооружений машиностроительного предприятия // Экология и промышленность России. 2025. № 29(4). С. 4–8. DOI: 10.18412/1816-0395-2025-4-4-8.
12. Ksenofontov B.S., Bondarenko A.V. Wastewater Treatment of Space Machine-Building Enterprises Using Immobilized Microorganisms. AIP Conference Proceedings, 2023, 2549(1): 210027. DOI:10.1063/5.0107989.
13. Великоредчанина Е.О. Чикишева Е.С., Киреева А.В. Видовое разнообразие организмов активного ила, характеризующих работу сооружений биологической очистки сточных вод ООО «Коммунальщик» / Биодиагностика состояния природных и природно-техногенных систем: материалы XVI Всероссийской научно-практ. конф. с межд. участием. Книга 1. (г. Киров, 3–5 декабря 2018 г.), отв. ред. Т.Я. Ашихмина. Киров: ВятГУ, 2018. 324 с.
14. Исхакова Р.Я., Нургалиев А.И. Обезвоживание и экологически безопасная термическая переработка избыточного активного ила // Безопасность техногенных и природных систем. 2024. № 8(2). С. 26–36. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36.
15. Ксенофонтов Б.С. Утилизация осадков сточных вод путем компостирования с торфом // Экология промышленного производства, 2020. № 2(110). С. 20–24.
16. Kozodaev A.S., Samoylova A.A. Mathematical modeling of heavy metal ion bisorption process by activated sludge. AIP Conference Proceedings, 2023. 2833(1): 70009. DOI:10.1063/5.0152033.
17. Пичугин Е.А. Аналитический обзор накопленного в Российской Федерации опыта вовлечения в хозяйственный оборот золошлаковых отходов теплоэлектростанций // Проблемы региональной экологии, 2019. № 4. С. 77–87. DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
18. Ксенофонтов Б.С., Козодаев А.С., Буторова И.А. и др. Разработка комплексной технологии выщелачивания редкоземельных металлов из угольной золы // Экология и промышленность России, 2015. № 19(4). С. 10–14. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-4-10-14.
19. Ксенофонтов Б.С., Буторова И.А., Козодаев А.С. и др. Золошлаки – перспективное сырье для получения редкоземельных металлов // Экология и промышленность России, 2014. № 4. С. 9–13. https://doi.org/10.18412/1816-0395-2014-4-9-13.
20. Владимир Вернадский: Жизнеописание. Избранные труды. Воспоминания современников. Суждения потомков. М.: Современник, 1994. 688 с.
21. Липаев А.А. О создании новой науки «техносферологии» // Управление техносферой:

электрон. журнал, 2025. Т. 8. Вып. 2. С. 143–155. DOI: 10.35634/UdSU.2025.52.76.001.

Поступила в редакцию: 27.08.2026

Сведения об авторах

Ткаченко Юрий Леонидович
к.т.н., доцент кафедры экологии и промышленной безопасности, ФГАОУ ВО «Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», г. Москва, ул. 2-ая Бауманская, 5, Россия.
E-mail: tkachenko_y_l@bmstu.ru

Морозов Сергей Дмитриевич
старший преподаватель кафедры экологии и промышленной безопасности, ФГАОУ 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, ФГАОУ 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

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

"MACHINES WITH BIOLOGICAL BLOCKS" OF THE FUTURE ECOTECHNOSPHERE

Annotation. The article examines the potential technological foundation for a nature-like ecotechnosphere of the future. The necessity of transitioning from a technosphere with a linear flow of matter to an ecotechnosphere built on the basis of the key principle of nature-likeness – the closed circulation of matter – is shown. As a first step toward the ecotechnosphere of the future, the formation of a circular bioeconomy is possible, a concept that is already being developed by scientists. The most suitable technical solutions for implementing a bioeconomy with a closed resource cycle can be considered installations containing the "living matter" of the biosphere – various organisms for which optimal conditions for vital activity are created. Examples of such "machines with biological blocks" developed for the utilization of gaseous, liquid, and solid waste are given. The possible potential for the development of the bioeconomy and its role for the future of humanity is shown.
Keywords: technosphere, ecotechnosphere, nature-like, bioeconomics, «living matter», waste, and bio-utilization of ash and slag.

For citation: Tkachenko Yu.L., Morozov S.D., Shcherbakova I.S. [«Machines with biological blocks» of the future eco-technosphere] *Upravlenie tekhnosferoi*, 2026, vol. 9, issue 3. pp. 618 –637. DOI: 10.35634/UdSU.2026.14.55.003

REFERENCES

1. Kerzhentsev A.S. *Beskonfliktnyj perekhod biosfery v noosferu – razumnyj vyhod iz ekologicheskogo krizisa* [Conflict-free transition of the biosphere into the noosphere – a reasonable solution to the environmental crisis.] *Vestnik RAN* [Bulletin of the Russian Academy of Sciences], 2008, vol. 78, no.6, pp: 513–520. (In Russ.).
2. Kerzhentsev A.S. *«Izobreteniya» evolyucii na urovne ekosistem* [«Inventions» of Evolution at the Ecosystem Level], 2016. Available at: https://functecology.ucoz.ru/blog/izobretenija_ehvoljucii_na_urovne_ehkosistem/2016-02-19-9. (Accessed 27.03.2026). (In Russ.).
3. Moiseev N.N. *Koevolyuciya prirody i obshchestva. Puti noosferogeneza* [Coevolution of Nature and Society. Ways of Noospherogenesis.] *Ekologiya i zhizn'* [Ecology and Life], 1997, no. 2–3, pp: 4–7. (In Russ.).
4. Raworth K. Doughnut Economics: Seven Ways to Think Like a 21st-Century Economist. Chelsea Green Publishing. Chelsea. Vermont. USA, 2017.

5. Hetyäkki L., Hanevinkel M., Muis B. et al. Towards a European strategy for a circular bioeconomy, 2017. Available at: https://efi.int/sites/default/files/files/publication-bank/2019/efi_ fstp5_2017_RU.pdf. (Accessed 29.03.2026).
6. Tkachenko Y.L., Morozov S.D., Shcherbakova I.S. K.E.Tsiolkovsky and S.P.Korolev at the Sources of Creating Artificial Ecosystems. AIP Conference Proceedings. XLIII Academic Space Conference: dedicated to the memory of academician S.P.Korolev and other outstanding Russian scientists – Pioneers of space exploration. Editors: Evgeny A. Mikrin, Dmitry O. Rogozin, Anatoly A. Aleksandrov et al, 2019, pp. 020001. DOI: 10.1063/1.5133164.
7. Pavel'cev P. *«Yuegun-1» – naslednik proekta BIOS-3* [«Yuegun-1» – heir of the project BIOS-3] *Novosti kosmonavtiki* [Cosmonautics News], 2014, vol. 24, no. 7, pp. 63–65. (In Russ.).
8. Khleboros R.G., Fet A.I. *Priroda i obshchestvo: Modeli katastrof* [Nature and Society. Models of Catastrophes.]. *Sibirskij hronograf* [Siberian Chronograph]. Novosibirsk, 1999. (In Russ.).
9. Troitskaya E.V., Artamonov I.V. *Puti polucheniya kormovogo belka metodami biotekhnologii* [Methods of obtaining feed protein using biotechnology.]. *Agrozootekhnika* [Agrozootechnics], 2021, no(1), pp. 1–14. (In Russ.). DOI: 10.15838/alt.2021.4.1.3.
10. Lukanin A.V., Kharlamova M.D., Levin A.A. et al. *Proizvodstvo belkovo-vitaminnoj dobavki (gaprin) na osnove svalochnyh gazov poligonov TKO* [Production of Protein-Vitamin Supplement (Gaprin) Based on Landfill Biogas.]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2023, no. 27(3). pp. 4–11. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2023-3-4-11.
11. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Taranov R.A. et al. *Razrabotka inzhenernyh reshenij po modernizacii ochistnyh sooruzhenij mashinostroitel'nogo predpriyatiya* [Development of Engineering Solutions for the Modernization of Sewage Treatment Plants of a Machine-building Enterprise.] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2025, no. 29(4), pp. 4–8. (In Russ.). DOI: 10.18412/1816-0395-2025-4-4-8.
12. Ksenofontov B.S., Bondarenko A.V. Wastewater Treatment of Space Machine-Building Enterprises Using Immobilized Microorganisms. AIP Conference Proceedings, 2023. 2549(1): 210027. DOI:10.1063/5.0107989.
13. Velikoredchanina E.O., Chikisheva E.S., Kireeva A.V. *Vidovoe raznoobrazie organizmov aktivnogo ila, harakterizuyushchih rabotu sooruzhenij biologicheskoj ochistki stochnyh vod OOO «Kommunal'shchik»* [Species diversity of activated sludge organisms that characterize the operation of biological wastewater treatment facilities at «Kommunalshchik» LLC.]. Materials of the XVI All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation

«Biodiagnostics of Natural and Natural-Technogenic Systems», Vyatka State University, Kirov, 3-5 December 2018. Book 1. Edited by T.Ya.Ashikhmin. (In Russ.).

14. Iskhakova R.Ya., Nurgaliev A.I. *Obezvozhivanie i ekologicheski bezopasnaya termicheskaya pererabotka izbytochnogo aktivnogo ila* [Dewatering and environmentally friendly thermal processing of excess activated sludge.] *Bezopasnost' tekhnogennyh i prirodnyh sistem* [Safety of Technogenic and Natural Systems], 2024, no. 8(2), pp. 26–36. (In Russ.). https://doi.org/10.23947/2541-9129-2024-8-2-26-36/
15. Ksenofontov B.S. *Utilizaciya osadkov stochnyh vod putem kompostirovaniya s torfom* [Utilization of wastewater sludge by composting with peat.] *Ekologiya promyshlennogo proizvodstva* [Ecology of Industrial Production], 2020, no. 2(110), pp. 20–24. (In Russ.).
16. Kozodaev A.S., Samoylova A.A. Mathematical modeling of heavy metal ion bisorption process by activated sludge. AIP Conference Proceedings, 2023. 2833(1): 70009. DOI:10.1063/5.0152033.
17. Pichugin E.A. *Analiticheskij obzor nakoplennogo v Rossijskoj Federacii opyta vovlecheniya v hozyajstvennyj oborot zoloshlakovyh othodov teploelektrostancij* [Analytical review of the experience accumulated in the Russian Federation in the economic use of ash and slag waste from thermal power plants.] *Problemy regional'noj ekologii* [Problems of Regional Ecology], 2019, no.4, pp. 77–87. (In Russ.). DOI: 10.24411/1728-323X-2019-14077.
18. Ksenofontov B.S., Kozodaev A.S., Butorova I.A. et al. *Razrabotka kompleksnoj tekhnologii vyshchelachivaniya redkozemel'nyh metallov iz ugol'noj zoly* [Development of a comprehensive technology for leaching rare-earth metals from coal ash.] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2015, no.19(4), pp. 10–14. (In Russ.).
19. Ksenofontov B.S., Butorova I.A., Kozodaev A.S. et al. *Zoloshlaki – perspektivnoe syr'e dlya polucheniya redkozemel'nyh metallov* [Ash and slag waste is a promising raw material for producing rare-earth metals.] *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2014, no. 4, pp. 9–13. (In Russ.).
20. *Vladimir Vernadskij: Zhizneopisanie. Izbrannye trudy. Vospominaniya sovremennikov. Suzhdeniya potomkov* [Vladimir Vernadsky: Biography. Selected Works. Memories of Contemporaries. Opinions of Descendants]. Moscow Russia, 1994, 688 p. (In Russ.).
21. Lipaev A.A. *O sozdanii novoj nauki «tekhnosferologii»* [On the Creation of a New Science of Technospherology.] Technosphere Management: Electronic Journal, 2025, vol. 8, issue 2, pp. 143 – 155. (In Russ.). DOI:10.35634/UdSU.2025.52.76.001.

Received: 27.08.2026

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_l@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