

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ

В статье содержится призыв объединить интеллектуальные усилия и материальные возможности для создания системы экологической защиты от негативных воздействий хозяйственной деятельности человека. Кроме проблемы природопользования автор обсуждает и другие темы, в частности создание автономной системы жизнеобеспечения и разработку научно-методических и технологических принципов бесконфликтного перехода биосферы с ноосферу.

МЕХАНИЗМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ПОЧВЫ И УСТОЙЧИВОСТЬ ЭКОСИСТЕМ

А.С. Керженцев

Современная биосфера находится под угрозой экологического кризиса, главным виновником которого является человек и его хозяйственная деятельность. Парадокс в том, что именно человек, этот самый молодой биологический вид, может первым выпасть из состава биоты, поскольку не способен адаптироваться к среде обитания иного качества. Окружающая человека среда поддерживается в стабильном состоянии благодаря метаболизму глобальной экосистемы (биосферы) – циклическому механизму её функционирования [1].

Метаболизм экосистемы представляет собой симбиотическое взаимодействие фитоценоза (растительности) и педоценоза (почвы), которые обмениваются продуктами (отходами) жизнедеятельности. Фитоценоз выполняет функцию анаболизма – синтеза биомассы из минеральных элементов, а педоценоз – функцию катаболизма – утилизации отмершей биомассы в минеральные элементы. Симбиоз компонентов образует самую рентабельную систему взаимного жизнеобеспечения.

В научно-исследовательской практике симбионты существуют раздельно. Функция фотосинтеза изучается почти 200 лет, современные специалисты работают на молекулярном уровне

в пикосекундном масштабе времени. Функция катаболизма только обозначена как объект исследования, не имеющего пока ни методологии, ни экспериментальной базы. А знания “физиологии почв” уже давно востребованы жизнью.

Почва – уникальный и весьма сложный объект исследований. Определение почвы как объекта труда и средства производства связано со временем зарождения земледелия. От первого этапа сохранилось разделение почв на лёгкие, тяжёлые и нормальные, использование цвета пашни в названии таксонов почвенной классификации: чернозёмы, краснозёмы, желтозёмы, подзолы, подбуры, каштановые, серые, бурые, коричневые.

Академическое определение почвы как естественно-исторического биокосного тела природы сформулировано в 80-е годы XIX в. основателем почвоведения В.В. Докучаевым. Оно возникло в рамках агрогеологии, агрокультурхимии на основе отличительных свойств почвы от геологической породы и до сих пор хранит черты родства с материнской наукой. Главными результатами докучаевского этапа эволюции знаний о почве являются: инвентаризация почвенных ресурсов Земли, её континентов, многих стран, регионов и отдельных хозяйств; закон природной зональности и его производные – закон широтной и высотной зональности, закон фациальности, закон аналогичных почвенных рядов; количественная оценка потерь почвенных ресурсов за счёт их отчуждения, деградации и загрязнения.

Докучаевский этап развития почвоведения продолжается до сих пор, за это время сформировались самостоятельные разделы, изучающие с разных сторон почву и почвообразование: география и генезис почв, физика, химия, биология, минералогия почв. На базе почвоведения получили развитие прикладные научные дисциплины: земледелие, агрохимия, мелиорация, рекультивация. На



КЕРЖЕНЦЕВ Анатолий Семёнович – доктор биологических наук, заведующий лабораторией функциональной экологии Института фундаментальных проблем биологии РАН.

стыке почвоведения и экологии уже зарождаются новые комплексные дисциплины, ответственные за здоровье почвы и экосистемы: педопатология и экопатология. Однако нужно сказать и о некоторых неувязках и противоречиях, например, отсутствуют единые принципы классификации почв мира, нет общего мнения по поводу роста почвы вверх или вниз, продолжается спор о нижней её границе, необъясним феномен полихронности почвенного профиля.

Масштабные ошибки практики сельского хозяйства и мелиорации в различных регионах мира привели к большим потерям почвенных ресурсов и поставили перед почвоведением задачу разумного управления процессами функционирования почв с целью повышения не только продуктивности, но и устойчивости к негативным воздействиям естественных и антропогенных факторов. Оказалось, что для успешного управления этими процессами с пользой для человека и без ущерба природе предпосылки есть. Создание теории управления механизмом функционирования почв и методов на её основе позволит решать проблемы рационального природопользования, охраны окружающей среды и экологической безопасности на уровне инженерных задач.

Экологическое определение почвы как незаменимого компонента экосистемы возникло в 70-е годы XX в. Тогда была предпринята попытка изучить функцию почвы в метаболизме экосистемы. Впервые об этом заявил В.А. Ковда в 1968 г. на Генеральной конференции ЮНЕСКО в своём докладе о завершении Международной биологической программы и начале новой Международной программы "Человек и биосфера" [2]. X Международный конгресс почвоведов (Москва, 1974), президентом которого был В.А. Ковда, проходил под девизом: "Почва — компонент биосферы".

О наличии множества экологических функций почвы первыми сообщили Г.В. Добровольский и Е.Д. Никитин [3], которые обосновали полифункциональность почвы как естественно-исторического тела природы, сформулировали учение об экологических функциях почвы, реализация которого уже началась в специально созданном Институте экологического почвоведения МГУ.

Однако до сих пор в системе природопользования почва воспринимается как неисчерпаемый источник плодородия. Рассуждают примерно так: почва — продукт воздействия факторов среды на геологическую породу, запас геологических пород неисчерпаем, факторы среды вечны и бесконечны, следовательно, и почва является неиссякаемым ресурсом. По этой причине плодородные почвы часто используются как пространственный ресурс для размещения объектов дорожного, гражданского и промышленного строительства, засыпаются свалками, терриконами, загрязняются промышленными,

бытовыми и сельскохозяйственными отходами, нередко затапливаются водохранилищами.

В сельском хозяйстве до сих пор применяются варварские технологии земледелия тысячелетней давности, ориентация которых на максимальный урожай способствует деградации почв. В аграрном секторе почва считается даровым источником плодородия, которому нужно возвращать только три элемента, выносимые урожаем: азот, фосфор, калий. Такое упрощённое представление отвлекает внимание от потерь других не менее важных элементов, дефицит или избыток которых вызывает патологические нарушения в организме человека. Между тем именно традиционные аграрные технологии являются главными виновниками деградации почв [4]. Вспашка стимулирует биологическую активность почвы и минерализацию органического вещества. Монокультура усваивает только малую часть (20%) освобождённых почвой минеральных элементов. Другая их часть, взаимодействуя с органическими радикалами разлагающейся биомассы, подвергается гумификации и консервируется почвой впрок. Остальная беззащитная часть элементов вымывается стоком и мигрирует в водоёмы, необратимо обедняя почву. Кроме того, вспаханная почва легко подвергается водной и ветровой эрозии, которая выносит из почвы мелкозём, содержащий все без исключения биогенные питательные вещества. Поэтому контролировать и регулировать в почве следует весь спектр минеральных элементов, необходимых для жизнеобеспечения человека.

Необходимо понять, что почва не геологическая порода, переработанная факторами среды, а живое сообщество гетеротрофных организмов, утилизирующих отмершую биомассу ради обеспечения растений элементами минерального питания. Поэтому защищать почву нужно наравне с растительным и животным миром, как важный живой компонент окружающей среды. Почвоведом — специалистам, ответственным за состояние почвенных ресурсов, придётся детально изучить механизм функционирования почвы как компонента экосистемы (физиологию почв), сформулировать закон изменчивости почвы во времени и на его основе научиться управлять механизмом функционирования почвы.

Кроме проблемы природопользования существуют ещё две важные для человека глобальные проблемы, решение которых нуждается в знании механизма функционирования почвы как компонента экосистемы, — это создание автономной системы жизнеобеспечения (АСЖО) в гермокабине космического корабля и в космическом поселении на других планетах [5] и разработка научно-методических и технологических принципов бесконфликтного перехода биосферы в ноосферу как разумного выхода из современного экологического

кризиса [6]. Обе задачи по существу идентичны, поскольку и та, и другая система функционируют изолированно в открытом космосе, но они сильно различаются размерами. В гермокабине космического корабля нужно создать условия для жизни 10 человек, в космическом поселении — 100 человек, а в биосфере — 10 млрд. Принципиальная разница между ними, по нашему мнению, заключается в следующем: в биосфере система жизнеобеспечения человека была создана в процессе эволюции жизни задолго до его появления как биологического вида, и её надо уберечь от нарушений со стороны человека; в ограниченном объёме гермокабины и космического поселения её необходимо создать по образу и подобию биосферы и поддерживать с помощью технологических операций.

В настоящее время для осуществления предсказанного В.И. Вернадским перехода биосферы в ноосферу в арсенале человечества ещё недостаточно знаний о механизме глобальных природных процессов, отсутствует теория, технологические принципы и технические средства управления. Даже в престижной области космической техники до сих пор не найдено принципиального решения задачи создания АСЖО человека в космическом корабле и космическом поселении. Эта задача может служить своеобразным тестом научно-технической зрелости человечества. Во всех известных натуральных экспериментах с АСЖО задействована только автотрофная биота на гидропонике. Почва как обязательный незаменимый компонент экосистемы и мощный регулятор среды обитания в расчётах АСЖО не рассматривается. А между тем устойчивость всех живых систем обеспечивается циклическостью круговорота вещества между автотрофной и гетеротрофной биотой — функцией метаболизма. Природная экосистема представляет собой симбиоз фитоценоза и педоценоза. Взаимодействие растительности и почвы можно приравнять к коллективному мутуализму — процессу взаимовыгодного обмена сообществ автотрофных и гетеротрофных организмов продуктами собственной жизнедеятельности. Разработчики АСЖО не рассматривают почву как «участника» эксперимента из опасения нарушить стерильность жилого и рабочего помещений космического корабля. Но изолировать биореактор от жилого отсека не такая уж сложная техническая задача. Исключение же из метаболизма экосистемы важнейшей функции катаболизма — принципиальная ошибка. Отрицание функции почвы превращает устойчивую циклическую экосистему в ненадёжную проточную.

В процессе катаболизма экосистемы происходит не только минерализация отмершей биомассы, но и гумификация — вторичный синтез гумусовых веществ путём взаимодействия не востребованных фитоценозом минеральных элементов с органи-

ческими радикалами разлагающейся биомассы. Новообразования почвы в виде гумуса, органоминеральных конкреций и вторичных глинистых минералов выводятся из биологического круговорота и хранятся в почве в форме нейтральных соединений, безопасных для биоты. Большая часть законсервированных таким образом элементов при определённых условиях снова возвращается в биологический круговорот, а меньшая их часть (шлаки) выводится необратимо из экосистемы в геологический круговорот.

Шлаки — абсолютные потери метаболизма естественной экосистемы в форме газов, солей и коллоидов — составляют не более 1% массы круговорота и нуждаются в компенсации [7]. Основная масса вещества экосистемы вращается многократно в цикле экосистемного круговорота. К этому идеалу устойчивости экосистемы, по нашему мнению, надо стремиться при создании АСЖО путём искусственного управления функцией метаболизма и замены некоторых биохимических процессов технологическими операциями.

Трудности создания искусственного аналога природной экосистемы, управляемой волей человека с целью жизнеобеспечения его популяции в локальном и глобальном масштабе, заключаются в том, что кабина космического корабля слишком мала для таких экспериментов, а биосфера слишком велика. Поэтому начинать нужно с разработки универсальной математической модели, имитирующей механизм функционирования экосистемы. На этой теоретической основе следует создать физическую модель экосистемы (прообраз космического поселения на Земле) с автономным режимом управления функцией метаболизма экосистемы. Сначала придётся отработать технологические принципы искусственного поддержания цикла метаболизма максимально замкнутой экосистемы и методику управления этим процессом без участия человека. Затем, после дополнительных расчётов, можно включить в неё человека.

Полноценный эксперимент «Ноосфера» должен имитировать космическое поселение с экипажем 10 человек в течение трёх лет. В американском эксперименте «Биосфера-2», закончившемся неудачей, специалисты пытались решить функциональную задачу структурными методами без учёта цикличности метаболизма экосистемы. Наш миниатюрный эксперимент «Экотрон-97» показал реальную возможность искусственной гармонизации взаимодействий фитоценоза и педоценоза в реальном масштабе времени [8]. После успешного завершения эксперимента «Ноосфера» должна быть сформулирована и обоснована теория управления метаболизмом экосистемы. Это позволит приступить к масштабным работам в двух направлениях: миниатюризации — до гермокабины космической станции и глобализа-

ции — до создания системы бесконфликтного перехода биосферы в ноосферу.

Из трёх упомянутых выше проблем, которые нуждаются в знании механизма функционирования почвы как незаменимого компонента экосистемы, сегодня в центре внимания только одна — АСЖО для космонавтов марсианского проекта. Однако все три проблемы касаются условий выживания человечества на планете Земля, поэтому рано или поздно решать эти важные задачи всё-таки придётся. Позднее решение, под натиском глобального кризиса, чревато трагическими последствиями, как неоднократно бывало в прошлом. Раннее решение, на основе достоверных сигналов и прогнозов, позволит смягчить и даже предотвратить глобальную экологическую катастрофу.

Биологический вид *Homo sapiens* появился в уже сформированной длительным процессом эволюции жизни среде обитания. Даже незначительные изменения состава пищи, воды и воздуха вызывают патологические нарушения в организме человека. Актуальность и сложность проблемы его выживания в ограниченном объёме жизненного пространства локального или глобального масштаба предполагают концентрацию интеллектуальных ресурсов и их координацию в рамках единого научно-технического центра типа ЦЕРНа.

Примером организации мирового научного сотрудничества могут служить и коллаидеры, создание и эксплуатация которых поддерживается международными организациями и правительствами разных стран. Дело не столько в масштабах финансирования программ, сколько в оценке их приоритетности. Конечно, для укрепления обороноспособности страны физика важнее биологии, а экология, по мнению некоторых политиков, вообще мешает экономике, хотя давно известно, что именно экономика без экологических ограничений виновна в изменении качества среды обитания человека.

Отдельные мероприятия по защите окружающей среды проблему не решат. Нужны кардинальные изменения образа жизни всего человеческого сообщества. Планета Земля — космический корабль с ограниченным запасом ресурсов и постоянно увеличивающимся экипажем, который неосознанно и даже преднамеренно изменяет качество окружающей среды. Надо уже сейчас выбирать из двух вариантов: либо резко сократить численность населения планеты и жестко её контролировать, либо создать глобальную АСЖО растущей численности популяции с возможностью, как говорил В.И. Вернадский, “растекания Жизни по Земле, ближнему и дальнему Космосу” [9]. Истина наверняка находится в золотой середине.

Для изучения механизма функционирования экосистемы нужна специальная экспериментальная база, которая позволила бы контролировать

динамику её естественного развития с учётом характерных времён внутренних процессов, а также проводить натурные, лабораторные и численные эксперименты. На наш взгляд, в состав экспериментальной базы должны входить три обязательных блока. Первый — экспериментальная установка (“Экотрон” или “Ноосфера”), имитирующая механизм функционирования экосистемы как симбиотическое взаимодействие фитоценоза и педоценоза при постоянном контроле параметров и регулировании факторов среды — физическая модель управляемой экосистемы. Второй — сеть комплексных полевых стационаров, расположенных в типичных зональных экосистемах и оснащённых современной измерительной техникой и аппаратурой, работающей в автоматическом режиме. Третий — региональный комплекс экологического мониторинга на территории конкретного водосборного бассейна с наблюдательной сетью стационарных полигонов и маршрутов (трансект), охватывающих всё разнообразие типичных экосистем экологического региона и объединённых системой дистанционного зондирования.

Особое внимание следует обратить на измерение динамических параметров педоценоза и их согласование с динамикой фитоценоза. Долгое время считалось, что почва развивается в геологическом масштабе времени, а фитоценоз — в реальном. Поскольку почва и растительность — равноценные компоненты экосистемы, то они должны развиваться в сопоставимом масштабе времени.

История наземной жизни в равной степени коснулась автотрофной и гетеротрофной биоты, а значит, фитоценоза и педоценоза одновременно. Изменчивость экосистем в суточном, годовом и многолетнем циклах также равно относится к фитоценозу и педоценозу. Значит, они синхронно взаимодействуют как в реальном, так и в геологическом масштабе времени. Однако наличие в почве двух характерных времён обнаружилось только в 1976 г., когда И.А. Соколов и В.О. Таргульян предложили различать в едином профиле почвы два самостоятельных объекта: “почву-память” и “почву-момент” [10]. По отношению к растительности такого разделения нет, оно само собой разумеется. Поэтому геоботаники свободно оперируют динамикой растительности в масштабе десятилетий и геологических эпох, а почвоведы испытывают затруднения.

Объясняется это тем, что начальный этап развития почвоведения как науки был посвящён инвентаризации почв разных стран и континентов методом картографирования. Для этого отбирались самые консервативные признаки почв, которые не должны изменяться в суточном и годовом циклах. Такие признаки со временем стали традиционными. Даже результаты режимных наблюдений теперь сводятся к диагностическим стандартам (типам

режимов для каждого таксона классификации).

Раздельное изучение неразрывных компонентов экосистемы привело к тому, что к настоящему времени их характеристики стали несопоставимыми. Фитоценоз: видовой состав, численность популяций отдельных видов, надземная и подземная фитомасса, фенологические спектры, масса годового прироста и опада. Почва: мощность генетических горизонтов, их окраска, механический состав, структура, наличие корней, включений и новообразований, содержание и состав гумуса, сумма и состав поглощённых оснований, рН, Eh, водная вытяжка, железо по Тамму и Меру—Джексону, ёмкость катионного обмена, степень насыщенности, гидролитическая кислотность, валовой состав, минералогический состав, биологическая активность, эмиссия CO₂, состав и численность почвенной биоты, ферментативная активность.

Ни один из многочисленных параметров почвы не совпадает с параметрами фитоценоза. А ведь они равноправные компоненты экосистемы, объединённые общим круговоротом вещества и энергии, в котором дисбаланс между синтезом и распадом биомассы не превышает 1% общей массы экосистемы (экомассы), включающей запасы фитомассы, зоомассы, микробиомассы, массы опада, подстилки и гумуса. Поэтому необходимо с новой позиции рассмотреть почву как компонент экосистемы и найти в ней динамические параметры, согласованные с параметрами фитоценоза в едином цикле метаболизма экосистемы.

Если говорить о структуре, то экосистема представляет собой сумму масс органического вещества, содержащегося в разных ярусах фитоценоза и в генетических горизонтах почвы. Если говорить о механизме функционирования экосистемы, то можно выделить три её параметра: характерная масса (экомасса), характерная структура, характерное время. Определение “характерный” указывает на постоянную изменчивость параметров в стационарном режиме, сохраняющем структуру в стабильном состоянии. Например, мощность почвенных горизонтов и запасы гумуса в них сохраняются в течение столетий и тысячелетий. Но масса каждого горизонта регулярно обновляется в течение нескольких лет, причём, чем глубже горизонт, тем дольше время обновления.

Такую экспериментальную базу можно было бы создать в структуре Института экологического почвоведения МГУ им. М.В. Ломоносова или Института фундаментальных проблем биологии РАН за счёт привлечения материальных средств министерств и ведомств, заинтересованных в решении проблемы экологической безопасности, рационального природопользования и охраны окружающей среды. Самым сложным и важным является создание уже упоминавшейся экспериментальной установки “Ноосфера”. Раздельное

регулирование функций фитоценоза и педоценоза с помощью этой установки позволит отработать систему поддержания экологического равновесия и управления механизмом функционирования экосистемы. Для успешного решения данной задачи нам кажется целесообразным привлечь к участию в совместной работе организаторов космической программы “Марс”.

Опыт Института фундаментальных проблем биологии РАН по проведению эксперимента “Экотрон-97” [8, 11, 12] показал, что за короткое время можно получить принципиально важные результаты, характеризующие согласованность во времени механизмов функционирования фитоценоза и педоценоза и реальную возможность управления этими механизмами путём регулирования факторов среды.

В итоге изучения механизма функционирования экосистемы могут быть получены следующие результаты:

- создана универсальная математическая модель функционирования экосистемы в режиме перманентной адаптации к изменениям факторов среды и теория управления метаболизмом экосистемы;
- проведена количественная классификация и диагностика экосистем и почв биосферы;
- сформулированы научно-методические и технологические принципы для разработки кардинальных мер защиты экосистем и почв от негативных воздействий естественных и антропогенных факторов (основы экопатологии — науки, ответственной за здоровье экосистем);
- разработаны научно-методические и технологические принципы создания АСЖО человека в условиях ограниченного пространства гермокабины космического аппарата и космического поселения;
- определены научно-методические и технологические основы бесконфликтного перехода биосферы в ноосферу как разумного выхода из современного экологического кризиса.

ЛИТЕРАТУРА

1. Керженцев А.С. Функциональная экология. М.: Наука, 2006.
2. Ковда В.А. Биосфера и человечество // Биосфера и её ресурсы. М.: Наука, 1971; *Он же*. Роль и функции почвенного покрова в биосфере Земли. Пушкино: ОНТИ НЦБИ АН СССР, 1985.
3. Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экологические функции почв. М.: Изд-во МГУ, 1986; *Они же*. Функция почв в биосфере и экосистемах. М.: Наука, 1990.
4. Керженцев А.С., Кузьменчук Ю.А. Другой земли у нас нет // Вестник РАН. 2009. № 4.

5. Газенко О.Г. Ф.А. Цандер и современное состояние разработок биологических систем жизнеобеспечения (БСЖО) // Из истории ракетно-космической науки и техники. Вып. 2. М.: ИИЕТ РАН, 1998. С. 3–21.
6. Керженцев А.С. Бесконфликтный переход биосферы в ноосферу // Вестник РАН. 2008. № 6.
7. Марчук Г.И., Кондратьев К.Я. Приоритеты глобальной экологии. М.: Наука, 1992.
8. Алексеева Т.В., Керженцев А.С. Микроморфологическое строение модельного почвенного профиля блока “Педотрон” экспериментальной установки “Экотрон-97” // Почвоведение. 2005. № 3. С. 355–365.
9. Вернадский В.И. Химическое строение биосферы Земли и её окружения. Изд. 2-е. М.: Наука, 1987.
10. Соколов И. А., Таргульян В.О. Взаимодействие почвы и среды: почва-память и почва-момент // Изучение и освоение природной среды. М.: ИГАН, 1976. С. 150–164.
11. Керженцев А.С., Алексеева Т.Т., Алексеев А.О. и др. Экотрон — физическая модель экосистемы // Проблемы экологического мониторинга и моделирования экосистем. Т. XIX. СПб.: Гидрометеоиздат, 2003. С. 157–179.
12. Kerzhentsev A.S., Volokitin M.P., Zelenskaya N.N. et al. The principles of Regulation of Ecosystem Functions // Eurasian Soil Science. 2002. V. 35. Suppl. 1. P. 25–33.