

ЗДОРОВЬЕ ПОЧВЕННОЙ ЭКОСИСТЕМЫ: ОТ ФУНДАМЕНТАЛЬНОЙ ПОСТАНОВКИ К ПРАКТИЧЕСКИМ РЕШЕНИЯМ

А.М. СЕМЕНОВ^{1,2}, А.П. ГЛИНУШКИН², М.С. СОКОЛОВ²

(¹ МГУ им. М.В. Ломоносова; ² ВНИИ фитопатологии)

Обсуждается и обосновывается необходимость широкого использования категории «почвенная экосистема», как более объективно содержательного и конкретного в отличие от лаконичного, но разно понятийного термина – «почва». Современная наземно-почвенная экосистема подразделяется на природную и антропогенную или агроэкосистему, а последняя по технологиям эксплуатации на интенсивную (convention agriculture) и органическую (organic agriculture), а также смешанный или переходный тип (low input) возделывания. Рассматриваются ключевые характеристики органического, интенсивного и переходного типов земледелия. Обсуждается новая, генеральная характеристика почвенной экосистемы – здоровье почвы и естественно-научные параметры этой категории. Приводятся методы определения здоровья почвы в виде параметров. Описан гетеротрофный параметр здоровья почвы и ключевые положения для выполнения этого метода. Обсуждается новый параметр определения здоровья почвы в виде параметра оценки самообеспечения почвенной экосистемы ключевыми биофильными элементами, азота и фосфора. Обсуждены подходы к разработке параметров оценки супрессирующей активности и контроль «патогенеза» в почвенной экосистеме. Рассматривается необходимость оценки здоровья почвенных экосистем в зависимости от их типов и эксплуатации. Рассмотрены условия поддержания и сохранения здоровой почвенной экосистемы, особенно в системах органического земледелия. Обсуждаются варианты сохранения и защиты здоровья почвы, естественная и индуцированная супрессирующая активность почвенной экосистемы. Описываются пути диагностики и терапии почв современных агроэкосистем на основе разработанных показателей в виде гетеротрофного параметра здоровья почвы и параметра оценки самообеспечения почвенной экосистемы биофильными элементами.

Ключевые слова: почвенная экосистема, агроэкосистемы, здоровье почвы, параметры здоровья, защита, терапия.

Введение

Накоплено достаточно знаний, чтобы обоснованно принять и использовать понятие *почвенная экосистема* (ПЭ) или экосистема почвы (ЭП) вместо традиционного понятия просто – почва. Понятие ПЭ наиболее полно отражает содержание того системного природного образования, которое принято именовать *современной почвой*. Понятие почвенная экосистема более объективно характеризует эту биологическую систему с научной, практической и обывательской точек зрения. Употребление понятия ПЭ ориентирует и теоретика, и практика на необходимость различать несколько категорий ПЭ, по крайней мере, природную и эксплуатируемую человеком.

Современная социальная система в своей техногенно преобразованной агроэкосистеме использует интенсивные технологии (convention agriculture), органические (organic agriculture) и/или переходные, смешанные (low input). В зависимости от системы эксплуатации (обработки) ПЭ от нее следует ожидать различное количество и качество продукции, а также возникающие при ее эксплуатации риски и проблемы. В зависимости от назначения ПЭ пользователь, должен строить стратегию ее поддержания и развития, защиту от природных, разнообразных техногенных и социальных воздействий [11].

Цель данной работы заключалась в том, чтобы обсудить некоторые актуальные экологические проблемы, связанные с эксплуатацией ПЭ, рассмотреть подходы к их решению на фундаментальном уровне и в практических приложениях.

Для реализации поставленной цели рассмотрены: смысловое содержание понятия «*почвенная экосистема*», категории ПЭ с учетом их назначения, эксплуатации, возделывания и связанные с этим проблемы. Обсуждены традиционные почвенные характеристики и их связи с предложенной новой характеристикой ПЭ – здоровьем почвы. Изложены пути решения проблем, относящихся к категории здоровья почвы, предложены количественные параметры, характеризующие эту биологическую категорию, а также особенности диагностики, терапии и сбережения здоровья почвы в современных агроэкосистемах.

Почва как экологическая система

Почва служит объектом изучения и исследования геологов и почвоведов, агрохимиков и агрономов, экологов и грунтоведов. Ее исследуют с разных сторон нередко одними и теми же или сходными методами, реализуя при этом разные цели и задачи. Поэтому возникают различные определения объекта, традиционно именуемого *почвой*. Чаще всего при ее изучении и исследовании используется *эволюционный подход*, оперирующий преимущественно с традиционными физико-химическими понятиями и характеристиками. Не умаляя роли накопленных о почве знаний как о физико-химической субстанции, важно располагать все-таки таким определением почвы, которое, учитывая современные знания, отражало бы нынешние представления о почве как о гетерофазной системе, без которой невозможно существование ни земного биоразнообразия, ни особого, уникального мира почвенной биоты.

Предлагается рассматривать почву как *продукт* длительной взаимной ассимиляционно-диссимиляционной деятельности микроорганизмов, растений и трансформированного минерально-органического вещества. *Современная почва* – это органоминеральный природный *продукт*, возникший при определенных природно-климатических условиях и поддерживаемый непрерывным микробно-растительным взаимодействием в изначально количественно доминирующем неорганическом веществе. Этот продукт, включающий биоту, мортмассу и метаболиты, подвергающийся непрерывным энзиматическим и химическим трансформациям, аккумулирует биофильные элементы. В нем протекают важнейшие биологические и физико-химические процессы – биогеохимические *циклы элементов* и *микроорганизмов*. Почва обладает значительными буферными свойствами в отношении разнообразных стрессоров, обеспечивает питательными веществами растения и гетеротрофную биоту, является источником и стоком биофильных элементов и биоразнообразия [2, 4]. Именно *биологическая составляющая* ПЭ обеспечивает ее важнейшие для биоты Земли функции – производственные и средообразующие, поддерживает в активном состоянии генофонд и уникальнейшее разнообразие

почвенной биоты. Именно поэтому применительно к нормально функционирующей ПЭ правомерны и применимы такие биолого-экологические характеристики, как *здоровье почвы* и/или *патология почвы*.

Современное определение почвы должно акцентироваться именно на ее биологическом происхождении и биодинамической сути понятия *почва*. При подобном ее понимании, правомерна такая биолого-экологическая характеристика, как *здоровье почвы*.

Известно, что именно почвенные микроорганизмы интегрально обладают и продуцируют такой комплекс ферментов и метаболитов, который в долгосрочном аспекте способен с разной скоростью либо гидролизовать до самых простых ингредиентов органические мономеры и полимеры, либо подвергать их трансформациям, включая перевод в более труднодоступную для ассимиляции или инертную форму. Известно, что высшие организмы без микроорганизмов, смогут просуществовать лишь эволюционно короткий временной период, в то время как микроорганизмы, в особенности прокариоты, способны неопределенно долго обходиться без высших организмов.

Категории почвенной экосистемы

Итак, современную глобальную ПЭ подразделяется на *природную* и *антропогенную* (агроэкосистему). Именно по результатам исследований и анализа натуральной ПЭ написаны многочисленные труды по почвоведению, общей и микробной экологии. Главнейший фактор адекватного функционирования природной ПЭ – невмешательство социума.

В современной агроэкосистеме используются различные технологии. Доминирующая в настоящее время в *интенсивная система* хотя и обеспечила высокую продуктивность растениеводства, однако привела к нарушению, а в ряде случаев даже к деградации ПЭ. Поэтому в современных условиях необходимо более четко классифицировать агроэкосистемы. Согласно естественно-социальному подходу *агроэкосистема* – это две мутуалистки взаимодействующие подсистемы, где *первая подсистема* (включающая глобальные супер-подсистемы – биологическую, литологическую, климатическую) используется в интересах другой минорной подсистемы – социосистемы. В силу своих возможностей и взаимодействий минорная подсистема оказывает долговременное, разнонаправленное воздействие и на агроэкосистему, и на *геоэкосистему*. Агроэкосистема – атрибут социосистемы, имеющая подчиненное значение для геоэкосистемы или *экоферы*. В отсутствие геоэкосистемы нет ни социосистемы, ни агроэкосистемы.

Итак, в настоящее время агроэкосистемы управляются по *интенсивным* и *органическим технологиям*, а также по *переходному типу* [5, 6]. Геоэкосистема, конечно же включает почвы, эксплуатируемые не только в агроэкосистеме, но и в социосистеме. Восстановление разрушенных агроэкосистем осуществляется посредством их консервации – перевода на определенный срок в сферу природных экосистем.

Интенсивное земледелие как традиционная форма эксплуатации агроэкосистемы

Исторически, до массового применения искусственных удобрений и агрохимикатов земледелие, конечно же, было «органическим». Однако в XX веке первичным стало – *convention agriculture*, т.е. – «принятое», «согласительное земледелие», в русскоязычной литературе – *интенсивное земледелие* (ИЗ). Для получения высоких

и стабильных урожаев оно подразумевает массированное применение минеральных удобрений, преимущественно макроэлементов (NPK), а также интенсивных агротехнологий и приемов. Отметим также, что в интенсивном земледелии уже давно массированно применяются и такие необходимые растениям элементы как Cu, B, Mg, Zn, V и др. Итак, *первый показатель* интенсивного земледелия – массированное внесение в почву минеральных удобрений.

Для защиты высоких урожаев (получаемых благодаря форсированному применению минеральных удобрений) от вредных организмов предложен широкий ассортимент химических пестицидов. Они сыграли положительную роль в защите растений и урожая. Однако некоторые пестициды проявили себя как высокоперсистентные, в силу чего стали накапливаться в ПЭ и поглощаться биотой. Часть ксенобиотиков оказалась опасной для нецелевых организмов, включая домашних животных и человека. Таким образом, *второй показатель* интенсивного земледелия – массированное применение пестицидов.

Третьим показателем интенсивного земледелия является производство генно-инженерно-модифицированных сортов культурных растений. Их трансгены кодируют биосинтез нетоксичных для человека и теплокровных животных веществ, обеспечивающих устойчивость культуры к фитопатогенам, фитофагам и к неизбежным гербицидам [5, 6]. Использование технологий интенсивного земледелия, приведшее к нарушению или даже разрушению почв агросистем, ставит под сомнение утверждение о неминуемом голоде для человечества при возврате к агросистемам органического земледелия.

Органическое земледелие

В повседневном представлении органическое земледелие – это возделывание почвы для получения приемлемой величины качественного урожая без использования минеральных удобрений и ксенобиотиков за исключением мелиорантов, используемых для оптимизации pH почвы. В органическом земледелии *не допускается* использование генетически модифицированных организмов (ГМО). По своей «идеологии» органическое земледелие – это деятельность, преимущественно, индивидуального землепользователя. Оно близко *биодинамическому земледелию*, которое связывают с именем Рудольфа Штейнера (1861–1926 гг.). Основной его тезис – «*кормить не растение, а почву*».

Сформулированы официальные международные требования, условия и характеристики, присущие органическому земледелию. Согласно IFOAM (международная организация, регламентирующая органическое земледелие), органическое земледелие – это система производства, обеспечивающая здоровье почв, экосистем и людей на основе природных, адаптированных к местным условиям, экологически сбалансированных процессов и безопасных источников обогащения почвы органическим веществом, гармонизации круговорота веществ и энергии, поддержания биоразнообразия, оптимизации конкурентоспособности культурных растений к сорнякам, болезням и вредителям при полном отказе от использования агрохимикатов и генно-модифицированных организмов (<http://www.ifoam-eu.org>. <http://www.ifoam.org>).

Исторически переход от интенсивного земледелия к органическому совершался в несколько этапов. Несомненно, нужно упомянуть о технологии “low input”. Такая технология *переходного земледелия* заключается в умеренном внесении или в ограничении, сокращении норм расхода даже органических, а тем более минеральных удобрений. Отметим, что понятие умеренные, ограниченные и низкие уровни – для

разных стран, в разных природно-климатических зонах различаются. Параллельно или наряду с этим развивалась идеология «sustainable developing agriculture» – устойчивое развитие сельского хозяйства. При этом использовалась минерально-органическая система удобрений и мобилизовался естественно-почвенный потенциал плодородия ПЭ.

О реализации истинно органического земледелия можно говорить только после завершения переходного периода. Согласно наблюдениям, переходный период – не менее 5–6 лет или более длительный при условии неукоснительного выполнения и соблюдения требований и правил, декларированных IFOAM. Переходный период начинается с отказа внесения в агроэкосистему минеральных удобрений, применения пестицидов и производства любых ГМО. Агроэкосистема органического земледелия предполагает наличие защитной зоны, отделяющей агроэкосистему органического земледелия от традиционной. Для поддержания плодородия и качества почвы не допускается использование навоза, компостов, других органических субстратов, произведенных в традиционном агропроизводстве.

Здоровье почвы как экологическая характеристика почвенной экосистемы

Необходимость разработки новой категории и характеристики почвенной экосистемы – здоровья почвы – возникла как реакция научного и социального сообщества на изменение состояния экосферы и качества, в первую очередь, растительной продукции (опосредованно – и на качество животноводческой продукции). Ситуация особенно обострилась при переходе земледельцев к органическому земледелию, где биологические характеристики и параметры оценки ПЭ заняли определяющее место по отношению к традиционным физико-химическим категориям. Постепенно, но в относительно короткий исторический период, сформировалось понимание сути категории здоровья почвы, а также целей и задач, необходимых для ее оптимизации.

Итак, «здоровье почвы – это биологическая категория, отражающая состояние динамики активности биотического компонента в органоминеральном комплексе почвы; эта биологическая категория характеризуется адекватной, соответствующей природно-климатической зоне активностью биотических процессов (синтеза и гидролиза), их устойчивостью к нарушающим воздействиям (биотическим и абиотическим стрессорам), «замкнутостью» циклов биофильных элементов и циклов микроорганизмов. Здоровая почва агроценозов характеризуется еще и соответствием своего качества нормативным показателям и адекватным (для природно-климатической зоны) плодородием» [2, 3, 4, 7]. Такое определение здоровья почвы, применимое к любой ПЭ (исключая аномальную) не только не противоречит содержательной сути ее известных характеристик, но и интегрирует их содержание; показатели динамики активности биотического компонента взаимосвязаны и с физико-химическими показателями почвы, и с актуальным почвенным плодородием.

Здоровье почвенной экосистемы и естественно научные параметры этой категории

Как отражение функций биотического компонента почвы, закона волнообразного развития микробных популяций и микробных сообществ почвы предложен количественный параметр здоровье почвы [3, 4, 7; <http://bankpatentov.ru/node/62779>]. Ключевыми положениями реализации этого метода, как и последующих, является

обязательность: (1) сравнение исследуемой почвы с избранной здоровой (условно эталонной или конвенционно-здоровой) почвой одного и того же генезиса и ландшафта, (2) использование для определения параметров здоровья почвы только свежесобранных почвенных образцов, (3) применение к исследуемым почвам одного и того же стрессора, (4) проведение динамических наблюдений и определений.

Гетеротрофный параметр здоровья почвы

Определение гетеротрофного параметра здоровья почвы осуществляется после нарушающего воздействия – внесения в образцы исследуемой и контрольной почвы глюкозы [3, 4, 7]. Ежедневно, в течение минимум 5 сут. измеряется динамика скорости (V) выделения CO_2 почвами в условиях их термостатирования и поддержания оптимальной влажности (субстрат– индуцированное дыхание – СИД). По показателям эмиссии CO_2 строятся пикообразные (волнообразные) графические зависимости V от времени экспозиции (T). График будет иметь волнообразный вид с одним или двумя пиками. На графиках зависимости (V от T) выбирают один из первых наибольших пиков для эталонной (здоровой) и исследуемой почв, измеряют ширину (L) амплитуд выбранных пиков на их полувысоте. Сравнение параметров именно максимальных по амплитуде пиков СИД обусловлено тем, что это позволяет учесть наиболее активные, наибольшие по интенсивности и, следовательно, наиболее значимые микробные популяции исследуемых образцов почвы. Конкретный пример расчета параметра здоровья почвы приведен в публикациях [3, 7]. Чем ближе значение вычисляемого параметра к нулевому значению, тем исследуемая почва ближе к стандартной (здоровой) почве. Если результат расчетного уравнения равен нулю, то исследуемая почва относится к здоровой [3, 7, (<http://bankpatentov.ru/node/62779>)].

Представляется, что широкое внедрение уже разработанного метода количественного определения параметра здоровья почвы с использованием автоматического компьютеризованного прибора [7], наряду с созданием базы данных параметров здоровья различных почв, явится весомым вкладом в формирующееся новое направление исследований – экологической биотехнологии.

Параметр здоровья почвы для оценки самообеспечения почвенной экосистемы биофильными элементами

Среди показателей здоровья почвы непременно называется такой важный показатель здоровья, как способность ПЭ к самообеспечению биофильными элементами. Традиционно это обозначают как показатель «замкнутости циклов питательных веществ» в ПЭ или, еще проще, как «замкнутость циклов биофильных элементов» [4]. Речь, конечно, не идет о глобальных биогеохимических циклах элементов, веществ и энергии, а непосредственно о здоровье почвы конкретной ПЭ. Среди всех биофильных элементов самообеспечение ПЭ азотом, конечно, является ключевым. Разработка параметра для оценки способности ПЭ к самообеспечению азотом, как отражение состояние сбалансированности и замкнутости азотного питания ПЭ, также, несомненно, является ключевой.

Традиционное мышление направляет исследователей на определение показателей *азотфиксирующего-аммонифицирующего притока* и денитрифицирующую-нитрифицирующую потерю азота ПЭ. Наши исследования показали неприемлемость такого подхода для оценки самообеспечения ПЭ азотом. Доказано, что в залежной ПЭ, по существу, являющейся образцом здоровой почвы, не обнаруживается

значимых количеств не только актуальной, но и потенциальной азотфиксирующей активности. В интенсивно эксплуатируемой полевой почве, получающей до 180 кг/га азота за сезон, при отсутствии актуальной азотфиксации обнаруживается потенциальная азотфиксирующая активность. Поскольку она проявляется после внесения глюкозы в образцы почвы, это уместно рассматривать как вариант получения ПЭ некоего стимулятора, «допинга». При этом потенциальная аммонифицирующая активность примерно в равных значениях проявляется как в залежной почвенной экосистеме, так и в полевой.

Эти результаты показывают, что распространенные методы определения «общей» азотфиксирующей активности в ПЭ не могут быть использованы с рутинными целями для получения объективных результатов и формулирования каких-то выводов о направлении вектора в обеспечении ПЭ азотом. Более того, роль азотфиксации, вклад и значимость этого процесса в повседневное обеспечение ПЭ азотом нуждаются в критическом и объективном переосмыслении. В объективной оценке нуждается также и недооцененный вклад аммонификации в обеспечение ПЭ азотом.

О состоянии вектора активности процесса азотного обеспечения ПЭ предлагается судить по активности микробного сообщества после нарушающего воздействие в виде обогащения почвы минеральными соединениями *биофильных элементов*. Предлагаемый подход, основанный на известных и логически не противоречивых положениях, экспериментально подтвержден нашими исследованиями [4]. Интенсивность циркуляции в почве биофильных элементов, например, N, зависит от активности микроорганизмов. Растения (и животные), являясь активными деструкторами органики, выступают, в основном, как потребители азота. Тем самым они как бы вынуждают трансформантов N функционировать интенсивнее и эффективнее. В оптимальной степени их активность должна проявляться в нативной, здоровой почве. Исходя из этого предлагается определять и сравнивать *динамическую реакцию* микробного сообщества исследуемой и эталонной (здоровой!) почвы на внесение азота, а не просто эпизодически измерять концентрацию соединений азота в почве (в виде, например, баланса общего N или его соединений – аммонийных, нитратных, аммиака или закиси азота). Известно, что динамика основных метаболических процессов, осуществляемых микроорганизмами и, как следствие, эмиссии ими углерод- и азотсодержащих метаболитов в ПЭ протекают *волнообразны и совпадают по времени*. Поэтому уместна аналогия в определении параметра биологической активности почвы на ее «азотообогащение» и ее гетеротрофный параметр, характеризующий здоровье почвы [4]. Поскольку не может быть стабильного, универсального критерия, повсеместно характеризующего природные и сельскохозяйственные почвы по обеспеченности «биофилами», для создания такого критерия здоровья почвы применим сравнительный подход. Он позволяет выявить отличие реакций микробного сообщества – динамики активности ПЭ – на временное обогащение изучаемым биофильным элементом исследуемой и эталонной почв.

С этой целью предлагается проводить одновременное обогащение образцов почвы (как при определении гетеротрофного параметра) углеродным и азотным субстратами (а при необходимости – и фосфором). Измерение СИД почвой по скорости (V) эмиссии CO₂, индуцированное этими «биофилами», осуществляется в динамике. Образцы сравниваемых почв (исследуемой и «условно здоровой» – эталонной) инкубируют при оптимальных условиях влажности и температуры. Индукторами СИД могут служить водные растворы глюкозы, нитрата аммония, а при необходимости – и двузамещенного фосфата натрия. Определение СИД

осуществляется ежедневно и, как минимум, в течение 5 суток. Показатель СИД, выступает как параметр ЗП, характеризующий интенсивность ее углеродного, азотного, а при необходимости и фосфорного обмена. Экспериментальное определение параметра следует проводить с получением «волнообразного» ответа в виде пика (всплеска) значения СИД до его снижения (выхода на плато). Графически это выражается в одно– или двумерных кривых. Расчет индуцированного параметра на графике(ах) зависимости V от времени (T) проводится аналогично гетеротрофному параметру. При этом используется только один наибольший пик. Для расчета применяется формула: $ИП = [(L_{\text{кн}} - L_{\text{ин}})/L_{\text{кн}}]$. Параметр рассчитывают также по абсолютной величине. Использование модуля вышеуказанной дроби (а не просто модуля разницы между шириной вышеназванных пиков на их полувысоте) позволяет устранить размерность параметра здоровья почвы и корректно сравнивать состояние исследуемого и контрольного образцов по этому показателю. Подход к оценке полученных значений тот же самый, что и для гетеротрофного параметра здоровья почвы: чем ближе индуцированный параметр (ИП) к нулевому значению, тем в большей степени исследуемая почва здорова. Если ИП = 0, то она вполне здорова, то есть активность микробного сообщества (в результате обогащения ПЭ «биофилами») исследуемой и эталонной почв аналогична.

Экспериментальное определение параметра активности микробного сообщества почвы на внесение биофильных элементов (с глюкозой!) показало приемлемую корректность, чувствительность и воспроизводимость предложенного метода [4].

Подходы к разработке параметров оценки супрессирующей активности и контроль «патогенеза» в ПЭ

При оценке функционировании ПЭ отмечено, что она спонтанно проявляет такие свойства, которые нужно учитывать и можно использовать в агроэкосистеме. К таким ощутимо значимым свойствам относят супрессирующую активность ПЭ. Супрессивность почвы определяют, как совокупность ее биологических, физико-химических и агрохимических свойств, ограничивающих *выживаемость* и *паразитарную* активность почвенных фитопатогенов или другой, вредной для нецелевых организмов биоты [1]. В числе причин, обеспечивающих супрессивность ПЭ, преобладают биологические факторы – антагонизм, антибиоз, конкуренция, паразитизм, хищничество. Наряду с биологическими, существенную роль могут играть и абиотические, неблагоприятные для развития некоторых микроорганизмов факторы (рН, значительные колебания температуры, дефицит органического вещества, биофильных элементов и др.). По степени супрессивности, т.е., влияния на развитие популяций фитопатогенов, выделяют следующие типы почв. *Кондуктивные* почвы, в которых численность популяции возбудителя фитопатогена со временем может возрастать, *толерантные*, если численность фитопатогена остается стабильной и *супрессивные* почвы, в которых численность популяции фитопатогена неуклонно снижается [1].

Различают два типа почвенной супрессивности: *естественную* (долговременную) и *индуцированную* (специфическую). Естественная супрессивность определяется преимущественно физико-химическими свойствами почвы (например, рН, содержанием доступных форм биофильных элементов, органических веществ и др.). Она не зависит от возделываемой культуры, не специфична в отношении различных фитопатогенов. Присущая почвам агроэкосистем индуцированная супрессивность более селективна, определяется зональной (локальной) системой земледелия и проявляется в отношении конкретной фитопатосистемы «хозяин-патоген» [8].

Осознавая и учитывая значимость этого явления, разрабатываются и предлагаются методы определения общей и специфической супрессивности почвы по ограничению роста фитопатогенов [1, 9]. Например, предлагается использовать дискодиффузионный метод определения супрессивности конкретной почвы. Для этого, образец нативной почвы с влажностью 60–70% ПВ, массой 10 г помещают в чашку Петри и заливают охлажденной агаризованной питательной средой для культивирования тестируемого фитопатогенного объекта. На поверхность застывшей над почвой питательной среды, размещают агаровые «блоки» диаметром 3–4 мм, вырезанные пробоборником из «газона» 7–10-дневной чистой культуры тест-объекта, выращенного на такой же питательной агаре. В качестве контроля используют агаризованную среду без почвы, на которую размещают такие же агаровые блоки с тест-объектом. О супрессивности почвы свидетельствуют два показателя. Полное подавление роста фитопатогена, например, гриба, определяемое по числу блоков без признаков роста тест-объекта от общего числа исследуемых блоков, т.е. нулевой размер зоны роста (ЗР) вокруг тест-объекта. Наличие какого-то роста вокруг блоков по сравнению с интенсивностью роста к контрольному варианту, т.е. наличие какой-то ЗР. Рассчитывают численный показатель супрессивности (С) на 1 г почвы (количественная характеристика) по довольно простой формуле, приведенной в патенте [9]. Интерпретация результатов простая. Значения супрессивности варьируют от 100% – полная *супрессивность почвы* (все блоки без признаков роста тест-объекта) до 0% – *кондуктивная почва* (все блоки тест-объекта демонстрируют рост на уровне контроля). Если, например, почва стимулирует развитие фитопатогена, то значение показателя супрессивности может быть отрицательным. Чем выше супрессивность почвы, тем ниже выживаемость в ней фитопатогенов и тем ниже их паразитарная активность [1, 9].

Предлагаются и другие методы определения почвенной супрессивности, например, по коэффициенту паразитической активности возбудителя (КПАВ) [1]. Между величиной КПАВ и степенью супрессивности почв установлена обратная зависимость: чем ниже КПАВ, тем выше супрессивность почвы. Известен метод определения, как естественной, так и индуцированной супрессирующей активности почвы на основе графических данных определения динамики развития болезни растений по площади под кривой развития болезни (*area under disease progress curve* – AUDPC) [4, 10].

Упомянутые выше методы обнаружения, оценки и использования знаний о почвенной супрессивности при несомненной их нужности и значимости имеют один недостаток. Ощутимую сложность и длительность проведения анализов, необходимость микробиологической лаборатории и квалифицированного аналитика. Это ограничивает их доступность для рядового земледельца. Таким образом, задача разработки экспрессных, простых и, следовательно, повсеместно доступных методов, остается актуальной.

Поддержание и сохранение здоровья почвы в агросистемах

Условиями поддержания и сохранения здоровой ПЭ, особенно в системах органического земледелия, являются следующие обязательные условия. 1) Непременное внесение в агросистему балансово-восполняющих количеств «здоровых» органических удобрений с недопущением пребывания агросистемы в состоянии «черного пара». 2) Проведение обработки ПЭ щадящими методами, способствующими устойчивому функционированию почвенной биоты, не ухудшая физико-химические и биологические характеристики ПЭ. 3) Использование длинно-ротационных севооборотов, посевов «мозаик» сортов и видов растений с включением в севооборот

разнообразной сидеральной флоры, обладающей супрессирующей активностью в отношении фитопатогенов, релелентными свойствами к фитофагам и конкурентными способностями в подавлении сорных растений. 4) Обязательное использование в севооборотах симбиозофильных и микоризных растений. 5) Проведение необходимых мелиоративных и/или ирригационных мероприятий, как оптимизация агротехнологии ПЭ. 6) Использование в защите посевов водных экстрактов других растений, компостов и «супрессивных почв», отселектированных натуральных микробных сообществ, получаемых из почв со стабильными супрессирующими свойствами [5, 11]. 7) Мониторинг физико-химических и биологических характеристик ПЭ в виде регулярного качество– количественного анализа динамик активного органического вещества, концентраций биофильных элементов и других макро– и микроэлементов с расчетом их баланса в круговороте веществ и энергии ПЭ. Перечисленные и другие рациональные для здоровья почвы меры позволят поддерживать ее устойчивое состояние ПЭ.

О способах диагностирования ПЭ для восстановления и «терапии»

Как прообраз современного подхода в решении биотехнологических задач применительно к ПЭ, предлагается обсудить методы ее оздоровления (реабилитации, лечения) на основе показателей ее гетеротрофного параметра здоровье и самообеспечения биофильными элементами.

В социальной сфере, наряду с понятием здоровье приемлемы такие определения, как лечение и поддержание здоровья. Лечение применимо практически только к индивиду. ПЭ – это биологическое сообщество, в первую очередь – микробное. Для ПЭ вначале нужно понять, что нуждается в «лечении», и возможно ли оно, исходя из фундаментальных законов и функций микробного сообщества и учета физико-химических характеристик ПЭ. Следует помнить, что есть и трудно диагностируемые, трудно лечимые и даже «неизлечимые» болезни. Несомненно и то, что для проведения оздоровления, реабилитации, а тем более лечения почвы необходимо иметь корректный диагноз заболевания.

При оценке здоровья почвы должны быть использованы те же методы, с помощью которых были обоснованы его параметры, а постановка диагноза должна осуществляться на основании и в соответствии со знанием их «идеологии». Для диагностирования ПЭ гетеротрофный параметр здоровья почвы необходимо рассматривать и интерпретировать не только как показатель «совпадения» или «отличия» по этому показателю эталонной и исследуемой почв. В результате определения гетеротрофного параметра получают его количественные значения, которые можно использовать для диагноза и лечения ПЭ. Количественный показатель гетеротрофного параметра исследуемой почвы может количественно либо совпадать с эталонной почвой, либо в различной степени отличаться. Закономерные вопросы о том насколько «ниже» или «выше» значения исследуемой почвы от значений эталонной и насколько такие различия значимы. Также важны данные о «лекарствах», их дозах, длительности лечения и др.; эти проблемы решаются только посредством накопления данных и с помощью «банка данных» о здоровье почвы разных экотопов, знании предыстории ПЭ.

Чтобы иметь диагноз об активности трансформации биофильных элементов в ПЭ нужно определить параметр для оценки активности этого процесса. Подобный диагноз поможет получить ответ на важный для пользователя вопрос, «не истощена ли» или «не перекармлена ли» ПЭ биогенными, легко доступными неорганическими элементами в форме NH_4^+ и NO_3^- , PO_4^- и др. Для этого по узаконенным показателям

необходимо получить их количественные оценки для сравниваемых почв. Эти количественные значения можно использовать для диагноза и лечения ПЭ, по аналогии с подходом определения ее самообеспечения биофильными элементами.

ПЭ может иметь проблемы и со здоровьем в виде избыточного, не контролируемого развития каких-то микроорганизмов, в первую очередь, фитопатогенных. Это можно выявить посредством гетеротрофного параметра и самообеспеченности ПЭ биофильными элементами. Однако для этого необходимо глубоко знать предысторию эталонной и исследуемой почв. Зачастую чрезмерное развитие почвенных фитопатогенов – это следствие нарушения баланса $C_{орг.}$ или биогенных, легкодоступных неорганических элементов, либо и того, и другого. «Лечить» подобную почву можно, (а) восстановлением баланса $C_{орг.}$ или биогенных, легко доступных неорганических элементов, либо того и другого; (б) соблюдением баланса других (микро)элементов, (в) фитосанитарной агротехнологией [11].

Поскольку существуют очень тяжелые, даже «неизлечимые» болезни ПЭ, то для их лечения радикальным остается применение пестицидов или тотальная фу-мигация ПЭ.

Заключение

Предложение именовать почву агроферы почвенной экосистемой (ПЭ) является оправданным и необходимым, по крайней мере, в научно-исследовательской и преподавательской сферах. Необходимо четко обозначать и подразделять ПЭ на природную и агроэкосистему, эксплуатируемую по традиционной и интенсивной технологиям, либо по органической технологии. Только биологическая категория может обладать такой характеристикой, как здоровье. В этой связи уместны и необходимы подходы и методы, позволяющие оценить и количественно измерить категорию здоровья ПЭ. Предложенные методы определения здоровья почвы в виде более общих параметров (гетеротрофный параметр) и специфичных (параметр определения здоровья почвы для оценки самообеспечения ПЭ биофильными элементами) на наш взгляд позволяют объективно и адекватно оценить здоровье почвы. Продолжение разработки параметров оценки супрессирующей активности ПЭ – важная и актуальная задача в силу активного развития органического земледелия. Перечень мер и приемов поддержания и сохранения здоровья почвы в современных агроэкосистемах, особенно в органическом земледелии, следует рассматривать как первично необходимый и нуждающийся в постоянной адаптации к конкретной ПЭ. Предложенные способы диагностирования здоровья ПЭ на основе разработанных параметров выдвигают новые задачи по обеспечению системы диагнозов системой рецептов, необходимых для системного оздоровления ПЭ.

Авторы благодарят Van Bruggen A.H.C and Finckh M.R. за организацию и опубликование замечательной книги «Plant Diseases and Their Management in Organic Agriculture. ed. by Finckh M.R., van Bruggen A.H.C., Tamm L. USA. APS PRESS, 2015. 424 p.

Библиографический список

1. Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М. Агрорус. 2016. 288 с.
2. Семенов А.М. Здоровье почвы: характеристика содержания и методы количественного определения // Материалы VIII Московского Международного

конгресса «Биотехнология: состояние и перспективы развития». Ч. 2. Москва. 2015. с. 205.

3. Семенов А.М., Семенова Е.В. Способ определения параметра здоровья в образцов почвы, компостов и других твердых субстратов. В сборнике «Современные проблемы гербологии и оздоровления почв». Материалы Международной научно-практической конференции посвященной 85-летию со дня рождения Д.И. Чканикова. (21–23 июня 2016). Большие Вяземы. 2016. С. 291–298.

4. Семенов А.М., Соколов М.С. Концепция здоровья почвы: фундаментально-прикладные аспекты обоснования критериев оценки // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 3–16.

5. Семенов А.М., Глинушкин А.П., Соколов М.С. Органическое земледелие и здоровье почвенной экосистемы // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. № 8. С. 5–8.

6. Семенов А.М., Глинушкин А.П., Соколов М.С. Органическое земледелие и здоровье почвенной экосистемы. В сборнике «Современные проблемы гербологии и оздоровления почв». Материалы Международной научно-практической конференции посвященной 85-летию со дня рождения Д.И. Чканикова. (21–23 июня 2016). Большие Вяземы. 2016. С. 283–291.

7. Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика здоровья и качества почвы // *Агрохимия*. 2011. № 12, С. 4–20.

8. Филипчук О.Д., Соколов М.С., Павлова Т.В. Использование супрессивности почвы в защите растений от корневых инфекций // *Агрохимия*. 1997. № 8. С. 81–92.

9. Торопова Е.Ю., Кириченко А.А. Способ определения супрессивности почвы. Патент, // RU2568913. URL <http://www.findpatent.ru/patent/256/2568913.html> (дата обращения 18.12.2016).

10. He M., Tian G., Semenov A.M., Van Bruggen A.H.C. Short-term fluctuations of sugar-beet damping-off by *Pythium ultimum* in relation to changes in bacterial communities after organic amendments to two soils // *Phytopathol.* 2012. V. 102. P. 413–420.

11. Van Bruggen A.H.C., Semenov A.M. Soil health and soil borne diseases in organic agriculture // In: *Plant diseases and their management in organic agriculture* / Eds. Finckh M.R., Van Bruggen A.H.C., Tamm L. 2015. USA: APS PRESS. 424 p.

SOIL ECOSYSTEM HEALTH: FROM FUNDAMENTAL QUESTIONS TO PRACTICAL SOLUTIONS

A.M. SEMENOV^{1,2}, A.P. GLINUSHKIN², M.S. SOKOLOV²

(¹ Lomonosov Moscow State University;

² Russian Research Institute of Phytopathology)

What is discussed and justified is the necessity of a wide use of the “soil ecosystem” (SE) category as more objectively meaningful and concrete term rather than the concise but differently conceptual term – “soil”. The modern soil ecosystem is subdivided into natural and anthropogenic or agroecosystem, and the latter is subdivided into conventional, organic and low input agriculture based on exploitation technologies; the key characteristics of organic, conventional and low input agriculture are also analyzed. A new general characteristic of the soil ecosystem is discussed – soil health (SH) and its scientific parameters. The methods of determining soil health in the form of parameters are given. The heterotrophic parameter of soil health (HPSH) and key provisions for performing this method and the subsequent ones are described. A new

parameter for determining soil health is presented and discussed in the form of a parameter for assessing the self-sufficiency (PSSE) of the soil ecosystem by key biophilic elements, nitrogen and phosphorus. The approaches to the development of parameters for assessing suppressive activity and the control of “pathogenesis” in the soil ecosystem are discussed. The necessity of assessing the health of the soil ecosystem depending on their types and exploitation is considered. The conditions for maintaining a healthy soil ecosystem are considered, especially in organic farming systems. Options for conservation and protection of soil health, natural and induced suppressive activity of the soil ecosystem are discussed. The ways of diagnostics and therapy of soils, modern agroecosystems are described based on the developed indicators in the form of a heterotrophic parameter of soil health and the parameter of self-sufficiency assessment of the soil ecosystem by biophilic elements.

Key words: soil ecosystem, agroecosystem, soil health, health options, protect, therapy.

References

1. Glinushkin A.P., Sokolov M.S., Toropova Ye.Yu. Fitosanitarnyye i gigiyenicheskiye trebovaniya k zdorovoy pochve [Phytosanitary and hygienic requirements for healthy soil]. M. Agrorus. 2016. 288 p.
2. Semenov A.M. Zdorov'ye pochvy: kharakteristika sodержaniya i metody kolichestvennogo opredeleniya [Soil health: characteristics of the content and methods of quantitative determination] // Materialy VIII Moskovskogo Mezhdunarodnogo kongressa “Biotekhnologiya: sostoyaniye i perspektivy razvitiya”. Part 2. Moskva. 2015. P. 205.
3. Semenov A.M., Semenova Ye.V. Sposob opredeleniya parametra zdorov'ya v obraztsov pochvy, kompostov i drugikh tverdykh substratov [Methodology for determining the health parameter in soil samples, composts and other solid substrates]. In “Sovremennyye problemy gerbologii i ozdorovleniya pochv”. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii posvyashchennoy 85–litiyu so dnya rozhdeniya D.I. Chkanikova. (21–23 iyunya 2016). Bol'shiye Vyazemy. 2016. Pp. 291–298.
4. Semenov A.M., Sokolov M.S. Kontseptsiya zdorov'ya pochvy: fundamental'no-prikladnyye aspekty obosnovaniya kriteriyev otsenki [The concept of soil health: fundamental and applied aspects of the determination of the evaluation criteria] // Agrokimiya. 2016. No. 1. Pp. 3–16.
5. Semenov A.M., Glinushkin A.P., Sokolov M.S. Organicheskoye zemledeliye i zdorov'ye pochvennoy ekosistemy [Organic farming and the soil ecosystem health] // Dostizheniya nauki i tekhniki APK. 2016. Vol. 30. No. 8. Pp. 5–8.
6. Semenov A.M., Glinushkin A.P., Sokolov M.S. Organicheskoye zemledeliye i zdorov'ye pochvennoy ekosistemy [Organic farming and the soil ecosystem health]. In: “Sovremennyye problemy gerbologii i ozdorovleniya pochv”. Materialy Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii posvyashchennoy 85–letiyu so dnya rozhdeniya D.I. Chkanikova. (21–23 iyunya 2016). Bol'shiye Vyazemy. 2016. Pp. 283–291.
7. Semenov A.M., Semenov V.M., Van Bruggen A.Kh.K. Diagnostika zdorov'ya i kachestva pochvy [Diagnostics of soil health and quality] // Agrokimiya. 2011. No. 12, pp. 4–20.
8. Filipchuk O.D., Sokolov M.S., Pavlova T.V. Ispol'zovaniye supressivnosti pochvy v zashchite rasteniy ot kornevykh infektsiy [Use of soil suppressiveness in plant protection from root infections] // Agrokimiya. 1997. No. 8. Pp. 81–92.
9. Toropova Ye.Yu., Kirichenko A.A. Sposob opredeleniya supressivnosti pochvy [Methodology for determining the soil suppressiveness]. Patent // RU2568913. URL <http://www.findpatent.ru/patent/256/2568913.html> (access date: 18.12.2016).

10. He M., Tian G., Semenov A.M., Van Bruggen A.H.C. Short-term fluctuations of sugar-beet damping-off by *Pythium ultimum* in relation to changes in bacterial communities after organic amendments to two soils // *Phytopathol.* 2012. Vol. 102. Pp. 413–420.

11. Van Bruggen A.H.C., Semenov A.M. Soil health and soil borne diseases in organic agriculture // In: *Plant diseases and their management in organic agriculture* / Eds. Finckh M.R., van Bruggen A.H.C., Tamm L. 2015. USA: APS PRESS. 424 p.

Семенов Александр Михайлович – д.б.н., вед. науч. сотр. кафедры микробиологии биологического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова (119234, Москва, Ленинские горы, 1/12; тел.: 8 (910) 445-01-31; e-mail: amsemenov@list.ru).

Глинушкин Алексей Павлович – д.б.н., проф., директор ВНИИ фитопатологии (143050, Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5; e-mail: glinale@gmail.com).

Соколов Михаил Сергеевич – д.б.н., проф., акад. РАН, научный консультант ВНИИ фитопатологии (143050 Московская обл., Одинцовский р-н, р.п. Большие Вяземы, ул. Институт, влад. 5; e-mail: sokolov34@mail.ru).

Semyonov Aleksandr Mikhailovich – DSc (Biol), the leading researcher of the department of microbiology of the Biology Faculty of the Moscow State University (119234, Moscow, Lenin's Hills, 1/12; mobile: 8-910-445-0131; e-mail: amsemenov@list.ru).

Glinushkin Aleksei Pavlovich – DSc (Biol), professor, director of All-Russian Research Institute of Phytopathology (VNIIF) (143050, Moscow Oblast, Odintsovskiy district, Bolskiye Vyazemy working settlement, Institut street, premises 5; e-mail: glinale@gmail.com).

Sokolov Mikhail Sergeevich – DSc (Biol), professor, RAS academician, scientific advisor in All-Russian Research Institute of Phytopathology (VNIIF) (143050, Moscow Oblast, Odintsovskiy district, Bolshiye Vyazemy working settlement, Institut street, premises 5; e-mail: sokolov34@mail.ru).