

УДК 63.54

Памяти Михаила Сергеевича Соколова, страстного сторонника,  
убежденного энтузиаста и популяризатора концепции  
“Здоровье почвы” посвящается

## ЗДОРОВАЯ ПОЧВА – УСЛОВИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И РАЗВИТИЯ АРГО- И СОЦИОСФЕР (ПРОБЛЕМНО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ ОБЗОР)

© 2020 г. **М. С. Соколов\*\***, **А. М. Семенов\*, \*\*, @**, **Ю. Я. Спиридонов\*\***,  
**Е. Ю. Торопова\*\*\***, **А. П. Глинушкин\*\***

\*МГУ им. М.В. Ломоносова, биологический ф-т, Ленинские горы, 1/12, Москва, 119234 Россия

\*\*Всероссийский научно-исследовательский институт фитопатологии, ул. Институтская, влад. 5,  
пос. Большие Вяземы, Одинцовский р-н, Московская обл., 143050 Россия

\*\*\*Новосибирский государственный аграрный университет, ул. Добролюбова, 160, Новосибирск, 630039 Россия

@E-mail: amsemenov@list.ru

Поступила в редакцию 20.02.2018 г.

После доработки 16.04.2018 г.

Принята к публикации 16.04.2018 г.

Рассмотрены характеристики здоровой почвенной экосистемы и требования к состоянию здоровья почв агро- и социосфер. Обсуждены показатели здоровья почвы, включающие в себя научные и фактические критерии и параметры. Проанализированы показатели качества почвы и интегрирующие их характеристики здоровья почвы, предлагаемые для руководства землепользователям, почвоведом-экологам и специалистам по бонитировке почв.

DOI: 10.31857/S0002332920010142

Почвы различаются по типам, свойствам и режимам использования (Добровольский, 2011). В них непрерывно происходят разнообразные биологические и физико-химические процессы, циклы микроорганизмов и химических элементов. Благодаря совокупности биологических и геохимических процессов почва обладает (до некоторого предела!) буферной способностью по отношению к различным нарушающим воздействиям. Уже миллиарды лет почва остается наиболее значимым на Земле источником биоразнообразия, особенно микробного. В почве перманентно воспроизводятся питательные вещества, потребляемые гетеро- и автотрофными организмами; именно земледелие обеспечивает человечество ~90% пищи, фуража и промышленного сырья.

К началу XXI в. значительная часть почв агро- и социосфер оказалась в кризисном состоянии. Не впадая в панику, сошлемся лишь на некоторые наиболее впечатляющие международные данные. Согласно ФАО (<http://www.fao.org/geonetwork/>) /ФАО сводный доклад/состояние мировых земельных и водных ресурсов) в мире площади сильно- и умереннодеградированных земельных угодий составляют соответственно 25 и 8%. Де-

градации подвержены >70% мировых пастбищ и >10% всех пахотных угодий, вследствие чего производство продовольствия на этих землях за последние 50 лет снизилось на 13% (Снакин, 2013). Почвы части селитебных территорий и промышленных зон превратились в ксеноценозы, полигоны, свалки отходов техно- и урбаносфер, что существенно снижает качество жизни населения (Соколов и др., 2016). Деградирующая, загрязненная поллютантами, заселенная фитопатогенами и патогенами животных почва агроценозов и селитебных территорий утрачивает присущие ей продукционные и экологические характеристики. Деградирующая почва несет реальную угрозу здоровью человека и домашних животных, существенно снижает продуктивность растений и качество урожая. Глобальный процесс деградации почв был образно назван “тихим кризисом планеты” (Добровольский, 1997).

Традиционно внимание почвоведов и землепользователей акцентировалось на механических, физико-химических показателях качества почвы (КП) и плодородия почвы (ПП), ответственных за ее сложение, состав, структуру, питательный режим. При этом ее биотическая составляющая недооценивалась или даже игнорировалась. Веро-

ятно, поэтому экологическая сертификация почв находится в стране пока на начальной стадии (Макаров, Каманина, 2008).

До недавнего времени отсутствовали осознанные представления о “здоровье почвы”, тем более о научно обоснованных критериях его оценки. В конце XX в. американские почвоведы-экологи (Doran *et al.*, 1996) декларировали понятие “здоровая почва” (ЗП). После них проблему здоровья почвы предметно стали изучать и обсуждать и в России (Van Bruggen, Semenov, 2000; Семенов, Ван Бругген, 2011).

В последние 30–40 лет в России и других странах накоплен положительный опыт ремедиации больных и загрязненных почв (Глинушкин и др., 2016). Конечно, этот опыт нуждается в осмыслении, обобщении, дополнительной проверке и развитии. В то же время для объективной бонитировки и выявления (на начальной стадии) больных почв землепользователям необходимы объективные, воспроизводимые и доступные количественные показатели оценки состояния ЗП. К сожалению, обоснование и определение подобных показателей, а также формулирование общей фундаментально-прикладной концепции ЗП проводятся недостаточно интенсивно. Одна из причин такой ситуации – недостаточная теоретико-методологическая, методическая и экспериментальная проработка обсуждаемой проблемы (Семенов, 2011).

Цель работы – краткое обобщение уже сформировавшихся экосистемных представлений о современной почве для обоснования количественных оценочных показателей здоровья и качества почв агро- и социосфер, позволяющих проводить мониторинг этих почв и принимать обоснованные решения о необходимости их оздоровления.

## ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ЗДОРОВОЙ ПОЧВЫ

По показателям КП и ПП почвенная экосистема может быть высоко-качественной, но не здоровой и наоборот. Критерии, оценивающие эти характеристики, зависят от того, к какой категории по типу эксплуатации относится почва (Семенов и др., 2019). Почва может быть нативной (природной, неосвоенной) или в различной степени эксплуатируемой. В агросистемах по фактору интенсивности эксплуатации выделяют несколько технологий использования почвы: экстенсивную, нормальную (традиционную), интенсивную, высокоинтенсивную и органическую; возможны также смешанное и переходное состояния (Семенов и др., 2016). Несомненно, только здоровую и плодородную почву соответствующей природно-климатической зоны уместно рассматривать как

эталон продукционной и биоресурсной экологической системы.

Состояние здоровья почвы (soil health) в основном определяется разнообразием, структурой и функциями почвообитающих организмов, главным образом микроорганизмов, поддерживающих ее экологический статус (Семенов, Соколов, 2016). Активность биоты во многом определяется климатическими условиями и флористическим разнообразием наземно-почвенной экосистемы, количеством и качеством непрерывно поступающей в почву фитомассы и корневых экссудатов растений.

Полагаем, что посредством количественной оценки состояния здоровья почвы можно объективно оценивать ее реальную биопродуктивность, способность неопределенно долго функционировать в качестве главного компонента наземно-почвенной экосистемы, поддерживать качество сопряженных вод и воздуха, здоровье растений, животных и человека (Doran *et al.*, 1996). Строго научно, здоровье почвы – это биологическая категория, отражающая состояние динамики активности биотического компонента в органо-минеральном комплексе почвы. Эта биологическая категория характеризуется в соответствии с природно-климатической зоной адекватной активностью биотических процессов (синтеза и гидролиза), их устойчивостью к нарушающим воздействиям (биотическим и абиотическим стрессорам), различными степенями “замкнутости” циклов биофильных элементов и микроорганизмов. Здоровье почвы агроценозов характеризуется еще и соответствием их вещественного и биотического состава нормативным показателям, а также адекватным плодородием (Семенов, 2015; Семенов, Соколов, 2016). По предлагаемым показателям здоровья должны обследоваться и оцениваться в первую очередь почвы водоохранных территорий, территорий детских учебных и оздоровительных учреждений, хозяйств по выращиванию семян лекарственных растений для производства лечебно-профилактического и детского питания. В качестве эталонов здоровых почв соответствующих природно-географических регионов страны могут рассматриваться незагрязненные и неинфицированные “референтные” почвы заказников, целинных и залежных угодий.

Здоровые почвы агросистемы могут содержать популяции вредных организмов и органических поллютантов, но не выше гигиенических, биологических и/или экономических порогов вредности. Обоснование подобных порогов – актуальная задача медицинской гигиены и защиты растений. Нарушение показателей здоровья почвы в процессе техногенеза свидетельствует о снижении ее компенсаторных свойств, об угрозе полезной биоте и здоровью человека. Для управления здо-

ровьем почв агроценозов и социосферы необходима количественная мониторинговая оценка этой важной экологической характеристики по предлагаемым показателям.

## ПОЧВА КАК ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА

Не умаляя роли накопленных знаний о химическом составе, физико-химических и механических характеристиках почвы, в соответствии с учением о почвенных экологических функциях, активно влияющих на почвообразующие факторы (Добровольский, Никитин, 2006), для лучшего понимания и более эффективного управления здоровьем почвы, назрела необходимость оценивать ее не традиционно как "...биокосное природное тело, паразитная система...", а с экосистемных позиций, средообразующих функций, т.е. как почвенную экологическую систему (ПЭС) (Семенов, Семенова, 2018; Семенов и др., 2019). ПЭС состоит из неорганической компоненты, живых существ (биота) и неживого вещества. Это метаболиты, мортмасса биоты и продукты гидролиза мортмассы биоты — органическое вещество. ПЭС высвобождает и аккумулирует биофильные элементы, трансформируя их в доступные биоте формы. Таким образом, то, что традиционно именуют почвой, в итоге — продукт функционирования почвенной экосистемы (Семенов и др., 2011а). В этой системе протекают важнейшие биологические и физико-химические процессы в различной степени замкнутых биогеохимических циклах элементов и микроорганизмов (Семенов, Соколов, 2016). Давно очевидно, что без микроорганизмов высшие автотрофы смогут просуществовать лишь эволюционно короткий период, в то время как микроорганизмы, в особенности прокариоты, способны неопределенно долго обходиться без высших организмов (Семенов, 2004).

Любая ПЭС обладает определенными буферными свойствами в отношении различных стрессоров. Она поставляет биофильные элементы и физиологически активные вещества растениям и гетеротрофам, служит источником и стоком биофильных элементов и разнообразной биоты (Семенов, 2015; Семенов, Соколов, 2016). Именно биологическая составляющая почвы обуславливает средообразование, продуктивность и свое собственное разнообразие. К нормально функционирующей почвенной экосистеме применимы такие биологические характеристики, как здоровье и/или ее патология. Несомненно, здоровье и патология почвы во многом определяются экоресурсом соответствующего биотопа, типом его эксплуатации. Следовательно, в определении почвы как продукта функционирования экосистемы выделяется биотическая составляющая, ее здоро-

вье, супрессирующая активность и способность к самовоспроизводству.

## НЕКОТОРЫЕ КЛЮЧЕВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЧВЫ АГРОЭКОСИСТЕМ

Емкое понятие "качество почвы" и ее потребительская характеристика — плодородие (реальная и потенциальная биопродуктивность) — применимы как к природным, так и к освоенным почвам социо- и агроэкосистем (Соколов и др., 2015; Глинушкин и др., 2016). Качество освоенной почвы дополняется понятием "бонитет", т.е. ее экономической оценкой. Качественная культивируемая почва, несомненно, должна быть плодородной и здоровой, со сбалансированной биотой (Соколов, 2012). Полагаем, что в официально действующем определении почвы (ГОСТ 27593-88..., 2017) недостаточно отражена роль биотической составляющей как основного компонента.

Здоровая почва (новая генеральная характеристика) содержит минеральные ингредиенты и гумус, биоту и мортмассу, метаболиты и биофильные элементы, по-разному доступные биоте. Подчеркнем, что состояние здоровья почвы определяется структурой и активностью ее биоты, а биологическая активность почвы зависит от климата и флористического разнообразия наземно-почвенной экосистемы. Почвенная биота, растительный компонент и климат определяют количественное содержание и состав почвенного органического вещества. Почвенное органическое вещество — конечный продукт микробной трансформации растений и другой мортмассы. Оно служит долговременным источником органического субстрата и энергии для почвенной биоты, преимущественно микробиоты, выполняя важную функцию в реализации широкого спектра защитных (санитарных, фитосанитарных) свойств почвы (Семенов, Ван Бругген, 2011; Семенов и др., 2011а).

Отмечена коррелятивная зависимость между содержанием в почве органического вещества и проявлением ее супрессивной активности (Семенов, Семенов, 2016). Например, для разных типов почв Западной Сибири продемонстрирована тесная коррелятивная связь ( $r = 0.77$ ) биологического порога вредоносности *Bipolaris sorokiniana* (возбудитель обыкновенной корневой гнили пшеницы и ячменя) и содержанием почвенного гумуса. При снижении гумусированности почвы в 2 раза вредоносность обыкновенной корневой гнили яровой пшеницы повысилась в 5–6 раз (Торопова и др., 2017). Следовательно, гумусированность почвы может способствовать ее супрессивности, обеспечивая тем самым равновесие между сапротрофами и различными конкурентами-биотрофами, включая токсигенные микромицеты

(Stone *et al.*, 2004; Торопова и др., 2016, 2017). При дегумусировании почвы это равновесие в ней нарушается, что приводит к росту численности фитопатогенов, а может быть и других патогенов.

Интенсивное земледелие, как правило, приводит к хроническому уменьшению содержания почвенного органического вещества в ПЭС. Это влечет за собой ухудшение здоровья почвы. В то же время под действием специфических приемов органического земледелия в подвергнутой дегумизации почве содержание органического вещества постепенно восстанавливается или даже возрастает; параллельно с этим снижается концентрация легкодоступных форм азота и возрастает доля общего азота. Увеличиваются также таксономическое и функциональное биоразнообразие, микробиологическая активность почвы и доля микробной биомассы (повышается численность азотфиксирующих бактерий и микоризных грибов). В итоге улучшается структура почвы, ее агрегатный состав, водоудерживающая способность, что индуцирует рост почвенной мезофауны (Семенов и др., 2016, 2019).

#### ЗДОРОВАЯ ПОЧВА КАК НЕОБХОДИМЫЙ ФАКТОР УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ АГРО- И СОЦИОСФЕРЫ

Введение новой категории “здоровье почвы” сначала как продолжение и расширение понятия “качество почвы” было предложено в США в 1990-х гг. (Doran *et al.*, 1996). Как научно-практические категории эти почвенные характеристики были одобрены комиссией по качеству почвы Американского общества почвоведов (The Soil Science Society of America) (Karlen *et al.*, 1997). По определению американских почвоведов, “здоровье почвы — это ее способность неопределенно долго функционировать в качестве компонента наземной экосистемы, обеспечивая ее биопродуктивность и поддерживая качество воды и воздуха, а также здоровье растений, животных и человека” (Doran, Zeiss, 2000). Схожее определение (но еще более антропоцентрическое) позже было предложено отечественными почвоведом (Кожевин, 2001).

По современным представлениям ЗП должна характеризоваться сбалансированным биоразнообразием, отсутствием абио- и биотических факторов вредности, превышающих допустимые лимиты. Биота ЗП содержит микроорганизмы-супрессоры, подавляющие развитие чужеродной и патогенной микробиоты. Целинные, залежные и некоторые почвы агроценозов именуют супрессивными, поскольку они изначально обладают свойствами подавлять развитие отдельных видов или групп почвообитающих патогенов. Полагают, что “главным механизмом” супрессивности обладает биотическая компонента ПЭС. В почвах естественных

биоценозов механизм супрессивного действия, например, в отношении фитопатогенных микроорганизмов проявляется в виде конкуренции за субстрат, антибиоза, паразитизма и сверхпаразитизма (Соколов и др., 2010; Van Bruggen, Semenov, 2015).

Практически все известные органические поллютанты (природные, ксенобиотические) утилизируются и/или трансформируются микроорганизмами, но за разное время. Учитывая широкие микробно-растительные взаимодействия, такие как образование симбиотических ассоциаций с корнями растений, функционирование микоризных и других симбиотрофных ассоциаций микроорганизмов, а также свободноживущих азотфиксаторов, продуцирующих разнообразные вещества, и в целом обеспечивая доступными формами биофильных элементов растения-продуценты, здоровая гетеротрофная биота воздействует на структуру почвы, повышает ее поглотительную способность и в итоге влияет на количество и качество урожая (FAO, 2008). Только в условиях здоровой почвы возможно формирование здорового фитоценоза.

Итак, только ЗП может функционировать как супрессор патогенов и пурификатор экосферы. В глобальном масштабе она смягчает негативные последствия изменения климата в виде парникового эффекта, выступая в качестве постоянно действующего бассейна стока, аккумулятора, а также источника атмосферного углерода и других биофилов (Заварзин, Кудеяров, 1993; Кудеяров и др., 2007; FAO, 2011).

#### НЕКОТОРЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗДОРОВЬЯ ПОЧВЫ

Разработка количественных показателей для диагностики состояния здоровья почвы продвигается медленно. Причины этого — отсутствие согласованных (на международном уровне) объективных количественных показателей, научно обоснованных, экологически, социально и экономически значимых. Такие показатели крайне необходимы для оценки стоимостного статуса земель, для ранжирования их экологического и социального состояния. Как было продемонстрировано ранее (Fernandez *et al.*, 2007; Janier *et al.*, 2007), традиционные классификационные характеристики и показатели качества почвы (Фомин, Фомин, 2001) не коррелируют с состоянием почвенного здоровья. Поэтому методология выбора и научного обоснования объективных показателей, используемых для оценки ЗП, продолжает оставаться в центре внимания исследователей (Семенов, Глинушкин, 2019).

По-видимому, прежде чем разрабатывать методику определения показателей ЗП, необходимо

сначала четко обозначить ее принадлежность. Обсуждать качество почвы, а тем более ЗП “вообще”, независимо от ее производственной, социальной значимости, а также предназначения — бессмысленно. Основное требование к здоровым почвам агроценозов — “экологичное” производство программируемого, приемлемого по количеству и качеству нормативно чистого урожая. Требование к почвам селитебных территорий — обеспечение оптимальных, комфортных условий для проживания населения, его социальной и производственной деятельности.

Качество почвы не может быть обобщено с помощью одного показателя, компонента или процесса. Оценка должна включать в себя информацию если не о многих, то о нескольких показателях. Они в зависимости от заявленной цели могут иметь разные шкалы и размерности и вносить различный непропорциональный вклад в оценку плодородия (Burns *et al.*, 2006). Совершенно очевидно, что показатели качества почвы, конечно, зависят и от особенностей ее эксплуатации.

ЗП в зависимости от назначения, генезиса, географического положения, типа и механизмов регулирования должна иметь конкретные показатели, характеризующие ее качество. Для оценки качества и ЗП агроценозов и селитебных территорий специалистами ФАО (ФАО, 2011) предложено использовать широкий набор показателей, в частности показатели качества и плодородия: оптимальную продуктивность (в отношении конкретных культур); сбалансированную биоту почвенной экосистемы; оптимальное функционирование почвенно-поглощающего комплекса (препятствующее выщелачиванию биофильных элементов); достаточно высокую (в ограниченном диапазоне гидротермических ресурсов) скорость реутилизации биофильных элементов; оптимальный гидрологический режим, низкую теплоотдачу. Несомненно, все эти характеристики присущи и ЗП.

Здоровые почвы агроценозов должны обладать комплексным растительным покровом, приемлемой биопродуктивностью и оптимальным содержанием гумусовых веществ, низкой скоростью эрозии, интенсивным самоочищением от поллютантов и малой энергозатратностью на поддержание экосистемных функций. Эти характеристики соответствуют понятиям качества, плодородия и здоровья почвы (Глинушкин и др., 2016; Семенов и др., 2019).

При оценке состояния здоровья почвенной экосистемы (почвы) предлагается рассматривать следующий комплекс показателей: показатель вещественного состава, отражающий в целом или по отдельности биологические, химические и физические свойства почвы; показатель непрерывности проявления основных экологических функций ПЭС, таких как биогеохимические циклы био-

фильных элементов, микроорганизмов и влаги; количественные показатели способности конкретной ПЭС противодействовать деградации смежных земельных угодий и отсутствию негативных воздействий на них (Anon. Soil health). Всего для индикации качественной и здоровой почвы уже предложено от 60 до 100 различных характеристик (Arias *et al.*, 2005; Семенов и др., 2011a). Необходимый для оценки качества и здоровья почвы набор индикаторов и аналитических протоколов продолжает обсуждаться экспертами (Burns *et al.*, 2006). В США, например, предложены 13 основных показателей для оценки качества почвы (Doran *et al.*, 1996), в ЕС — 35, включая 17 физических, 11 химических и 7 биологических (Burns *et al.*, 2006).

Справедливо мнение (Van Bruggen, Semenov, 2000; Семенов, Бубнов, 2013), что любая ЗП должна характеризоваться максимально возможной “замкнутостью” трофических циклов (самообеспечением), а также устойчивостью (буферностью) и сопротивляемостью по отношению к нарушающим воздействиям (resilience and resistance). При этом количественные колебания численности и структуры отдельных групп микробного сообщества, вызванные нарушающими воздействиями (удобрения, сидераты, растительные остатки, пестициды, температура, влажность), могут не только использоваться в качестве показателя буферных характеристик почвы, но и выступать в качестве индуктора при оценке функционального параметра ЗП (Семенов и др., 2011b; Семенов, Семенова, 2016, 2018).

Необходимо отметить, что при анализе индуцированной метаболической активности микроорганизмов в почве важно использовать относительно длительное (3–5 сут), как минимум ежедневное, определение и регистрацию показателей наблюдаемых процессов, т.е. их динамику, поскольку имеется ярко выраженная волнообразная динамика ответа микробного сообщества на действие индуктора (Семенов, 2001; Семенов и др., 2011b; Семенов и др., 2013). Именно поэтому некорректно использовать для оценки статуса почвы дискретные, одноразовые и эпизодически определяемые показатели численности и/или активности каких-либо индикаторных групп ее микробиоты (Семенов, 2001; Семенов, Семенова, 2018; Семенов и др., 2013; Semenov *et al.*, 1999).

Одним из авторов был разработан и запатентован метод определения параметра здоровья почвы на основе количественной оценки ее субстрат-индуцированного дыхания (Семенов и др., 2011b; Семенов, Семенова, 2016). Отметим, что земледельцы США (Kick, 2015) для тестирования здоровья почвы тоже применяют такой биологически значимый показатель, как дыхание почвы. Как полагает Кайнянги (Kinyangi, 2007), при скрининге состояния здоровья почвы важно ис-

пользовать индикаторные критерии, определяемые инструментально. Другим примером в продвижении и развитии стандартизированной оценки качества почвы может служить показатель ее фитотоксичности (ГОСТ ИСО № 22030-2009). Фитотестирование отражает совокупное влияние различных поллютантов, ингибирующих (или лимитирующих) факторов на рост, развитие и продуктивность высших растений. Фитотестирование важно для землепользователя, так как оно определяет качества почвы.

Тем не менее согласимся, что при наличии определенного прогресса в поисках функционально значимых параметров и индикаторов здоровья почвы запрос на показатели ЗП остается открытым (Семенов и др., 2013). Основная причина — сложность выбора минимума функций, объективно характеризующих состояние здоровья почвы, а использование для этих целей все возрастающего числа диагностических показателей лишено практической перспективы. Дополнение основной причины — отсутствие инструментальных решений для измерения комплексных, функционально значимых показателей ЗП и программных продуктов для обработки также комплексных и функционально значимых цифровых показателей ЗП (Семенов и др., 2009).

#### ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ФАКТОЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ КАК ПОКАЗАТЕЛИ ЗДОРОВЬЯ ПОЧВЫ АГРОЦЕНОЗОВ И СЕЛИТЕБНЫХ ТЕРРИТОРИЙ

Очевидно, что применительно к агроэкосистемам и селитебным территориям обсуждаемые диагностические показатели, определяющие ЗП, должны включать в себя только важнейшие функциональные параметры почвы. На практике степень их реализации во многом определяется не только биологическими, физико-химическими характеристиками почвы, экоресурсами конкретного биотопа, но и социально-экологическими требованиями. Ограничения содержания в почве поллютантов на законодательной основе включены в специальный перечень ПДК в почве. Такие обязательные для почвы нормативы химических веществ и биологических агентов обозначены как фактологические критерии здоровой почвы.

Подавляющее большинство почв естественных биогеоценозов (исключая аномальные и техногенно-загрязненные территории), существенно различающихся по плодородию, априори относятся к здоровым. Зональной природной почве присущи оптимум биотического разнообразия, природная супрессивность и отсутствие поллютантов. Исключение — почвы природно-аномальных биогеохимических провинций (Снакин, 2008; Добровольский, 2009). Такие “аномальные” почвы опосредо-

ванно (через пищу, воду, приземную атмосферу) ухудшают здоровье людей, вызывая у них эндемические заболевания, так называемые биогеохимические эндемии (в рамках данной статьи не обсуждаются).

Здоровье почв, эксплуатируемых в системах органического земледелия (как и природно-нативных), должно характеризоваться ненарушенными биогеохимическими функциями (трансформацией органического вещества, метаболизмом биогенных элементов); потенциальной способностью к подавлению эпифитотийного размножения и/или выживания паразитарных организмов, обеспечиваемой микробами- супрессорами, а также самоочищением от поллютантов, осуществляемым в основном прокариотическими деструкторами (Семенов и др., 2016, 2019). Поскольку количественные критерии оценки ЗП агроэкосистем и селитебных территорий пока официально не согласованы, предпринимаются попытки характеризовать состояние здоровья почвы полуквантитативно, посредством оценочных баллов (Черников и др., 2000; Семенов и др., 2011a; Соколов, 2012; Семенов, Семенов, 2016).

Особую роль в оценке ЗП агроценозов играет статус углеродно-азотного баланса почвы. С общеэкологических позиций баланс органического углерода ( $C_{org}$ ) почвы включает в себя основную приходную составляющую — приток ассимилированной автотрофами  $CO_2$ . Расходная составляющая углерода в почве связана преимущественно с биологическими процессами и сводится к эмиссии  $CO_2$  вследствие брожения и дыхания почвенных микроорганизмов, дыхания автотрофов и почвенной мезофауны.

В балансе азота почвы совокупные гетеро- и автотрофные превращения азота включают в себя приток в виде бактериальной фиксации молекулярного азота и аммонификации связанного азота (минорный и мажорный вклады соответственно). Потери азота — ассимиляционно-диссимиляционная нитрат-редукция и денитрификация (Банкина и др., 2002; Кузнецов, Градова, 2006). Известно, что активную азотфиксацию осуществляют только некоторые прокариоты. Этот процесс высокоэнергозатратен и значим только лишь для некоторых первичных экосистем. Азот мортмассы минерализуется гетеротрофами в процессах аммонификации и нитрификации. Он теряется почвенной экосистемой в виде газов (молекулярного азота, закиси и оксидов азота, образующихся при денитрификации и нитрификации и даже в виде аммиака — при активной аммонификации) и при вымывании из почвы в основном в форме нитратов.

Поступление азота и содержание в почве аммония и нитратов регламентировано по гигиеническим ограничениям для почв отдельных сели-

тебных территорий (Гигиеническая..., 1999; Санитарно-эпидемиологические..., 2005). В природных здоровых почвах процессы поступления азота, особенно легкодоступного, и его убыли практически уравновешены

Баланс азота в почвах агроценозов и селитебных территорий нарушают различные социальные и техногенные факторы: переудобрение, загрязнение почвы продуктами и отходами жизнедеятельности, техногенные выбросы, несанкционированные муниципальные свалки, кислотные дожди и т.д. Этим объясняется необходимость постоянного мониторинга содержания азота в таких почвах. Сбои этого комплексного процесса дезорганизуют санитарно-гигиенический режим в этих почвенных системах. Для количественной оценки нитрификации и минерализации азота в почве рекомендован официальный метод (ГОСТ ИСО 14238-2014, 2015).

Мы предложили количественно оценивать состояние ЗП агросистем посредством функциональных параметров и фактологических критериев. Согласно последним ЗП агросистем должна быть нормативно чистой, не содержать регламентированных вредных веществ и/или биоагентов выше законодательно устанавливаемых нормативных показателей. По функциональным параметрам конвенционно-здоровая почва агросистем должна либо соответствовать, либо превосходить соответствующую конвенционно-эталонную почву по показателям динамики важнейших биогеохимических и экологических процессов. Такие процессы оцениваются скоростью оборота биофильных элементов, биоконтролем и супрессией фитопатогенных (патогенных) биоагентов, деструкцией и/или утилизацией органических поллютантов. Фактологические критерии оценки состояния ЗП агросистем по существу уже давно используются в агрономической и санитарной практике для оценки экологического, гигиенического и фитосанитарного статусов почв.

Итак, ЗП агросистем должна обладать экологической устойчивостью; сбалансированностью разных видов биоты и ее адаптивностью к экоресурсам; способностью к самоочищению от органических поллютантов и супрессией по отношению к вредной биоте — фитопатогенной и санитарно-показательной (Соколов и др., 2010, 2011; Соколов, Марченко, 2011).

С учетом вышеизложенного краткое определение понятия “здоровье почвы” агроценозов — это биологическая категория почвенной экосистемы, характеризующаяся способностью к устойчивой динамике оборота соединений биофильных элементов и микроорганизмов, самовосстановлением, биоконтролем чужеродных биоагентов и самоочищением от поллютантов (Соколов и др., 2015; Семенов, Соколов, 2016). Очевидно, что это

определение в дальнейшем будет уточняться. Несколько функциональных параметров (биологических характеристик) почвы уже приобрели свой статус в составе важнейших биотических показателей ЗП и нашли практическое применение (Семенов, Ван Бругген, 2011; Семенов и др., 2011б; Соколов и др., 2015, 2016; Глинушкин и др., 2016; Семенов, Соколов, 2016; Семенов, Семенова, 2018).

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Здоровая почва рассматривается как экологическая категория. Здоровье почвы достаточно полно и емко характеризуется состоянием ее биотического комплекса. Именно биотическая, микроробастительная составляющая наземно-почвенной экосистемы ответственна за образование почвенного органического вещества, за биогеохимический круговорот биофильных элементов, а также за другие характеристики и функции природной почвы.

Здоровая почва агроценоза должна быть безвредной для человека и другой биоты, защищать от негативных воздействий сопряженные экосреды — элементы агроландшафта (водную, воздушную), агроценозы и урожай. Только здоровая почва агро- и социосфер способна адекватно выполнять продукционные, экоресурсные, средообразующие функции, противодействовать деградации. ЗП агроценоза напрямую зависит от качества управления ею.

С социально-экологических позиций состояние здоровья почвы позволяет оценивать и определять степень ее полезности социуму и качеству его жизни. Применительно к агрофере ЗП с ее составляющими и дополняющими плодородием и качеством становится интегрирующим показателем. Однако практически повсеместно начиная с XIX в. и до сих пор продолжают попытки управлять только плодородием почвы, игнорируя ее здоровье. Это привело к неустойчивому, а местами даже к деградированному состоянию почв, к уменьшению их биопродуктивности и биоразнообразия, а также в целом к ухудшению состояния экосферы. Пришло время всерьез заняться оценкой состояния здоровья наших почв, а в ряде ситуаций и их оздоровлением.

Полагаем, что предложенные определения и показатели состояния здоровья почвы будут востребованы, в том числе и при реализации мероприятий по оздоровлению деградированных почв, рекомендуемых ФАО (снижение нагрузки на почвы агроэкосистем): большей доступности земельных и водных ресурсов земледельцам; повышению устойчивости агропроизводства посредством целевых инвестиций, рациональной торговой и экономической политики (мероприяти-

ям по смягчению последствий изменения климата, по адаптации к ним, а также к другим негативным воздействиям на окружающую среду) [[http://www.fao.org/geonetwork/ФАО\\_сводный\\_доклад/состояние\\_мировых\\_земельных\\_и\\_водных\\_ресурсов](http://www.fao.org/geonetwork/ФАО_сводный_доклад/состояние_мировых_земельных_и_водных_ресурсов)].

Итак, понятие “здоровая почва” – это междисциплинарная характеристика, возникшая из знаний и опыта множества естественно-научных и социальных дисциплин (биологических, медицинских, геохимических, аграрных, социологических и иных). Введение понятия “здоровье почвы” – попытка интегрирования количественных оценок таких характеристик почвенной экосистемы, как гетеротрофная и супрессирующая активности, способность мобилизации биофильных элементов и соответствие действующим лимитам на допустимое содержание вредностных агентов.

Несомненно, генерализованную концепцию здоровья почвы необходимо постоянно совершенствовать. Полагаем, что активными участниками ее развития будут микробиологи, экологи, почвоведы, агрономы, социологи и другие ученые и практики, заинтересованные в рациональном (эффективном и безопасном) природопользовании, в устойчивом развитии агро- и социосферы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Банкина Т.А., Петров М.Ю., Петрова Т.М., Банкин М.П. Хроматография в агроэкологии. СПб.: НИИхимии СПбГУ, 2002. 580 с.
- Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест. Методические указания. МУ 2.1.7.730-99. М.: Минздрав России, 1999. 38 с.
- Глинушкин А.П., Соколов М.С., Торопова Е.Ю. Фитосанитарные и гигиенические требования к здоровой почве. М.: Агрорус, 2016. 288 с.
- ГОСТ 27593-88. Почвы. Термины и определения. URL: <http://docx.cntd.ru/document/gost.-27593-88> (обращение, март 2017).
- ГОСТ ИСО 22030-2009. Качество почвы. URL [http://www.complexdoc.ru/pdf/2022030-2009/gost\\_r\\_iso\\_22030-2009/](http://www.complexdoc.ru/pdf/2022030-2009/gost_r_iso_22030-2009/) (обращение, март 2017).
- ГОСТ ИСО 14238-2014. Качество почвы. Биологические методы. М.: Стандартинформ, 2015. 12 с. URL <http://gostpdf.ru/cont/files/14238-2014/gost-14238-2014.1705.pdf> (обращение, март 2017).
- Добровольский Г.В. Тихий кризис планеты // Вестн. РАН. 1997. Т. 67. № 4. С. 313–319.
- Добровольский Г.В. Педосфера – оболочка жизни планеты Земля // Биосфера. 2009. Т. 1. № 1. С. 6–14.
- Добровольский Г.В. Место и роль почвы в биосфере и жизни людей // Биосфера – почва – человечество: устойчивость и развитие. М.: Ин-т фундамент. проблем биологии РАН, 2011. С. 5–14.
- Добровольский Г.В., Никитин Е.Д. Экология почв. Учение об экологических функциях почв. М.: Изд-во МГУ, 2006. 364 с.
- Заварзин Г.А., Кудяров В.Н. Дыхание почвы. М.: ОНТИ ПНЦ РАН, 1993. 145 с.
- Кожеев П.А. Биотический компонент качества почвы и проблема устойчивости // Вестн. МГУ. Сер. 17. Почвоведение. 2001. № 4. С. 45–47.
- Кузнецов А.Е., Градова Н.Б. Научные основы эколобиотехнологии. М.: Мир, 2006. 504 с.
- Кудяров В.Н., Заварзин Г.А., Благодатский С.А., Борисов А.В., Воронин П.Ю., Демкин В.А., Демкина Т.С., Евдокимов И.В., Замолотчиков Д.Г., Карелин Д.В., Комаров А.С. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
- Макаров О.А., Каманина И.З. Экономическая оценка и сертификация почв и земель. М.: МАКС Пресс, 2008. 240 с.
- Санитарно-эпидемиологические требования к качеству почвы. СанПиН 2.1.7.1287-03. М.: Федеральный центр Госсанэпиднадзора Минздрава России, 2005. 14 с.
- Семенов А.М. Осцилляции микробных сообществ в почвах // К 100-летию со дня рожд. акад. Е.Н. Мишустина: Тр. Всерос. конф. 22 февраля 2001 г. М.: МАКС Пресс, 2001. С. 57–72.
- Семенов А.М. Растительно-микробные взаимодействия // Экология микроорганизмов. М.: Юрайт, 2004. С. 145–164.
- Семенов А.М. Фундаментальные законы экологии в разработке способов определения здоровья почвы // Матер. Всерос. науч. конф. “Биосфера – почвы – человечество: устойчивость и развитие”, посвященной 80-летию проф. А.Н. Тюрюканова. МГУ, 14–16 марта 2011 г. Фонд “Инфосфера”–НИА–Природа, 2011. С. 371–381.
- Семенов А.М. Здоровье почвы: характеристика содержания и методы количественного определения // Материалы VIII Московского Международного конгресса “Биотехнология: состояние и перспективы развития”. Ч. 2. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. С. 205.
- Семенов А.М., Бубнов И.А. Определение параметра здоровья почвы при использовании различных нарушающих воздействий // Проблемы агрохимии и экологии. 2013. № 3. С. 39–46.
- Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К. К методу определения параметра здоровья почвы // Агро XXI. 2011. № 1–3. С. 8–10.
- Семенов А.М., Глинушкин А.П. Научно-методическое руководство для практического определения параметров здоровья почвенной экосистемы (почвы) // Монография. Адаптивно-интегрированная защита растений М.: Печатный город, 2019. С. 525–554.
- Семенов А.М., Семенова Е.В. Способ определения параметра здоровья в образцах почвы, компостов и других твердых субстратов // Современные проблемы гербологии и оздоровления почв: Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию со дня рождения Д.И. Чканикова (21–23 июня 2016). М.: Агрорус, 2016. С. 291–298.
- Семенов А.М., Семенова Е.В. Почва как биологическая система и ее новая категория – здоровье // Успехи соврем. биологии. 2018. Т. 138. № 2. С. 115–125.

- Семенов А.М., Соколов М.С. Концепция здоровья почв: фундаментально-прикладные аспекты обоснования критериев оценки // *Агрохимия*. 2016. № 1. С. 3–16.
- 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.
- Семенов А.М., Глинушкин А.П., Соколов М.С. Здоровье почвенной экосистемы: от фундаментальной постановки к практическим решениям // *Изв. ТСХА*. 2019. № 1. С. 5–18.
- Семенов А.М., Семенов В.М., Ван Бругген А.Х.К. Диагностика здоровья и качества почвы // *Агрохимия*. 2011а. № 12. С. 4–20.
- Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К., Бубнов И.А., Семенова Е.В. Система для количественного определения эмиссии газов из образцов почвы, компостов и других твердых субстратов // Пат. 90212. РФ. 2009.
- Семенов А.М., Ван Бругген А.Х.К., Бубнов И.А., Семенова Е.В. Способ определения параметра здоровья у образцов почвы, компостов и других твердых субстратов // Пат. 2408885. РФ. 2011б.
- Семенов А.М., Бубнов И.А., Семенов В.М., Семенова Е.В., Зеленов В.В., Семенова Н.А. Ежедневная динамика численности бактерий и эмиссии CO<sub>2</sub> почвы и связь их волнообразных колебаний с сукцессией микробного сообщества // *Почвоведение*. 2013. № 8. С. 963–979.
- Семенов В.М., Семенов М.В. Биологические индикаторы здоровья почвы // *Современные проблемы герпетологии и оздоровления почв*. Матер. Междунар. науч.-практ. конф., посвященной 85-летию со дня рождения Д.И. Чканикова (21–23 июня 2016). М.: Агрорус, 2016. С. 298–304.
- Снакин В.В. Экология и природопользование в России. Энциклопедический словарь. М.: Academia, 2008. 816 с.
- Снакин В.В. Живое вещество биосферы: эволюционный аспект // *Использование и охрана природных ресурсов в России*. 2013. № 1. С. 3–6.
- Соколов М.С. Актуальные задачи оздоровления почв России // *Почвы в биосфере и жизни человека*. Монография. М.: Изд-во МГУЛ, 2012. С. 356–384.
- Соколов М.С., Марченко А.И. Здоровая почва как основа благополучия России (концептуально-аналитические аспекты) // *Агрохимия*. 2011. № 6. С. 3–10.
- Соколов М.С., Глинушкин А.П., Спиридонов Ю.Я. Перспективы исследований по улучшению качества и оздоровлению почв России // *Достижения науки и техники АПК*. 2016. Т. 30. № 8. С. 5–8.
- Соколов М.С., Глинушкин А.П., Торопова Е.Ю. Средообразующие функции здоровой почвы – фитосанитарные и социальные аспекты // *Агрохимия*. 2015. № 8. С. 81–94.
- Соколов М.С., Дородных Ю.Л., Марченко А.И. Здоровая почва как национальное достояние // *Почвоведение*. 2010. № 7. С. 858–866.
- Соколов М.С., Марченко А.И., Марченко С.А. Оздоровление почв – практический вклад России в реализацию концепции устойчивого развития // *Прикл. токсикология*. 2011. № 4. С. 36–59.
- Торопова Е.Ю., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Индукция супрессивности почв – важнейший фактор лимитирования вредоносности корневых инфекций // *Агрохимия*. 2016. № 8. С. 46–57.
- Торопова Е.Ю., Селюк М.П., Казакова О.А., Соколов М.С., Глинушкин А.П. Факторы индукции супрессивности почв агроценозов // *Агрохимия*. 2017. № 4. С. 58–71.
- ФАО. 2011. ФАОСТАТ (Статистическая база данных) (RUL: <http://faostat.fao.org/>).
- Фомин Г.С., Фомин А.Г. Почва. Контроль качества и экологической безопасности по международным стандартам. Справочник. М.: Протектор, 2001. 304 с.
- Черников В.А., Алексахин Р.М., Голубев А.В., Грингоф И.Г., Ивонин В.М., Кормилицын В.Ф., Ладонин В.Ф., Литвак Ш.И., Милащенко Н.З., Мосиенко Н.А., Мосина Л.В., Муракаева С.А., Паракин В.В., Попов Г.Н., Постников Д.А., Раскатов В.А., Соколов О.А., Томилин В.Ф., Чекирес А.И. Агроэкология. М.: Колос, 2000. 536 с.
- Anon. Soil health / From Wikipedia, the free encyclopedia.
- Arias M.E., Gonzalez-Perez J.A., Gonzalez-Vila F.J., Ball A.S. Soil health – a new challenge for microbiologists and chemists // *Inter. Microbiol.* 2005. V. 8. № 1. P. 13–21.
- Burns R.G., Nannipieri P., Benedetti A., Hopkins D.W. Defining soil quality // *Microbiological methods for assessing soil quality* / Eds Bloem J., Hopkins D.W., Benedetti A. CAB Publ. UK. 2006. P. 15–22.
- Doran J.W., Zeiss M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality // *Appl. Soil Ecol.* 2000. V. 15. № 1. P. 3–11.
- Doran J.W., Sarrantonio M., Liebig M.A. Soil health and sustainability // *Adv. Agron.* 1996. V. 56. P. 1–54.
- FAO. 2008 (URL: <http://www.fao.org/3/a-i0100e.html>).
- Fernandez M., Zentner R., De Pauw R., Gehl D., Stevenson F. Impacts of Crop production factors on common root rot of barley in Eastern Saskatchewan // *Crop Sci.* 2007. № 4. P. 47.
- Janier C., Villeneuve F., Alabouvette C., Edel-Hermann V., Mateille T., Steinberg C. Soil health through disease suppression: Which strategy from description to indicators? // *Soil Biol. Biochem.* 2007. V. 39. P. 1–23.
- Karlen D.L., Mausbach M.J., Doran J.W., Cline R.G., Harris R.F., Schuman G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation // *Soil Sci. Soc. Am. J.* 1997. V. 61. № 1. P. 4–10.
- Kick C. New soil test measures soil health. <http://www.farmanddairy.com/news/> (обращение февр. 2015).
- Kinyangi, J. 2007. Soil health and soil quality: A review, 1-16. Ithaca, USA, Cornell University. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/277296620\\_SOIL\\_HEALTH\\_AND\\_SOIL\\_QUALITY\\_A\\_REVIEW](https://www.researchgate.net/publication/277296620_SOIL_HEALTH_AND_SOIL_QUALITY_A_REVIEW)
- Semenov A.M., Van Bruggen A.H.C., Zelenev V.V. Moving waves of bacterial populations and total organic carbon along roots of wheat // *Microb. Ecol.* 1999. V. 37. № 2. P. 116–128.
- Stone A.G., Scheuerell S.J., Darby H.M. Suppression of soil-borne diseases in field agricultural systems: Organic matter management, cover cropping, and other cultural practices // *Soil organic matter in sustainable agricul-*

- ture / Eds Magdoff F., Weil R.R. Boca Raton: CRC Press, 2004. P. 131–178.
- Van Bruggen A.H.C., Semenov A.M.* In search of Biological Indicators for Soil Health and Disease suppression // *Appl. Soil Ecol.* 2000. V. 15. P. 13–24.
- Van Bruggen A.H.C., Semenov A.M.* Soil health and soil borne diseases in organic agriculture // *Plant diseases and their management in organic agriculture* / Eds Finckh M.R., Van Bruggen A.H.C., Tamm L. St. Paul, Minnesota, USA: APS PRESS, 2015. 424 p.

## Healthy Soil – Condition of Stability and Development of the Argo- and Sociospheres (Problem and Analytical Review)

**M. S. Sokolov<sup>2</sup>, A. M. Semenov<sup>1, 2, #</sup>, Yu. Ya. Spiridonov<sup>2</sup>, E. Yu. Toropova<sup>3</sup>, and A. P. Glinushkin<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Biological Faculty, Leninskie Gory 1/12, Moscow, 119234 Russia*

<sup>2</sup>*All-Russian Research Institute of Phytopathology, ul. Institutskaya 5, pos. Bolshie Vyazemy, Odintsovskiy r-n, Moscow Region, 143050 Russia*

<sup>3</sup>*Novosibirsk State Agrarian University, ul. Dobrolyubova 160, Novosibirsk, 630039 Russia*

<sup>#</sup>*e-mail: amsemenov@list.ru*

The problem of degradation of world and Russian soil resources is mentioned. Characteristics of healthy the soil ecosystem is considered and proved. It is characterized requirements to a state of health of soils for agro- and sociosphere. The indicators of soil health including scientific and actual criteria and parameters are suggested and discussed. The indicators of soil quality and their integrating characteristic of soil health, proposed to guide land users, ecologists, the soils science and experts for valuation the soils are discussed.