

АГРОХИМИЯ И ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ

УДК 631.417.2

ПОЧВЕННО-БИОГЕОХИМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОСТОЯНИЯ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

© 2019 г. В. Н. Кудеяров*

*Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН,
Россия, 142290, Пущино, Московская обл., ул. Институтская ул., 2*

**e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

Поступила в редакцию 11.07.2018 г.

После доработки 11.07.2018 г.

Принята к публикации 29.08.2018 г.

Рассмотрен почвенно-биогеохимический аспект современного состояния земледелия Российской Федерации. Перестройка производственных отношений в сельскохозяйственном секторе России привела к структурным изменениям аграрного землепользования. Выведенные из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров пахотных угодий перешли в разряд залежных земель, подвергшихся зарастанию луговой и древесной растительностью. Это в свою очередь изменило характер формирования биологической продуктивности и ее состав на сельскохозяйственных угодьях в целом. Сокращение пахотных угодий и перевод их в залежное состояние существенно нарушило баланс углерода. Земледелие в целом из чистого источника С-СО₂ в начале 90-х годов превратилось в чистый накопитель (секвестор) С-СО₂ в размере около 20 млн т С-СО₂/год. Этот факт можно рассматривать как вклад земледелия России в выполнение глобальной задачи международной программы “4 промилле” по накоплению углерода в почвах, используемых в сельском хозяйстве. Изменения структуры земельных угодий с одновременным резким сокращением применения всех видов удобрений вызвали превалирование биогеохимических потоков питательных элементов (N, P, K) из пахотных почв на урбанизированные территории. Дефицитный баланс питательных веществ означает, что в сельскохозяйственном производстве в значительной степени не реализуется почвенно-климатический потенциал и потенциал других факторов повышения продуктивности земледелия, таких как сорт, химические средства защиты растений и другие. Наибольшую тревогу вызывает остродефицитный баланс фосфора. В этой связи необходимо значительно ограничить экспорт апатитового концентрата и фосфорсодержащих удобрений как стратегического (невозобновляемого!) ресурса, необходимого для обеспечения продовольственной безопасности страны на десятилетия вперед.

Ключевые слова: биогеохимические потоки, стоки и источники углекислого газа, баланс, углерод, азот, фосфор, калий, истощение почв

DOI: 10.1134/S0032180X1901009X

ВВЕДЕНИЕ

Биогеохимические круговороты (циклы) элементов – это обмен веществ между живыми и неживыми компонентами биосферы. Почва как один из главных компонентов биосферы, по словам акад. Вернадского [2], представляет собой область наивысшей геохимической энергии живого вещества, это важнейшая по своим геохимическим последствиям лаборатория физических, химических и биохимических процессов. В биогеохимических циклах элементов исключительная роль принадлежит фотосинтезу, благодаря которому солнечная энергия аккумулируется в виде химической в органических соединениях углерода и служит движущей силой всех биогеохимических процессов. В круговорот включаются десят-

ки химических элементов, среди которых кроме жизненно необходимых (биофильных элементов), имеются и пассивно вовлекаемые элементы, не используемые в жизненном цикле.

В результате деятельности человека движение многих веществ ускоряется настолько, что круговороты становятся несовершенными, и в значительной степени разомкнутыми. Наибольшая разомкнутость характерна для циклов таких макроэлементов, как углерод, азот, фосфор и калий – элементов, в больших количествах использующихся при выращивании сельскохозяйственных культур. Потоки питательных элементов при современном характере сельскохозяйственного производства носят преимущественно однонаправленное движение, то есть поступающие из почвы в

Таблица 1. Удельная площадь пашни в мире (га/чел.)*

Показатель	1990 г.	1995 г.	2000 г.	2005 г.	2010 г.	2015 г.	Прогноз		
							2030 г.	2050 г.	2100 г.
Пашня, млн га	1408	1404	1399	1405	1388	1425	1425?	1425?	1425?
Население млн чел.	5330	5751	6145	6542	6958	7383	8500	9725	11213
Удельная площадь, га/чел.	0.26	0.24	0.22	0.21	0.20	0.19	0.17	0.15	0.12

* Расчеты сделаны на базе данных ФАО [30, 46].

растения питательные элементы отчуждаются с урожаями и перемещаются на урбанизированные территории, из которых они уже никогда не возвращаются в почвы. Рециклированию в почвах подвергается лишь малая часть питательных элементов, оставшаяся на поверхности в виде пожнивных и побочных продуктов растениеводческой продукции, корней и органических удобрений (навоза, сидератов).

Высокопродуктивное сельскохозяйственное производство не может функционировать только на использовании почвенного плодородия. Запасы в почвах питательных элементов ограничены, и без пополнения их в виде удобрений быстрее или медленнее, в зависимости от уровня естественного плодородия, истощаются. А с учетом ограниченности земельных ресурсов, пригодных для сельскохозяйственного использования, актуальность повышения плодородия почв все более усиливается.

В результате нерациональной хозяйственной деятельности человека (антропогенной деградации земель) и климатических изменений обеспеченность человечества пригодными для земледелия почвенными ресурсами быстро уменьшается. Из имеющихся пахотных угодий в мире 33% площадей подвергнуты деградации в сильной и средней степени. Ежегодно в глобальном масштабе в результате эрозии теряется 75 млрд т почв. Продукция, которую можно было бы получить на этой почвенной массе, оценивается в 400 млрд долларов США [29].

В то же время растущее население Земли требует все большего количества продовольствия. Ежегодный прирост населения за 2010–2015 гг. составил 84 млн человек, а к 2030 г. прогнозируется в среднем прирост 77 млн человек в год. По оценкам ООН, в конце первой половины текущего столетия население в мире увеличится на треть, достигнув 9.7, а к 2100 г. составит 11.2 млрд человек [46]. Это означает, что при почти не увеличивающейся общей площади пахотных угодий удельная площадь пашни на одного человека в мире постоянно сокращается (табл. 1). Несмотря на ограниченность земельных ресурсов, мировое земледелие должно ежегодно значительно нара-

щивать производство продуктов питания. Растениеводческая продукция все в большей степени будет использоваться для производства биоэнергии и в других промышленных целях.

Среди основных приемов подъема урожайности сельскохозяйственных культур (выведения новых сортов, создания химических средств защиты растений, мелиорации и других), главным является применение удобрений.

Данные мировой статистики свидетельствуют, что за последние 40 лет на долю минеральных удобрений приходилось 40% прироста производства продовольствия в мире [41]. Минеральные удобрения стали мощным средством не только повышения продуктивности сельского хозяйства, но и весьма ощутимым фактором, воздействующим на глобальные биогеохимические циклы биофильных элементов. Последствия нарушений естественных циклов этих элементов наиболее ярко проявляются в виде увеличения миграционной активности растворимых соединений азота, эвтрофикации природных вод, эмиссии закиси азота – третьего после CO₂ по значению парникового газа.

По данным ФАО потребление минеральных удобрений (N + P₂O₅ + K₂O) в 2014 г. достигло 187 млн т и прогнозируемый рост потребления на 2018 г. составит 1.8%/год. Среди основных удобрений потребность в азотных удобрениях занимает главное место, составляя в 2014 г. 113.1 млн т с ростом до 119.4 млн т в 2018 г. [49]. При этом в земледелие вовлекается все больше биологически связанного азота (в основном симбиотического). Во всех сельскохозяйственных угодьях земного шара за счет биологической азотфиксации в почвы поступает около 44 млн т азота ежегодно [49]. Такая потребность в азоте объясняется тем, что практически на всех почвах одним из главных факторов, определяющих продуктивность основных сельскохозяйственных культур, является азот.

Применение азотных удобрений крайне неравномерно по отдельным странам мира. Широкое варьирование потребления удобрений отмечается также и внутри отдельных регионов. Например, средние количества применяемых азотных удобрений для Западной Европы в настоящее время составляют около 120 кг/га с колебаниями от 40 кг

(в Португалии) до свыше 200 кг/га (в Нидерландах) [30].

Сегодня на Азию и Европу приходится самые высокие в мире нормы применения минеральных удобрений на гектар сельскохозяйственных угодий. В силу различных причин, внесенные в почву питательные вещества с удобрениями не могут быть полностью использованы растениями и, как следствие, остатки удобрений загрязняют окружающую среду. Например, в настоящее время в Китае коэффициент использования азота удобрений для риса, пшеницы и кукурузы составляет всего 26–28%, а для овощных культур – менее 20% [35]. Потери азота в окружающую среду достигают более 50% в виде растворимых соединений (NO_3^-) и газообразных форм (преимущественно N_2 , N_2O).

Избыточное использование удобрений в странах Евросоюза привело к такому накоплению азота в почве, что, по имеющимся оценкам, оно угрожает устойчивости 70% природных объектов [30].

В бывшем СССР в районах возделывания овощных и технических культур также вносились высокие и сверхвысокие дозы минеральных удобрений при низкой культуре их использования. Часто применение неоправданно высоких доз удобрений, особенно азотных, приводило к загрязнению природных вод, прежде всего нитратами [7]. Этот негативный опыт не должен повторяться в стране при новой форме производственных отношений.

Кроме удобрений, в приходной части глобального азотного баланса определенную часть составляют поступления в атмосферу связанного азота (NH_3 , NO_x) при сжигании ископаемого топлива. Эти соединения легко выводятся из атмосферы с осадками и поступают в почвы. Атмосферные выпадения соединений азота вызывают определенный удобрительный эффект для лесов Европейских стран, особенно Скандинавии.

При всех негативных последствиях интенсивной химизации сельского хозяйства, альтернативы применению минеральных удобрений не имеется. Причина в том, что высокопродуктивное товарное сельскохозяйственное производство представляет собой открытую биогеохимическую систему. На выходе из этой системы стоит масштабная товарная продукция, с которой отчуждаются большие объемы биогенных элементов. В большинстве европейских стран средний уровень урожая, например зерновых, достигает 8–10 т зерна/га [29]. Для обеспечения такого урожая, кроме высокопродуктивных сортов, химических препаратов защиты растений от вредителей и болезней, требуется обеспечение растений необходимым количеством почвенного питания. Так, для формиро-

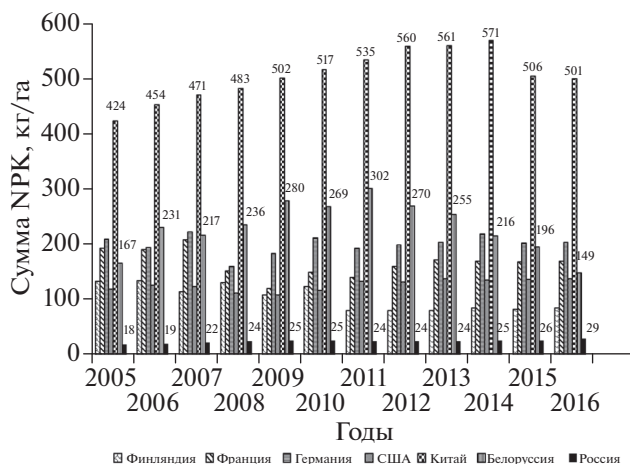


Рис. 1. Дозы применяемых удобрений на гектар пашни России и некоторых стран (ФАО, 2018).

вания урожая зерна в 10 т/га с соответствующей побочной продукцией, необходимо предоставить растениям (с учетом коэффициентов использования питательных веществ) ~400 кг азота, ~130 кг фосфора и ~250 кг калия. Ни одна почва за счет естественного плодородия не сможет обеспечить таким количеством питательных элементов планируемый урожай, тем более, систематически – из года в год. Поэтому для компенсации отчуждения с урожаями питательных элементов из почв и для последующего планируемого высокого урожая необходимо постоянное интенсивное удобрение почвы. На рис. 1 приведены данные применения минеральных удобрений в среднем на гектар посевов некоторых стран в сравнении с Россией.

Целью настоящей статьи является оценка состояния главных биогеохимических потоков основных биогенных элементов (С, N, P и K) в современном земледелии России.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

При расчетах потоков и балансов питательных элементов были взяты статистические данные за период 1992–2016 гг. по распределению земельной площади РФ по категориям, посевным площадям сельскохозяйственных культур, валовым сборам продуктов растениеводства, урожайности сельскохозяйственных культур. Были использованы данные по производству и применению минеральных и органических удобрений [13, 14, 17–19, 29]. Справочные материалы по соотношению основной и побочной продукции сельскохозяйственных культур, пожнивным наземным остаткам и корневым системам взяты из Рекомендаций Почвенного института им. В.В. Докучаева для исследования баланса ... (1984, цит. по [20]).

Все данные по сельскохозяйственной продукции переводились на сухую биомассу и для определения величины углерода первичной продукции фотосинтеза (NPP) умножались на единый коэффициент 0.45. Расчеты выносов питательных элементов из почвы с урожаями сельскохозяйственных культур выполнялись с использованием соответствующих коэффициентов, приведенных в монографии Петербургского [15].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Потоки углерода. Имеются принципиальные различия факторов, определяющих доступность растениям, с одной стороны, углерода, с другой — азота, фосфора, калия и других питательных элементов. Углеродное питание растений происходит из атмосферы путем усвоения листьями (через хлорофилл) углекислоты, *запасы которой не лимитированы*, а даже наоборот пополняются все новыми поступлениями CO_2 в атмосферу за счет хозяйственной деятельности человека. В противоположность углероду, азот и другие питательные элементы поступают в растения преимущественно через корни. Наличие питательных элементов в почвах в доступных для растений формах *всегда ограничены и часто лимитируют* биологическую продуктивность растений.

С позиций оценки состояния круговорота углерода *принципиальное значение имеет соотношение стоков и эмиссии CO_2* , поскольку именно соотношение этих двух главных биогеохимических потоков углерода определяет изменение атмосферной концентрации CO_2 , которая неуклонно возрастает и усиливает парниковый эффект, приводящий к изменению глобального климата. Международное сообщество стремится ограничить темпы роста эмиссии парниковых газов, чтобы не допустить потепления климата к концу XXI века не более чем на 2°C (Парижское соглашение). Сельскохозяйственное производство, как и промышленность, вносит свой вклад в повышение концентрации парниковых газов в атмосфере. Вид землепользования и его изменение может как увеличивать эмиссию CO_2 в атмосферу, так и дополнительно абсорбировать из нее углерод (процесс секвестирования) и переводить его в почвенный гумус и в лесную древесину с длительными временами пребывания углерода в названных пулах.

Особенностью сельскохозяйственного производства является тот факт, что вся произведенная в нем продукция является чистой первичной продукцией фотосинтеза (NPP), которая быстро утилизируется и становится источником CO_2 . В категорию экосистемной продукции (NEP) переходит незначительная часть органического углерода,

остающегося после микробного разложения NPP. Собранный урожай сельскохозяйственных культур перерабатывается, используется как продовольствие, животные корма или сырье для промышленности. А отходы производства (за исключением навоза) практически уже не возвращаются на поля и в почвы. В агроэкосистемах, остающаяся NEP в виде корней и пожнивных остатков очень мала и не может компенсировать расхода углерода органического вещества почвы на минерализацию. В результате сельскохозяйственное производство при традиционной системе земледелия (ТС) почти всегда является чистым источником CO_2 .

В мировом сельскохозяйственном производстве в настоящее время набирает силу подход сбережения и накопления органического углерода в почвах. В связи с принятием Парижского соглашения по климату, министерство сельского хозяйства Франции предложило развернуть Международную программу “4 промилле”, в соответствие с которой страны, подписавшие Соглашение, берут на себя обязательства по увеличению на 4‰ органического углерода в год в почвах сельскохозяйственных угодий. Четыре промилле соответствуют отношению годового выброса C-CO_2 за счет сжигания ископаемого топлива в мире к запасам органического углерода в двухметровом горизонте почв мировых экосистем [36]. По мнению инициаторов, это мероприятие позволит удержать потепление на Земле в пределах $2-3^\circ\text{C}$ к концу века.

Одним из приемов, который может отвечать требованиям сбережения и даже накопления углерода в почвах сельскохозяйственного использования является широко известный прием минимальной обработки почвы. Этот прием пропагандировался еще в советское время для районов засушливого земледелия. В англоязычной литературе минимальная обработка почвы получила название “no till” (NT). Прием NT сейчас пропагандируется для использования не только в засушливых районах, но и в зонах с нормальным увлажнением. Изменение системы земледелия с традиционной (пашенной) — ТС на систему минимальной обработки почвы — NT рассматривается не только как прием пополнения почвы органическим веществом, но и как способ сокращения выбросов парниковых газов в земледелии [28].

Однако, как показывает опыт, NT эффективен не для всех почвенно-климатических условий. Так, тип почвы, чередование выращиваемых культур и климатические условия — наиболее важные факторы, которые сильно влияют на накопление органического вещества в почвах. В экспериментах с бессменным ячменем на оглеенных почвах (глинистой, суглинистой, пылеватого

суглинка) после перехода с ТС на минимальную систему обработки было показано, что NT привело к уменьшению накопления органического углерода в почве. В другом эксперименте и в другой зоне на других почвах (песчаном суглинке, суглинистой серой почве и черноземе) показано положительное влияние NT по сравнению с ТС на накопление $C_{орг}$ в почвах [47]. Причина различных результатов авторы объясняют следующим. Огленные почвы в комбинации со среднегодовой нормой осадков 891 мм и среднегодовой температурой около 1°C вообще не благоприятствовали какому-либо виду сельскохозяйственной деятельности. В условиях меньшего количества осадков и более высокой среднегодовой температуры (серые и черноземные почвы) NT оказал положительное влияние на накопление $C_{орг}$ в почвах.

Различные чередования культур (севообороты) имеют разные потенциалы для углеродонакопления. Углерод накапливается в почвах тогда, когда складывается положительный азотно-углеродный баланс в севообороте, то есть наряду с приходом азота (биологического или азота удобрений) в соответствующих количествах поступает и органический углерод. При этом поступление азота должно превышать его отчуждение с урожаем [6, 27, 43].

Как правило, лимитирующим фактором накопления углерода в почве является ограниченное количество поступающих в почву растительных остатков. Например, когда при уборке урожая вывозится не только товарная часть продукции, но и побочная, а в почве остаются только корни.

Другой пример, когда все остающиеся наземные растительные остатки, включая солому, быстро заделываются в почву. В этом случае происходит интенсивная минерализация органических остатков, поскольку, во-первых, обеспечивается прямой контакт почвенных разлагающих организмов с поступившими в почву растительными остатками, во-вторых, наиболее благоприятные влажностные условия для деятельности разлагателей, доступность азота, температура и в-третьих, благоприятные окислительные условия для почвенных микроорганизмов [34].

Еще один важный фактор, оказывающий влияние на усиление минерализации органического углерода почвы — когда поступающие в почву свежие растительные остатки вызывают так называемый затравочный эффект, который способствует более интенсивному разложению собственно почвенного органического вещества [4, 6, 33]. Но если растительные остатки остаются на поверхности почвы, они не влияют на минерализацию почвенного органического вещества и никакого затравочного эффекта не наблюдается [43].

В почвах, которые много лет не распахиваются, минерализация почвенного органического вещества в верхних приповерхностных горизонтах уменьшается, при этом увеличивается накопление органического вещества [44]. Наблюдается строгая связь между поверхностным накоплением почвенного органического материала, соответствующей вертикальной стратификацией углерода и устойчивостью почвы к эрозии [37].

Большая часть сельскохозяйственных почв обедняются органическим веществом благодаря регулярной машинной обработке, что ведет к ухудшению их углеродного баланса по сравнению с естественными почвами. Это связано с тем, что постоянная вспашка и культивация приводят к более интенсивному поступлению в почвы кислорода и усилению минерализации органического вещества. В то же время традиционное ведение земледелия предусматривает полное или частичное удаление с полей поуборочных остатков. Нередко пожнивные остатки подвергаются и огневому палу. Это, в свою очередь, сильно ограничивает поступление в почву свежего органического вещества и не компенсирует потери из почв углерода в виде CO_2 . Все вместе взятое ведет к углеродной деградации почв, сопровождающейся большей подверженностью эрозии, меньшей водоудерживающей способностью, потерей структуры, уменьшением пористости, а также сокращением разнообразия почвенной биоты.

В нашей стране пока преобладает традиционная система земледелия. Рассмотрим почвенно-биогеохимический аспект земледелия РФ после перестройки производственных отношений в сельском хозяйстве страны. После реформирования произошли радикальные изменения в составе сельскохозяйственного землепользования. Большие площади пашни были выведены из оборота и подверглись зарастанию луговой и лесной растительностью.

Перестройка производственных отношений в сельскохозяйственном секторе России привела к серьезным структурным изменениям аграрного землепользования (рис. 2). Выведенные из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров пахотных угодий перешли в разряд залежных земель, подвергшихся зарастанию луговой и древесной растительностью. Это изменило характер формирования биологической продуктивности и ее состав на сельскохозяйственных угодьях в целом.

Наиболее резкие сокращения посевных площадей происходили в период с 1992 до начала 2000-х гг. В последующие 15 лет посевные площади сельскохозяйственных культур стабилизировались на уровне 78–80 млн га [19].

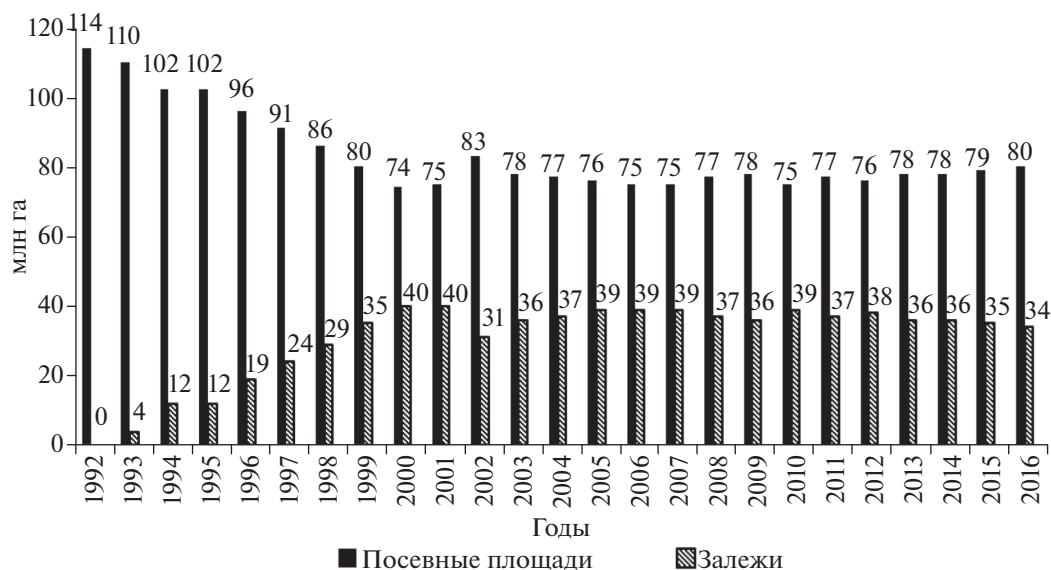


Рис. 2. Изменение посевных площадей в РФ за период 1992–2016 гг.

Как показывают статистические данные, получение сельскохозяйственной продукции в России в настоящее время осуществляется в основном за счет естественного плодородия почв, а точнее, за счет минерализации органического вещества почв, запасавшегося в течение предшествующих тысячелетий. При этом почвы обедняются не только доступными формами элементов питания, но и страдают от дегумификации. Потеря гумуса сказывается на устойчивости почв к эрозионным процессам, различным видам загрязнений, на распространении патогенной микрофлоры и ведет к уменьшению биологического разнообразия. Дегумификация – один из главных факторов ухудшения “здоровья почв” [22, 23, 29]. Кроме того, сам процесс потери гумуса (минерализация) – существенный вклад в эмиссионную составляющую глобального цикла углерода. Здо-

ровые почвы содержат многообразное сообщество почвенных организмов, которые помогают бороться с болезнями растений, насекомыми-вредителями и сорняками. К этому определению можно добавить экосистемный аспект – здоровая почва не загрязняет окружающую среду [23].

Динамика и состав чистой первичной продукции фотосинтеза (NPP) на посевной площади РФ за 25-летний период показана на рис. 3. Общая NPP включает в себя сумму углерода основной и побочной продукции, наземных растительных остатков и корневых систем. На динамику NPP оказывали влияние разные факторы: сокращение посевных площадей, уменьшение применения удобрений, колебания погодных условий. Важным фактором, определяющим уровень NPP, были условия увлажнения. В качестве примера может служить 2010 г. как экстремально засушливый и, естественно, это отразилось на сильном снижении урожайности всех сельскохозяйственных культур, в особенности, зерновых. В 2010 г. валовой сбор зерна был рекордно низким за последние более чем 60 лет и составил 61 млн т [17, 19]. Период после 2010 г. до настоящего времени характеризуется небольшим наращиванием уровня NPP при сохраняющемся низком уровне применения удобрений (рис. 1). Валовые сборы зерна за 5 лет (2012–2016 гг.) выросли с 70.9 до 120.7 млн т. [19]. Этот рост, прежде всего, можно объяснить довольно благоприятными погодными условиями на всей европейской части РФ. По данным Института глобального климата и экологии Госкомгидромета и РАН по сравнению с периодом 1961–1990 гг. наблюдается тренд увеличения количества осадков в весенний период времени –

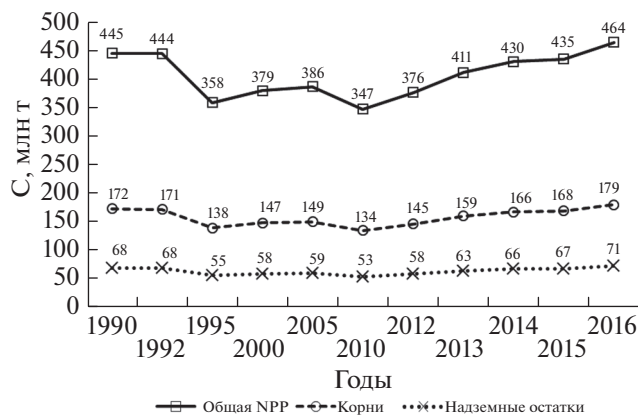


Рис. 3. Динамика первичной продукции фотосинтеза (NPP) и ее состав за 1990–2016 гг.

наиболее важный для развития зерновых культур [3].

Из общей NPP на долю экосистемной продукции (NEP) можно отнести наземные растительные остатки и корневые системы. Относительно побочной продукции, например, соломы злаков, мы не располагаем достоверной информацией, поскольку возможны разные варианты ее судьбы. Нередко солома измельчается при уборке урожая, остается на поле и запахивается в почву; используется в качестве подстилки на животноводческих фермах и в дальнейшем в составе навоза поступает на поля, используется для различных хозяйственных нужд, а иногда просто сжигается. Можно допустить, что в земледелии РФ до половины побочной продукции переходит в разряд NEP. В наших расчетах баланса углерода побочная продукция, как и основная, относилась к утилизируемой, то есть продукции, которая практически полностью подвергается минерализации и служит в конечном счете источником CO₂.

Микробное (гетеротрофное) дыхание пахотных почв (R_h), несомненно, должно учитываться в расходной части углеродного баланса. Факторы, определяющие уровень R_h – это количество поступающих в почву органических материалов, уровень увлажнения и температуры почв. Приход в почву органического углерода, прежде всего, зависит от величины NPP экосистемы, в нашем случае, от количества заделываемых наземных растительных остатков, корней и органических удобрений. Для оценки R_h использовалось предложенное Мухортовой с соавт. [38] уравнение, описывающее взаимосвязь NPP и R_h :

$$Rh = NPP \frac{\sum Rh}{\sum NPP},$$

где R_h – гетеротрофное дыхание; \sum_{Rh} – суммарное значение R_h для определенных почв; \sum_{NPP} – суммарное NPP для экосистем на тех же почвах. Принцип такого расчета гетеротрофного дыхания почв имеет под собой определенное научное обоснование, поскольку дыхательный субстрат для почвенных микроорганизмов представляет собой, прежде всего, свежий легко разлагаемый органический материал, а именно NPP. Чем больше в почву поступает NPP, тем выше значение R_h .

В нашем случае \sum_{Rh} получили как суммарную годовую величину R_h для пахотных почв на основе базы данных по дыханию почв сельскохозяйственных угодий различных почвенно-климатических зон [11]. Величина \sum_{NPP} (суммарной среднегодовой NPP для пахотных почв) вычислена как средняя величина за период 1990–2016 гг. От-



Рис. 4. Динамика баланса углерода на пахотных угодьях РФ за период 1990–2016 гг.

ношение \sum_{Rh}/\sum_{NPP} оказалось равным 0.6. Этот коэффициент использован для расчета ежегодного гетеротрофного дыхания пахотных почв за период 1992–2016 гг., то есть величина общей NPP умножалась на 0.6. Разумеется, рассчитанные величины R_h являются до некоторой степени условными, поскольку получены при усреднении большого массива данных и не отражают почвенных различий. Величина R_h – одна из главных составляющих баланса углерода не только в экосистемах, но и в масштабе почвенно-климатических регионов.

Баланс углерода (Б) на пахотных угодьях РФ определялся с расчетом за год. За приходную часть баланса принималась общая NPP, состоящая из углерода основной и побочной продукции сельскохозяйственных культур, наземного растительного опада и корневых систем. Расходная часть баланса (П) состояла из основной и побочной продукции, выраженной в углероде, плюс величина почвенного гетеротрофного дыхания (R_h). Баланс углерода: $B = NPP - (П + Rh)$. Отрицательная величина баланса указывает на преобладание эмиссии C-CO₂ над его стоком и означает, что данная экосистема является источником CO₂. Положительная величина баланса – преобладание стока C-CO₂ над его эмиссией. На рис. 4 приведены данные по состоянию баланса углерода на пахотных угодьях РФ за период 1992–2016 гг.

Данные, представленные на рис. 4, наглядно демонстрируют, что пахотные угодья России за период 1990–2016 гг. представляли собой чистый источник C-CO₂ в размере 21–27 (в среднем 24.5) млн т C-CO₂/год.

Из состава пахотных угодий за 25-летний период в залежное состояние перешло до 40 млн га (рис. 2). Исследование углеродного баланса залежей показало, что этот вид земель превратился из источника CO₂ в его абсолютный сток, то есть

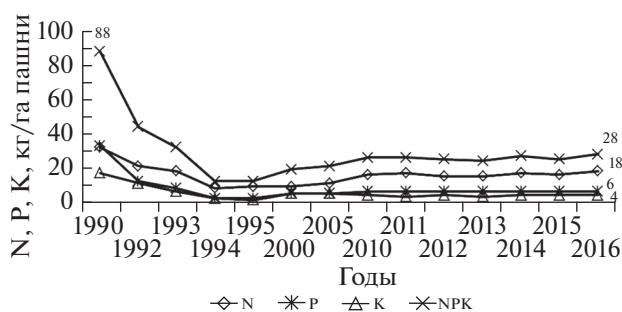


Рис. 5. Применение минеральных удобрений на посевных площадях РФ в 1990–2016 гг. (цифры – величины применения N, P, K в кг/га посевной площади).



Рис. 6. Изменение доли удобряемой площади пашни РФ в период 1990–2016 гг.

происходила секвестрация атмосферной CO_2 . Так, средняя скорость депонирования углерода в бывших пахотных почвах РФ определяется величинами около 45 млн т С в год, а в целом за 1995–2016 гг. аккумулировалось около 1 млрд т углерода в органическом веществе почв и растительной биомассе выросших за это время древесной и кустарниковой растительности [1, 31, 32].

Оценивая в целом изменение баланса углерода на землях сельскохозяйственного назначения за период 1992–2016 гг., можно констатировать, что в земледелии России за счет сокращения пахотных угодий и перевода их в залежное состояние существенно изменился баланс углерода. Земледелие в целом из чистого источника C-CO_2 в начале 90-х годов превратилось в чистый накопитель (секвестор) C-CO_2 в размере около 20 ($45 - 24.5 = 20.5$) млн т $\text{C-CO}_2/\text{год}$ и тем самым служит выполнению глобальной задачи (Международная программа “4 промилле”) сокращения эмиссии парниковых газов в сельскохозяйственном производстве.

Азот, фосфор, калий. Одновременно с потоками углерода изменились направленность и коли-

чественные характеристики потоков азота, фосфора и калия – составляющих плодородия почв и основы корневого питания растений. Эти изменения произошли вследствие резкого сокращения применения всех видов удобрений. В сельском хозяйстве России с начала 90-х годов радикально нарушился баланс биогеохимических потоков N, P, K в агрофере. При сокращении посевных площадей произошло одновременно и снижение норм внесения всех видов удобрений (рис. 5). Отличительной особенностью применения удобрений после 1990 г. являются, прежде всего, их очень низкие дозы на гектар пашни и резкое сокращение удобряемой площади пашни в 90-х годах (рис. 5, 6). С начала двухтысячных годов отмечается постепенный рост доли пашни, получающей удобрения, но этот рост обусловлен сокращением общей посевной площади.

При удобрении основных культур дозы питательных веществ за последние 15 лет составляли: под зерновые 20–50, под сахарную свеклу 119–294, под картофель 155–326 кг/га [19]. Органические удобрения вносятся на менее 10% посевных площадей.

Роль органических удобрений в земледелии бесспорна. Их применение не ограничивается только снабжением растений питательными элементами (N, P, K, рядом микроэлементов), но также происходит обогащение почвы органическим углеродом. Однако накопление органического углерода в почве возможно только при определенном отношении $\text{C}_{\text{орг}}/\text{N}_{\text{мин}}$.

Здесь следует привести пример классического опыта в Ротамстеде (Англия) [40]. При ежегодном внесении навоза в дозе 35 т/га в год в карбонатную почву с исходным содержанием органического азота около 0.1% в почве постоянно в течение 80 лет названный показатель возрастал до 0.25–0.27%. Следующие 70 лет ежегодного внесения навоза не способствовали увеличению содержания в почве органического вещества. На контроле без удобрений и при ежегодном внесении только минеральных удобрений, в составе которых было 144 кг N/га в год, содержание органического азота в почве оставалось на первоначальном уровне, то есть 0.1%.

Совершенно иную картину мы видим на примере многолетнего опыта академика Д.Н. Прянишникова, проводившегося на дерново-подзолистой почве (Долгопрудная агрохимическая опытная станция НИИУИФ) по сравнению эффективности применения навоза и эквивалентного количества питательных веществ в минеральных удобрениях. Применение навоза в течение 40 лет не выявило больших преимуществ перед минеральной системой удобрений [25]. Одним из объяснений такого результата могло быть невысокое

количество (20 т/га) внесения навоза. Однако множество опытов, проведенных на различных почвах бывшего СССР, показало однозначный положительный эффект применения органических удобрений [26].

Основной вывод из многочисленных агрохимических исследований, начатых Д.Н. Прянишниковым в начале прошлого века, является факт высокой эффективности применения удобрений на всех без исключения почвах России. Однако этот неоспоримый факт абсолютно проигнорирован в наше время. Выше были приведены статистические данные о состоянии применения всех видов удобрений в период от 1992 г. до настоящего времени. Мы являемся свидетелями уникального положения, когда страна занимает одно из видных мест в Мире по производству минеральных удобрений, и в то же время в земледелии России применяют ничтожно малое количество удобрений и, как следствие, страна с обширными сельскохозяйственными угодьями получает одни из самых низких урожаев. Это не удивительно, поскольку получение сельскохозяйственной продукции в России производится практически полностью за счет не очень богатого естественного плодородия почв.

Приведем соответствующие данные, полученные на анализе баланса питательных веществ в земледелии РФ за период 1992–2016 гг.

Азот. За 25-летний период в земледелии России вынос азота с урожаями сельскохозяйственных культур превысил внесение азота со всеми видами удобрений на 63.5 млн т или в расчете на гектар посевов 814 кг (рис. 7А). Возможно, дефицит азота в земледелии складывался несколько меньше, чем 63.5 млн т, поскольку в почвы также поступал азот за счет симбиотической и несимбиотической азотфиксации. К сожалению, мы не располагаем такими данными. Но кроме биологической фиксации атмосферного азота из почв, происходят и потери азота вследствие денитрификации и вымывания нитратов. Если судить по данным, полученным с мечеными по ^{15}N азотными удобрениями на различных почвах и в разных климатических зонах, опубликованным в 70–80-ых годах прошлого века, только потери азота в газообразных формах достигали 15–25% от вносимых доз [5, 8–10, 24, 25]. С учетом приведенных фактов можно утверждать, что сельское хозяйство России в настоящее время испытывает острый дефицит азота, и, судя по продолжающейся тенденции нарастания этого дефицита, ситуация в обозримой перспективе не изменится. Недостаток азота в питании растений не может обеспечивать получения полноценного по качеству и количеству урожая сельскохозяйственной продукции.

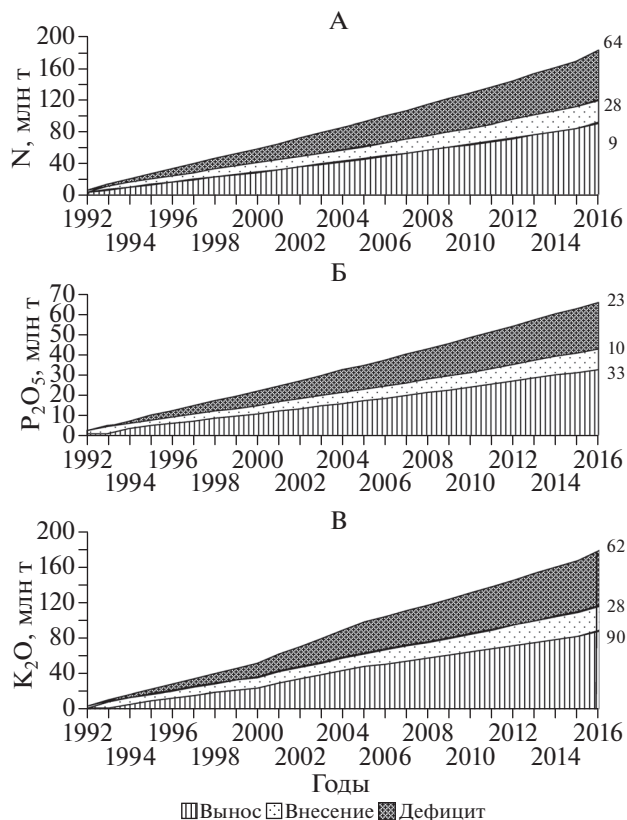


Рис. 7. Баланс азота (А), фосфора (Б) и калия (В) в земледелии России за 1992–2016 гг. нарастающим итогом.

Фосфор. Еще более острая ситуация складывается с балансом фосфора в земледелии. Если в случае с азотом какая-то часть его дефицита компенсируется за счет биологической фиксации, то пополнение запасов фосфора в почвах возможно только путем применения фосфатных удобрений. Состояние баланса фосфора в земледелии России показано на рис. 7Б.

Как видно, вынос фосфора с урожаями сельскохозяйственных культур за 25 лет уже превысил более чем в 3 раза внесение фосфора со всеми видами удобрений. В результате образовался дефицит в 23 млн т P_2O_5 в масштабе всего земледелия России. Дефицит фосфора в земледелии России ничем не оправдан. В стране имеется огромный потенциал запасов лучшего в мире по качеству фосфатного сырья – Хибинского апатита, отличающегося от зарубежных месторождений высокой концентрацией P_2O_5 , чистотой и легкостью переработки не только на высококонцентрированные удобрения, но и на кормовые добавки для скота.

За годы после развала СССР производство фосфорных удобрений и фосфатного концентрата не только не сократилось, а напротив увеличилось, достигнув в 2016 г. 11.5 млн т апатитового

концентрата, который в основном идет на производство фосфорных удобрений. Три четверти выпускаемой фосфорсодержащей продукции поставляется на мировой рынок [12]. Создается весьма тревожная картина. Запасы высококачественного фосфатного сырья исчерпываются и в основном направляются на удобрения в зарубежные страны. Никаких признаков изменения ситуации в лучшую сторону на ближайшую перспективу не предвидится. Производители, поддерживая достаточно высокий уровень производства минеральных удобрений в России, в основном экспортируют их за рубеж. По причине дороговизны удобрений отечественные сельхозпроизводители, не имея достаточных инвестиций, не могут их покупать. В результате из страны “уплывают” громадные количества столь дефицитных удобрений, обеспечивающих получение дополнительной продукции на многие миллионы долларов странами-импортерами наших ресурсов.

С другой стороны, наша страна тратит огромные средства на импорт продовольствия и сырья из этих же стран. Причем затраты на импорт продовольствия гораздо выше, чем выручка от продажи за рубеж удобрений. В итоге мы оказываемся в продовольственной зависимости от ряда европейских стран и в результате подрываем собственную продовольственную безопасность.

Следует особо отметить, что безоглядный экспорт за рубеж минеральных удобрений, в особенности фосфорных, в перспективе приведет к невосполнимым потерям для производства продовольствия и сырья в стране, поскольку разведанные запасы в России фосфатных руд практически не приращиваются. Хибинские апатиты уже разрабатываются более 70 лет и в не столь отдаленной перспективе будут истощены. Замена хибинского апатита на другие источники фосфора (низкопроцентные фосфориты) – малоперспективна в силу трудоемкости и энергозатратности их переработки на удобрения [12].

Калий. Третьим по значению питательным элементом в земледелии России является калий. Возможно, ситуация с калием менее острая, чем с фосфором или азотом, но без применения калийных удобрений нельзя полностью реализовать потенциал эффективности азотных и фосфорных удобрений, а также получение полноценной сельскохозяйственной продукции.

Многие почвы, особенно легкие, имеют невысокие природные запасы калия. Дефицит калия стал обнаруживаться и в черноземных почвах, которые по сравнению с дерново-подзолистыми и серыми почвами имеют гораздо большие природные запасы калия, поскольку черноземы сформировались на лёссах, имеющих достаточно высокое природное содержание калия.

Данные по балансу калия (рис. 7В) демонстрируют весьма серьезный накопленный дефицит данного элемента в земледелии. Запасы калия в почвах не безграничны. При таком соотношении выноса калия с урожаями и его внесения с удобрениями в недалеком будущем, калий будет лимитировать получение качественной сельскохозяйственной продукции. В настоящее время в ряде стран Европы и Азии повышается спрос на калийные удобрения [29], поскольку недостаток калия лимитирует полную реализацию потенциала новых сортов сельскохозяйственных культур и препаратов химических средств защиты растений. Очень большой экспорт калия из России, как и фосфора, не служит укреплению продовольственной безопасности страны. Калий вместе с фосфором являются невозобновляемыми и ограниченными природными ресурсами, которые должны бережно использоваться ради блага грядущих поколений нашей страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Перестройка производственных отношений в сельскохозяйственном секторе России привела к структурным изменениям аграрного землепользования. Выведенные из сельскохозяйственного оборота десятки миллионов гектаров пахотных угодий перешли в разряд залежных земель, подвергшихся зарастанию луговой и древесной растительностью. Это в свою очередь изменило характер формирования биологической продуктивности и ее состав на сельскохозяйственных угодьях в целом.

Наиболее резкие сокращения посевных площадей происходили в период с 1992 до начала 2000-х гг. В последующие 15 лет посевные площади сельскохозяйственных культур стабилизировались на уровне 78–80 млн га.

Изменения структуры земельных угодий с одновременным радикальным сокращением применения всех видов удобрений вызвали превалирование биогеохимических потоков питательных элементов (N, P, K) из пахотных почв на урбанизированные территории.

Пахотные угодья России за период 1990–2016 гг. представляли собой чистый источник C-CO₂ в размере 21–27 (в среднем 24.5) млн т C-CO₂/год.

Но, принимая во внимание залежные земли и оценивая в целом изменение баланса углерода на землях сельскохозяйственного назначения, можно констатировать, что в земледелии России существенно изменился баланс углерода. Земледелие в целом из чистого источника C-CO₂ в начале 90-х годов превратилось в чистый накопитель (секвестор) C-CO₂ в размере около 20 (45 – 24.5 =

= 20.5) млн т С-СО₂/год. Этот факт можно рассматривать как вклад земледелия России в выполнение глобальной задачи Международной Программы “4 промилле” по накоплению углерода в почвах, используемых в сельскохозяйственном производстве.

Однако накопившийся дефицит азота, фосфора и калия в пахотных почвах показывает, что за 25 лет после распада СССР земледелие России приобрело устойчивый истощительный характер, то есть производство сельскохозяйственной продукции основывается практически на естественном плодородии почв. Явно нарастает питательная деградация пахотных почв. В этой ситуации нецелесообразно проводить кампанию по возвращению залежных земель в пашню. Расширение посевных площадей без их обеспечения удобрениями лишь усилит экстенсификацию сельскохозяйственного производства, как малопродуктивного и низко производительного.

Дефицитный баланс питательных веществ означает, что в сельскохозяйственном производстве в значительной степени не реализуется почвенно-климатический потенциал и потенциал других факторов, таких как сорт, химические средства защиты растений и др. В результате производительность труда в сельском хозяйстве России одна из самых низких в Мире, и страна не дополучает многие миллионы тонн продукции и продолжает зависеть от импорта продовольствия.

Наибольшую тревогу вызывает остродефицитный баланс фосфора. В этой связи необходимо значительно ограничить экспорт апатитового концентрата и фосфорсодержащих удобрений как стратегического (не возобновляемого!) ресурса, необходимого для обеспечения продовольственной безопасности страны на десятилетия вперед.

В целях обеспечения продовольственной безопасности страны должен быть осуществлен переход аграрного сектора на интенсивный путь развития, включая всестороннюю химизацию земледелия. Разумной альтернативы применению минеральных удобрений нет!

Модель рационального и безопасного применения минеральных удобрений и других современных средств химизации позволит приостановить истощение почв и повысить продуктивность культур до уровня, при котором страна откажется от импорта продовольствия.

Благодарность. Работа выполнена в соответствии с Госзаданием АААА-А18-118013190177-9.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баева Ю.И., Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Телеснина В.М. Содержание углерода в залежных почвах различных природно-климатических зон

европейской части России // Ноосфера. 2017. № 1. С. 128–142.

2. Вернадский В.И. Биосфера и ноосфера. М.: Наука, 1989. 261 с.
3. Второй оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: Росгидромет, 2014. С. 18–36.
4. Журавлева А.И., Алифанов В.М., Благодатская Е.В. Влияние контрастных трофических условий на величины затравочного эффекта в серых лесных почвах // Почвоведение. 2018. № 2. С. 203–210.
5. Кореньков Д.А. Агрохимия азотных удобрений. М.: Наука, 1976. 223 с.
6. Кудеяров В.Н. Азотно-углеродный баланс в почве // Почвоведение. 1999. № 1. С. 73–82.
7. Кудеяров В.Н. Интенсивность процессов азотного цикла в почве при применении азотных удобрений // Изв. АН СССР. Сер. биол. 1982. № 5. С. 660–669.
8. Кудеяров В.Н. Об интенсификации вовлечения азота в его биогеохимический цикл // Круговорот и баланс азота в системе почва–растение–удобрение–вода. М.: Наука, 1979. С. 280–288.
9. Кудеяров В.Н. Цикл азота в почве и эффективность удобрений. М.: Наука, 1989. 216 с.
10. Кудеяров В.Н., Башкин В.Н., Кудеярова А.Ю., Бочкарев А.Н. Экологические проблемы применения минеральных удобрений. М.: Наука, 1984. 214 с.
11. Кудеяров 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., Курганова И.Н., Ларионова А.А., Лопес де Гереню В.О., Уткин А.И., Чертов О.Г. Пулы и потоки углерода в наземных экосистемах России. М.: Наука, 2007. 315 с.
12. Минприроды и экологии РФ. Государственный доклад “О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов Российской Федерации в 2015 г. М.: 2016. С. 267–283. <http://www.mineral.ru>.
13. Основные показатели сельского хозяйства в России в 2010 г. // Россия в цифрах. М.: Росстат, 2011.
14. Основные показатели сельского хозяйства в России в 2010 г. // Россия в цифрах. М.: Росстат, 2011. С. 5–11.
15. Петербургский А.В. Круговорот и баланс питательных веществ в земледелии. М.: Наука, 1979. 168 с.
16. Рамочная конвенция об изменении климата. Организация Объединенных Наций FCCC/CP/2015/L.9. Париж, 30 ноября –11 декабря 2015 г.
17. Российский статистический ежегодник. М.: Госкомстат России, 1995. 976 с.
18. Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2016. 725 с.
19. Российский статистический ежегодник. М.: Росстат, 2017. 686 с.
20. Семенов В.М., Когут Б.М. Почвенное органическое вещество. М.: ГЕОС, 2015. 233 с.

21. *Смирнов П.М.* Превращение азотных удобрений в почве и их использование растениями. Автореф. дис. ... докт. с.-х. н. М.: ТСХА, 1970. 42 с.
22. *Соколов М.С., Дородных Ю.Л., Марченко А.И.* Здоровая почва как необходимое условие жизни человека // Почвоведение. 2010. № 7. С. 858–856.
23. *Соколов М.С., Спиридонов Ю.Я., Торопова Е.Ю., Глинушкин А.П., Семенов А.М.* Экологические и фитосанитарные функции почвенного органического вещества // Агрохимия. 2018. № 4.
24. *Филимонов Д.А., Руделев Е.В.* Потери азота удобрений и почвы при вымывании на основных почвенных разностях Нечерноземной зоны // Круговорот и баланс азота в системе почва–растение–удобрение–вода. М.: Наука, 1979. С. 132–138.
25. *Хлыстовский А.Д., Касицкий Ю.И., Корнеев Е.Ф., Калинина В.М.* Продуктивность севооборота, баланс питательных веществ и плодородие дерново-подзолистой почвы при длительном применении удобрений // Тр. НИУИФ. 1986. Вып. 250. С. 167–187.
26. *Шевцова Л.К.* Изменение гумусного состояния и азотного фонда основных типов почв при длительном применении различных систем удобрения. Автореф. дис. ... докт. биол. н. М.: ВИУА, 1986. 36 с.
27. *Bayer C., Mielniczuck J., Amado T.J.C., Martin-Neto L., Fernandes S.B.V.* Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil // Soil and Tillage Research. 2000. V. 54. P. 101–109.
28. *Corsi S., Friedrich T., Kassam A., Pisante M., João de Moraes Sã.* Soil Organic Carbon Accumulation and Greenhouse Gas Emission Reductions from Conservation Agriculture: Integrated Crop Management. FAO, Rome, 2012. V. 16. 88 p.
29. FAOSTAT – 2017. <http://www.fao.org/faostat/ru/#data/GL>.
30. *Hettelingh J.P., Slootweg J., Posch M. (eds).* Critical load, dynamic modeling and impact assessment in Europe: CCE Status Report. 2008. 234 p.
31. *Kurganova I.N., Kudeayrov V.N., Lopes de Gerenyu V.O.* Updated estimate of carbon balance on Russian territory // Tellus. 2010. V. B62. P. 497–505.
32. *Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y.* Large-scale carbon sequestration in post-agrogenic ecosystems in Russia and Kazakhstan // Catena. 2015. V. 133. P. 461–466.
33. *Kuzyakov Y., Friedel J.K., Stahr K.* Review of mechanisms and quantification of priming effects // Soil Biol. Biochem. 2000. V. 32. P. 1485–1498.
34. *Magdoff F., Weil R.R.* Soil organic matter management strategies // Soil Organic Matter in Sustainable Agriculture. CRC Press, New York, 2004. P. 45–65.
35. *Miao Y., Stewart B.A., Zhang F.* Long-term experiments for sustainable nutrient management in China. A review // Agronomy for Sustainable Development, Springer Verlag/EDP Sciences/INRA. 2011. 31. P. 397–414. doi 10.1051/agro/2010034
36. *Minasny B., Malone B., McBratney A.B., Angers D.A., Arrouas D., Chamders A., Chaplot V., Chen Zueng-Sang, Cheng Kun, Das B.B., Field D., Gimona A., Hedley C.B., Hong S.Y., Mandal B., Marchant B., Martin M., McConkey B.G., O'Rourke S., Richer-de-Forges A., Odeh I., Padarian J., Paustian K., Pan Genxing, Poggio L., Savin I., Stolbovoy V., Stockman U., Sulaeman Y., Tsui Chu-Chin, Vagen Tor-Gunnar, van Wesemael B., Winowiecki L.* Soil 4 per mille // Geoderma. 2017. V. 292. P. 59–86.
37. *Moreno F., Murillo J.M., Pelegrín F., Girón I.F.* Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃ // Soil and Tillage Research. 2006. V. 85. P. 86–93.
38. *Mukhortova L., Schepaschenko D., Shvidenko A., McCallum I., Kraxner F.* Soil contribution to carbon budget of Russian forests // Agricultural and Forest Meteorology. 2015. V. 200. P. 97–108.
39. *Qiao N., Xu X., Hu Y., Blagodatskaya E., Liu Y., Schaefer D., Kuzyakov Y.* Carbon and nitrogen additions induce distinct priming effects along an organic-matter decay continuum // Scientific Reports. 2016. V. 6. P. 19865.
40. Rothamsted Research. Guide to the Classical and other long-term experiments, datasets and sample archive. Harpenden. UK, 2012. 52 p.
41. Save and Grow. A policymaker's guide to the sustainable intensification of smallholder crop production. FAO, Rome, 2011. 116 p.
42. *Shahbaz M., Kuzyakov Y., Sanaullah M., Heitkamp F., Zelenev V., Kumar A., Blagodatskaya E.* Microbial decomposition of soil organic matter is mediated by quality and quantity of crop residues: mechanisms and thresholds // Biology and Fertility of Soils. 2017. doi 10.1007/s00374-016-1174-9
43. *Sisti C.P.J., dos Santos H.P., Kohmann R., Alves B.J.R., Urquiaga S., Boddey R.M.* Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil // Soil and Tillage Research. 2004. V. 76. P. 39–58.
44. *Stockfisch N., Forstreuter T., Ehlers W.* Ploughing effects on soil organic matter after twenty years of conservation tillage in Lower Saxony, Germany // Soil and Tillage Research. 1999. V. 52. P. 91–101.
45. *Tian J., Pausch J., Yu G., Blagodatskaya E., Gao Y., Kuzyakov Y.* Aggregate size and their disruption affect 14C-labeled glucose mineralization and priming effect // Applied Soil Ecology. 2015. V. 90. P. 1–10.
46. United Nations: World Population Prospects: The 2015 Revision. File POP/1-1.
47. *Vanden Bygaart A.J., Gregorich E.G., Angers D.A.* Influence of agricultural management on soil organic carbon: a compendium and assessment of Canadian studies // Can. J. Soil Sci. 2003. V. 83. P. 363–380.
48. Voluntary Guidelines for Sustainable Soil Management Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome, Italy. FAO, 2017. 26 p.
49. World fertilizer trends and outlook to 2018. FAO, Rome, 2015. 66 p.

Soil-Biogeochemical Aspects of Arable Farming in the Russian Federation

V. N. Kudeyarov*

*Institute of Physical-Chemical and Biological Problems of Soil Science of Russian Academy of Sciences (RAS),
242290 Pushchino, Russia*

**e-mail: vnikolaevich2001@mail.ru*

Soil-biogeochemical aspects of the current state of arable land in the Russian Federation are discussed. Considerable transformation of Russian agriculture has led to structural changes in the agricultural land use, including arable farming. About forty million hectares of former arable land have been abandoned and converted into the category of abandoned lands subjected to overgrowing with meadow and woody vegetation. The restoration of natural vegetation in postagrogenic ecosystems is accompanied by changes in the biological productivity and composition of vegetation on agricultural land in general. The reduction of plowlands and their transformation to abandoned lands have changed the carbon budget. In the early 1990s, arable farming was the net source of C-CO₂. At present, the total arable land area in Russia is estimated at approximately 80 M ha. This area is a source of about 20 Mt C-CO₂/yr. Forty million hectares of former arable land have turned into the sink of C-CO₂ of about 40 Mt/yr in size. Thus, the entire agricultural land in Russia functions as the net sink for atmospheric CO₂ at the rate of 20 Tg C/yr. This fact can be considered a contribution of Russian agriculture to the goals of the “soil 4 per mille” international program assuming carbon sequestration in agricultural soils. Changes in the agricultural land use patterns together with a sharp decrease in the application of all kinds of fertilizers have led to prevalent biogeochemical flux of nutrients (N, P, K) from arable soils to urbanized areas. The deficient nutrient budget implies that the soil-climatic potential and the potentials of other factors increasing farming productivity (new varieties, plant-protective chemicals, etc.) are not fully realized in agricultural production. In 25 years (1992–2016), the uptake of nutrients by crops from arable land comprised 91, 33, and 90 Mt for N, P₂O₅, and K₂O, respectively. The amount of applied fertilizers in that period was only about 28 Mt for N, 10 Mt for P₂O₅, and 28 Mt for K₂O. The highly deficient budget of phosphorus is of special concern. Under these conditions, it is necessary to significantly restrict the export of apatite concentrate and phosphate fertilizers as strategic (nonrenewable) resources necessary for ensuring the food security of Russia for decades ahead.

Keywords: biogeochemical fluxes, CO₂ sinks and sources, carbon, nitrogen, phosphorus, potassium budget, nutritional degradation of soils