

БАЛАНС ВЕЩЕСТВА И ЭНЕРГИИ В ПАХОТНОЙ ДЕРНОВО-ПОДЗОЛИСТОЙ ПОЧВЕ

В.И. САВИЧ, Е.В. ТРУБИЦИНА, А.Г. ЗАМАРАЕВ, В.И. КОБЗАРЕНКО,
Ю. А. ДУХАНИН, Ю.Н. НИКОЛЬСКИЙ*

(Кафедра почвоведения, кафедра растениеводства,
кафедра агрохимии)

В работе рассмотрен баланс вещества, энергии и информации в системе почва — растение на примере дерново-подзолистой почвы 7-польного полевого севооборота. Показана значительная роль в балансе биофильных элементов их накопления в пахотном слое за счет развития дернового процесса и увеличения подвижности в почве при применении удобрений, мелиорантов и под влиянием выращиваемых растений. Оценена роль в балансе вещества корневых выделений, испарения из почв и транспирации растений, поглощения растениями элементов из воздушной среды. Доказана необходимость достижения баланса различных свойств почв, процессов и режимов, структурных взаимосвязей между свойствами почв.

Баланс биофильных элементов в почве является традиционной проблемой, возникающей при использовании почв в с.-х. производстве. В зависимости от приходных и расходных статей баланса рекомендуются как дозы применения удобрений, так и оптимальные системы севооборотов, приемы повышения плодородия почв [3, 13, 14]. Однако повышение уровня интенсификации производства, возрастающее антропогенное воздействие на почву, увеличение степени деградации компонентов агрофитоценозов диктует необходимость более углубленного рассмотрения статей баланса с точки зрения почвоведения и экологии, протекающих в системе процессов и режимов [9, 11]. Рядом авторов установлено, что и при отрицательном балансе отдельных элементов содержание их подвижных форм в почве не изменяется, или даже увеличивается [3, 4, 13]. В то же время внесение биофильных элементов в почву с удоб-

рениями в отдельных конкретных ситуациях не приводит к увеличению в почве их подвижных и особенно водорастворимых форм [12]. Несмотря на положительный баланс по биофильным элементам, урожай в ряде случаев остается низким, что свидетельствует о недостаточности для оценки плодородия почв использования существующих методов балансовых расчетов, без учета структурных взаимосвязей между свойствами почв.

Объекты исследования

В качестве объекта исследования выбраны дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы, развитые на покровных отложениях, с опыта кафедры растениеводства МСХА (таежно-лесная зона, южно-таежная подзона, среднерусская провинция) [2, 7, 8, 14].

Методика исследования состояла в обобщении и анализе данных, полученных в балансовом опыте на стационаре кафедры растениевод-

* С.-х. университет Чапинго, Мексика.

ства МСХА, проведении модельных экспериментов, теоретической разработке вопросов рассматриваемой проблемы.

Балансовые расчеты необходимо вести на разных иерархических уровнях: для бассейна, ландшафта, катены, структуры почвенного покрова поля, почвы, горизонтов, мезо- и микрозон, экологических ниш. Их рационально проводить для системы почва – растение – окружающая среда.

Баланс в системе предполагает равновесие и оптимальное сочетание свойств, процессов, режимов и моделей для выполнения почвой заданной экологической функции. Большое значение имеет баланс кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв, баланс синтеза и распада, миграции и аккумуляции, увеличения энтропии и негэнтропии, баланс положительно и отрицательно заряженных соединений ионов в почве, гидрофильных и гидрофобных продуктов, стимулирования и ингибирования и т.д. [9, 10, 11, 12].

Для практических целей необходимо знание баланса не только валовых форм элементов, а в первую очередь их подвижных форм и форм элементов, усвояемых растениями. В связи с указанным необходим учет происходящих в почве процессов и режимов. Таким образом, баланс предполагает не только анализ притока и оттока элементов из мезо- и микрозон, но и анализ их перехода из одной формы связи в другую.

Баланс параметров плодородия в почве предполагает баланс свойств почв, процессов и режимов, баланс содержания и соотношения элементов питания и в целом физико-химических, агрохимических, водно-физических и других параметров почв.

В свою очередь, баланс, например, агрохимических свойств почв,

предполагает баланс азотного, калийного, фосфатного и других состояний биофильных элементов в почве. Баланс фосфатного состояния предполагает оптимальное для данных целей и условий равновесие подвижности фосфатов, их прочности связи с твердой фазой почвы, скорости перехода из твердой фазы в раствор, буферной емкости по отношению к фосфатам и т.д. Баланс содержания усвояемых форм соединений ионов предполагает их оптимальное равновесие с подвижными, фиксированными и валовыми формами. Оптимум состояния и соотношения показателей свойств почв, процессов и режимов, оптимальный их баланс относительны и зависят от сочетания свойств почв, условий внешней среды, экологических требований выращиваемых культур.

С теоретической точки зрения понятие баланс следует рассматривать не как статический показатель равновесия в данный момент, а как оптимальный показатель, меняющийся во времени и в пространстве в зависимости от меняющихся внешних факторов.

Приходные и расходные статьи баланса биофильных элементов в агрофитоценозе

Приходные и расходные статьи баланса, принимаемые в расчетах, определяются наличием необходимых экспериментальных данных. Чаще в приходной статье баланса учитывают поступление веществ с удобрениями и мелиорантами, осадками, с семенами, за счет азотфиксации. Реже учитывают поступление веществ с повышенных элементов рельефа, из воздушной среды, с капиллярным поднятием воды из нижних горизонтов почв. Следует иметь ввиду, что содержание подвижных форм питательных элементов в пахотном слое почв может

повышаться за счет увеличения их подвижности под влиянием развития растений, применения мелиорантов и удобрений, биологического накопления элементов в верхнем слое почвы.

Расходными статьями баланса являются отчуждение питательных веществ с урожаем, миграция веществ за пределы корнеобитаемого слоя, испарение из почв и транспирация растений, денитрификация, потери почв с водной и ветровой эрозией и т.д.

По полученным нами данным, поступление элементов с дождевыми осадками составляло в среднем по севообороту: азота — 9,5 кг/га, фосфора — 0,2; калия — 4,5; кальция — 12 и магния — 17 кг/га, рН осадков — 6,4–6,8. В среднем за 1967–2003 гг. поступление Са составляло 27,9 кг/га, а магния — 34,1 кг/га, т.е. в целом поступление с осадками кальция и магния было выше, чем в Нечерноземной зоне, что в совокупности с нейтральной реакцией осадков является одной из причин стабилизации кислотно-основного состояния почв в изучаемом агрофитоценозе.

Ежегодное внесение питательных веществ в среднем по севообороту составило на среднекультуренной почве под урожаем на усвоение посевами 2% ФАР 122 кг/га азота, 15,1 — фосфора, 95,2 кг/га калия, а на усвоение 3% ФАР — 162,3 кг/га азота, 23,3 — фосфора, 128,5 кг/га калия. На полях повышенного плодородия средние по севообороту расчетные дозы удобрений (на 3% ФАР) равнялись по азоту 75,1 кг/га, фосфору — 27,5; калию — 72,4 кг/га. По полученным данным, на полях зерновых культур с растительными остатками возвращается в почву 22–28% азота, фосфора и калия и до 50% кальция и магния от

общего их содержания в растениях. На посадках картофеля при оставлении ботвы на поле возврат азота, фосфора и калия достигает 44–63%, а кальция и магния до 80–90% содержания во всей фитомассе. После клеверотимофеечной травосмеси 2-летнего пользования в почве остается (в вариантах с удобрениями) до 260 кг/га азота, 24 — фосфора, 215 — калия, 110 — кальция, 95 кг/га — магния. В поле занятого пара с послеуборочными остатками возвращается в пахотный слой 25–30% химических элементов, усвоенных растениями за время формирования урожая.

Миграция из почв с инфильтрацией и стоком составляла в слабо-окультуренной почве: азота — до 7 кг/га; калия — до 9, кальция — до 40, магния — до 20, фосфора — до 0,8 кг/га; в хорошо окультуренной почве — соответственно 20, 11, 50, 40, 1 кг/га. При этом в среднем величина рН мигрирующих вод равняется $7,1 \pm 0,1$; содержание HCO_3^- — $18,9 \pm 2,9$ кг/га и 14,0 мг/л; N-NH_4 — $1,0 \pm 0,3$ и 1,0; N-NO_3 — $1,3 \pm 0,5$ и 1,0; N-NO_2 — $0,06 \pm 0,04$ и 0,02; P_2O_5 — $0,8 \pm 0,4$ и 0,4; К — $3,5 \pm 0,8$ и 2,2, Na — $1,0 \pm 0,1$ и 0,9; Mg — $8,9 \pm 4,2$ и 5,7; Са — $15,3 \pm 9,9$ и 8,4; Cl — $5,6 \pm 1,3$ и 4,6; SO_4 — $10,6 \pm 1,2$ и 11,2; С — $2,6 \pm 0,7$ кг/га и 3,0 мг/л [14].

Как увеличение степени насыщенности почвы изучаемым элементом, так и повышение содержания в почве водорастворимого органического вещества приводили к увеличению миграции элемента за пределы почвенного профиля. Очевидно, что как избыточное накопление в почве отдельных элементов, так и их избыточная миграция приводят к нарушению оптимального баланса биофильных элементов для конкретных почв и условий.

Баланс компонентов органического вещества почв как фактор плодородия

Для достижения высокой биопродуктивности угодий и повышения плодородия почв необходимо создание баланса компонентов органического вещества почв. Состав и сочетание последних зависит как от свойств почв и факторов внешней среды, так и от уровня интенсификации производства, выращиваемой культуры. С нашей точки зрения, при этом необходимо рассматривать не баланс (или равновесное состояние) общего содержания гумуса, а баланс функциональных свойств гумусового состояния почв [10, 11].

В проведенных исследованиях установлено, что при применении средних доз минеральных удобрений $N_{45}P_{45}K_{45}$ и дозе органических удобрений 10 т/га в год в 7-польном севообороте с 2 полями многолетних трав достигается бездефицитный баланс гумуса. При этом содержание гумуса стабилизируется на уровне 1,8–1,9% в слабо- и среднеокультуренных почвах, не получающих удобрений, и 2,2–2,4; 2,5–2,6% — на средне- и хорошо окультуренных почвах, где внесение удобрений рассчитано на использование растениями 3% ФАР. Отношение углерода гуминовых кислот к углероду фульвокислот (Сгк/Сфк) на почвах слабой степени окультуренности составляло 0,7, а на почвах среднего и повышенного плодородия оно возрастало до 1,1. Негидролизруемый остаток гумусовых веществ составлял в зависимости от уровня плодородия почвы 55–65% от запасов гумуса. Принятая система земледелия приводила к стабилизации содержания гумуса в пахотном слое и к увеличению содержания гумуса в подпахотном горизонте.

При окультуривании происходили заметные изменения в элементном составе гуминовых кислот, свидетельствующие о возрастании интенсивности биохимических процессов трансформации органического вещества — расширения С/Н; С/Н, увеличения степени окисленности, повышения гумификации растительных остатков, возрастания количества азота биомассы микроорганизмов и снижения в ней соотношения углерода и азота. При повышении уровня окультуренности и удобренности почв существенно возрастало абсолютное и относительное количество стабильных фракций гуминовых культур, связанных с Са и глинистыми минералами, что имеет большое значение для формирования почвенной структуры [14].

Содержание гумуса в старопахотных дерново-подзолистых почвах поддерживается благодаря пожнивным послеуборочным остаткам. За 30-летний период ежегодно, в среднем по севообороту, на 1 га поступает в почву с послеуборочными остатками на полях низкого плодородия 27 ц сухих веществ; на полях среднего и повышенного плодородия, но без удобрений — 35–37 ц/га, а при применении органоминеральных удобрений — до 48–53 ц/га.

При агрономической оценке гумусового состояния почв установлено, что уровни гумуса, начиная с величины 2,2%, уже являются достаточными для обеспечения планируемой урожайности зерновых культур 50–60 ц/га при соответствующих дозах минеральных удобрений в нормальные по метеорологическим условиям годы. Роль повышенного гумусового фона хорошо окультуренной почвы в обеспечении высоких урожаяев возрастала в неблагоприятные по влагообеспеченности годы.

Баланс азота, фосфора и калия в почве

Большое значение в оптимизации всей совокупности свойств, процессов и режимов почв в балансе их структурных взаимосвязей имеет трансформация, аккумуляция и миграция в системе почва — растение соединений азота, фосфора и калия. По данным расчетов за 1967–1984 гг., положительный баланс по азоту отмечался только под травами 2-го года пользования. При внесении обычных доз удобрений отрицательный баланс наблюдался только под озимой пшеницей, ячменем и овсом. В то же время при внесении удобрений на 3% ФАР положительный баланс резко увеличивался под викоовсяной смесью и особенно под картофелем.

По полученным данным, в почве преобладает азот биомассы, что важно при оценке азотного баланса в агрофитоценозе. При этом содержание всех форм азота вниз по профилю существенно снижается, а отношение углерода к азоту биомассы расширяется. Составляющие азотного баланса в почве (минерализация гумуса, пожнивных остатков, накопление бобовыми растениями, несимбиотическая азотфиксация, вынос с урожаем, миграция в водную и воздушную среды, поглощение растениями из атмосферы) существенно отличались для почв разной степени окультуренности.

Азотминерализующая способность средне- и хорошо окультуренных почв была значительно выше, чем менее окультуренных и неудобряемых. Различия достигали 3-кратных и больших величин, особенно в неблагоприятных для минерализации условиях. В среднем за годы исследований за счет минерализации гумуса и растительных остатков посевы зерновых культур и картофеля усваивали ежегодно

азота из почвенных запасов без применения удобрений на полях низкого плодородия по 32–40 кг/га; среднего и повышенного плодородия — по 47–86 кг/га в зависимости от вида выращиваемой культуры.

На фоне применения рекомендуемых систем органоминеральных удобрений потребление азота растениями увеличивалось в 1,5–2 раза. Содержание общего азота почвы так же, как и гумуса, было уравновешенным с тенденцией его увеличения в корнеобитаемом слое. Показано, что исследуемые почвы, даже слабоокультуренные, способны при благоприятных условиях обеспечивать значительную часть потребности растений в азоте за счет почвенных ресурсов. Содержание минерального азота в почвах после инкубации их в благоприятных условиях составляло (в зависимости от культуры и погодных условий до отбора проб) в слабоокультуренной почве 11–85 кг азота на 1 га, в среднеокультуренной без удобрений — 18–85, с удобрениями — 48–85, в хорошо окультуренной без удобрений — 33–116, в удобряемой — 40–118 кг N на 1 га.

Ежегодно в среднем по 7-польному севообороту несимбиотическая азотфиксация на фоне удобрений составляла 28–30 кг/га, а без удобрений и при пониженном плодородии почвы — почти в 2 раза ниже. Значительное место в обогащении почв азотом и удовлетворении потребности в нем бобовых растений принадлежит клубеньковым бактериям. Симбиотическое усвоение азота из атмосферы при 2-летнем использовании клевера на фосфорно-калийном фоне равнялось 443–473 кг/га, в севообороте без удобрений на низкоплодородных полях — 165, на плодородных — 374–390 кг/га. Обогащение почвы связанным азотом на полях бобовых трав в основном происходило за

счет азота пожнивных остатков. От каждой тонны сена в почве оставалось 15–18 кг связанного в растительной массе азота, а от каждой тонны зеленой массы викоовсяной смеси — около 1,5 кг.

При ежегодной 40% минерализации пожнивных остатков, установленной в опытах, ассимиляция азота атмосферы свободноживущими микроорганизмами на полях зерновых и картофеля могла составлять на хорошо окультуренной почве на фоне расчетных доз удобрений 23–38 кг/га; при обычных дозах 21–32 и без удобрений — 23–38 кг/га; на слабоокультуренной почве при обычных дозах 21–32 и без удобрений 12–14 кг/га; а за счет пожнивных остатков многолетних трав — соответственно 72–76 кг/га; 71–73 и 45–66 кг/га.

По полученным данным, при увеличении окультуренности почв больше азота фитомассы отчуждается с поля, но больше и поступает в почву. При этом большее обеднение азотом в севообороте отмечается в абсолютной величине на хорошо окультуренной почве. Баланс фосфора в почве также в значительной степени определяет урожай с.-х. культур и экологическое состояние системы. Изменение содержания подвижных форм фосфора в почвах по ротациям севооборота составило на слабоокультуренной почве без внесения удобрений от 4,2–5,1 в 1967 г. до 1,6–2,2 в 2001 г.; на хорошо окультуренной почве без удобрений от 23,8–39,2 в 1973 г. до 12,5–21,0 в 2001 г.; на хорошо окультуренной почве с внесением удобрений на использование растениями 3% ФАР от 26,7–41,3 в 1973 г., до 25,1–30,7 в 2001 г.

В то же время вынос фосфатов с урожаем составлял значительно большие величины, чем уменьшение содержания его подвижных форм в почве. Это обусловлено, ско-

рее всего, как накоплением фосфатов в верхнем горизонте за счет развития дернового процесса почвообразования, так и увеличением подвижности фосфатов в пахотном слое за счет выделений растений и действия на минеральную часть почв водорастворимых органических соединений разлагающихся органических остатков [5].

При этом разные культуры выносят с урожаем различное количество фосфатов, а в процессе потребления фосфатов растениями они в разной степени переходят из менее подвижного состояния в более подвижное, в неодинаковой степени аккумуляруются в верхнем горизонте за счет развития дернового процесса почвообразования. Аналогичные данные получены и для других почв. Данные 12-летнего вегетационного опыта [4] по истощению на дерново-подзолистых почвах разной степени окультуренности свидетельствуют о том, что величина выноса P_2O_5 растениями в большинстве случаев значительно превышала величину содержания его подвижных форм в почве (в 2–3 раза).

Анализ баланса калия в системе почва – растение для исследуемых почв свидетельствует, что на почвах среднего и повышенного плодородия на фоне однократного известкования без применения удобрений отмечается уменьшение содержания подвижного калия по сравнению с исходным уровнем. Применение расчетной системы удобрений на усвоение посевами 3% ФАР обеспечило положительный баланс по калию. В вариантах без внесения удобрений отмечается отрицательный баланс калия, в наибольшей степени под травами. При внесении в почву обычных доз удобрений положительный баланс калия отмечается только под картофелем и викоовсяной смесью. Под этими же культурами в большей степени баланс

положителен и при внесении удобрений из расчета их использования на 2% и на 3% ФАР. В наибольшей степени отрицательный баланс отмечается при внесении удобрений под травами и овсом.

Содержание подвижного калия в почве обусловлено не только его потреблением растениями, выносом с мигрирующими водами и другими расходными статьями, но и с трансформацией его менее подвижных форм в более подвижные, с накоплением калия в верхнем слое за счет развития дернового процесса почвообразования. Поэтому уменьшение содержания подвижных форм калия в пахотном слое в вариантах без внесения удобрений в опыте было значительно меньше, чем можно было ожидать исходя из величины его отчуждения с урожаями опытных культур.

Аналогичные данные получены и другими авторами. Согласно работам [3, 4, 5], несмотря на отрицательный баланс калия в севооборотах на дерново-подзолистых почвах учхоза «Михайловское» и биостанции «Чашниково», снижение обменных форм его в почве не наблюдалось.

Данные об отчуждении калия из почв с урожаем с.-х. культур и его поступлении в почву с растительными остатками приведены в табл. 1.

По полученным данным, на окультуренных почвах была выше биопродуктивность угодий, и поэтому здесь больше калия отчуждается с поля и возвращается в почву с послеуборочными остатками. При этом абсолютная величина обеднения калием почв в вариантах без внесения удобрений была выше на более окультуренной почве. Отдельные культуры обладают разной способностью накапливать калий в верхнем горизонте почв, что, естественно, сказывается и на балансе его подвижных форм в пахотном горизонте. Однако при большом выносе калия культурами в почвах все-таки должно отмечаться уменьшение содержания его подвижных форм.

В поставленных опытах в контрольных вариантах (без удобрений) содержание подвижного калия изменилось на слабоокультуренной почве от 8 до 5–15 мг/100 г почвы и на хорошо окультуренной — от 29 до 10–20 мг/100 г почвы. При этом общий вынос калия за 5 ротаций севооборота составил без внесения удобрений на слабоскультуренной почве 869 кг/га, а на хорошо окультуренной почве без внесения удобрений — 1442 кг/га, что значительно превышает уменьшение содержания подвижных форм калия в почве в этих вариантах.

Таблица 1

Отчуждение калия из почв с товарной частью урожая с.-х. культур и его возврат в почву с растительными остатками в звене полевого севооборота (кг/га), \bar{X} за 1968–2002 гг.

Вариант	Вика +овес	Озимая пшеница	Картофель	Ячмень	Травы 1-го года	Травы 2-го года	Овес
ОК ₁ -1							
1	25,3	6,7	18,7	14,9	63,3	32,1	12,8
2	15,8	15,5	26,1	12,7	69,5	62,6	23,8
ОК ₃ -2							
1	65,8	20,1	50,6	32,2	148,4	170,5	34,2
2	24,5	50,2	74,8	33,9	124,2	134,0	82,0

Примечание. Здесь и далее: ОК₁-1 — слабоокультуренная почва без внесения удобрений; ОК₃-2 — хорошо окультуренная почва с внесением расчетных доз удобрений; 1 — отчуждение с урожаем; 2 — возврат в почву

Дополнительные статьи баланса биофильных элементов в почве

В то же время, согласно полученным данным, наряду с общепринятыми статьями баланса биофильных элементов в почве существенное влияние на изучаемые процессы оказывают и другие факторы. Одной из статей баланса биофильных элементов в почве является их отчуждение сорняками. В работе [6] указывается, что в литературных источниках затраты питательных веществ при формировании урожая с.-х. культур или создании продуктивного севооборота обычно приводятся без учета выноса сорняками. В то же время, нерациональное потребление основных макроэлементов (N, P, K, C) сорняками оказывает заметное влияние на затраты питательных веществ при создании продуктивности севооборота, увеличивая их на 30–35%. Данный процесс отмечался и в изучаемых почвах.

Порядок чередования культур в севообороте также является одним из факторов, влияющих на баланс биофильных элементов в системе почва – растение. Это связано как с влиянием предшественника на произрастающую культуру, так и с изменением свойств почв под влиянием отдельных с.-х. культур. При этом отдельные культуры потребляют различное количество элементов питания из горизонтов почв при неодинаковом их соотношении и оставляют определенное количество послеуборочных остатков с характеристическим химическим и биохимическим составом.

По полученным нами данным, за вегетацию растений больше азота, фосфора, калия и других элементов потребляли многолетние травы и картофель. Из зерновых культур повышенным накоплением азота в фитомассе отличались озимая

пшеница, ячмень и овес. Калия, независимо от минерального питания, больше содержалось в овсе и ячмене, чем в озимой пшенице, фосфора больше накапливалось в фитомассе озимой пшеницы и меньше в ячмене.

Погодные условия также влияют на урожай с.-х. культур, а следовательно, на отчуждение элементов питания из почв и на их поступление в почву с пожнивными и корневыми остатками, т. е. на статьи баланса. Кроме того, погодные условия влияют на миграционные процессы и трансформацию соединений ионов в почве, что, в конечном итоге, существенно корректирует приходные и расходные статьи баланса.

Одной из статей баланса биофильных элементов в системе почва – растение является поглощение почвами и растениями элементов из воздушной среды. В проведенных исследованиях [14] показана возможность поглощения листьями кукурузы аммиака из почвенного воздуха до 6,7 кг/га за вегетацию. Не учитываемыми статьями баланса биофильных элементов в системе почва – растение являются выделение растениями и почвами элементов в воздушную среду и выделение растениями элементов в почву. По литературным данным, выделение растениями элементов с транспирацией достигает 1 мг/л. При этом потери катионов растениями с транспирацией составляли от 0,5 до 10% от количества ионов, содержащихся в урожае [1].

Растения выделяют биофильные элементы и в почву. Для почв балансового опыта установлено, что поступление углерода в почву за счет прижизненного отмирания корней озимой пшеницы и овса составляло 1,3–1,7 ц/га, а за счет корневых выделений — 0,7–0,8 ц/га. Выделение почвами элементов в

воздушную среду с испарением составляет по отдельным элементам от 0,4 до 10% от количества ионов, содержащихся в урожае [1]. Из почв наблюдается значительное выделение углекислого газа (от 20 до 500 кг/га) и аммиака.

Влияние на баланс биофильных элементов в системе почва — растение внесения удобрений и мелиорантов хорошо известно и учитывается в балансовых расчетах. В то же время следует отметить, что усвояемость одного элемента питания зависит от содержания других биофильных элементов. Так, в данном опыте при увеличении содержания в почве подвижного фосфора с 3–5 до 25 мг/100 г усвоение азота легкогидролизуемой формы возрастало до 59% [13]. На почвах среднего и повышенного плодородия использование основных питательных веществ возрастало у пшеницы в 1,9–2,3 раза; картофеля — в 1,2–1,3; многолетних трав — в 1,6–2,2; ячменя и овса — в 1,3–1,7 раза по сравнению со слабокультурными полями. Применение минеральных удобрений увеличивало накопление химических элементов в фитомассе на 15–25%.

Возможность уменьшения содержания в почве подвижных фосфатов, калия, кальция и магния определяется способностью почв к поддержанию концентрации ионов в почвенном растворе при их отчуждении с урожаем. Этот показатель свидетельствует о том, на сколько лет хватает количества подвижных форм элементов питания в почве для растений без внесения удобрений или при внесении их малых доз. Данное свойство почв объясняет, почему без внесения удобрений содержание подвижных форм элементов питания в течение ряда лет держится на постоянном уровне.

Таким свойством в большей степени обладают почвы более тяже-

лого гранулометрического состава, более удобренные и окультуренные. Очевидно, что этот показатель влияет и на баланс биофильных элементов в почве. В то же время на отдельных почвах внесение удобрений не приводит к существенному увеличению содержания подвижных форм этих элементов в почвах. Данные явления обусловлены буферными свойствами почв.

В проведенных нами исследованиях установлено, что буферная емкость почв в отношении элементов питания выше на более окультуренных почвах, меньше при большей насыщенности почв вносимыми элементами, в интервалах меньших доз удобрений. Буферная емкость выше для водорастворимых форм и ниже для подвижных форм, выше при вычислении в полевых условиях и ниже для модельных опытов, выше для растертых образцов и ниже для почв ненарушенного сложения, выше при большем времени взаимодействия сорбатов с почвой.

Поглощение элементов питания растениями происходит не только из пахотного слоя, но и из нижележащих слоев почв. Это вносит существенные поправки в балансовые расчеты содержания биофильных элементов в почве в системе агрофитоценоза. Подтверждают это и данные, полученные другими исследователями. В работе [2] показано, что в среднем за 3 года из слоя 0–20 см растения кормовой свеклы потребили 30,5 кг азота, из слоя 20–40 см — 18,9 кг, а из слоя 60–80 см — 8,7 кг азота.

По данным работы [7], в подпахотные слои исследуемых почв проникает 20–25% корней зерновых культур, картофеля, викоовсяной смеси, трав 2-го года и до 40% клевера и трав 1-го года пользования. В состав корней входит от 10 до 40% всего количества отчуждае-

мых с урожаем элементов золы. Следовательно, за счет этой доли может быть частично компенсирован вынос их с урожаем. Установлено, что из подпахотных горизонтов окультуренных и сильно окультуренных дерново-подзолистых почв растения усваивают в пересчете на 1 га от 96 до 233 кг калия (1,6–15,3 мг/100 г), от 87 до 136 кг фосфора (0,1–1,5 мг на 100 г) [5]. Таким образом, подпахотные горизонты являются одним из существенных потенциальных источников снабжения растений элементами питания.

Баланс совокупности свойств, процессов и режимов почв, взаимосвязей между ними

Баланс вещества, энергии и информации в почве предполагает баланс окисления и восстановления, аэрации и анаэробнозиса, воздухо- и водообеспеченности, содержания и соотношения элементов. Указанные статьи баланса в значительной степени зависят от структурного состояния почв, соотношения структурных отдельностей различного размера. Однако оптимальное соотношение структурных отдельностей отличается как для почв разного гранулометрического состава, гумусированности, так и для почв разной степени увлажнения и теплообеспеченности [9].

Для исследуемых слабоокультуренных почв содержание водопрочных агрегатов более 1 мм составляло 12,4%, а в среднеокультуренных — 17,4; при пористости агрегатов — соответственно 37,2 и 39,3% [8]. Содержание агрегатов различного размера в слабо- и хорошо окультуренной почве составляло соответственно (в %) для размера >10 мм — 15,9±2,7 и 11,6±0,94; 10–7 мм — 8,8±0,8 и 9,8±1,2; 7–5 мм — 8,8±1,2 и 12,1±0,4; 5–3 мм —

12,5±1,7 и 17,5±2,4; 3–2 мм — 12,3±2,1 и 15,1±2,1; <0,25 мм — 0,9±0,3 и 0,4±0,4.

Очевидно, что структурное состояние почв, баланс в соотношении агрегатов различного размера являются одним из важных факторов плодородия, взаимосвязанных с другими свойствами почв. Так, по данным, полученным для среднеокультуренной почвы, при размере агрегатов 5–3 и <0,25 мм для удобренной и неудобренной почвы ОВП составлял соответственно 618 и 630 мВ; 410 и 495 мВ; N-NO₃ в мг/100 г почв — 7,5 и 56; 4,2 и 3,5; N-NH₄ в мг/100 г — 1,5–2,0; 6,1 и 4,7; Fe²⁺ мг/100 г — 0,7 и 0,5; 10,1 и 3,8; CO₂% — 0,42 и 0,41; 1,45 и 1,34. Активность каталазы (мл O₂ за 2 мин на 1 г почвы) — 6,2 и 6,2; 10,4 и 7,8 [8].

Равновесие и баланс в биологической, микробиологической и ферментативной активности почв также создают условия для баланса вещества, энергии и информации в агроэкосистеме, ее прогрессивного развития. Определенные группы микроорганизмов ответственны за окисление и восстановление компонентов почв, синтез и распад органических соединений, подкисление и подщелачивание, за увеличение и уменьшение миграции веществ в почвенном профиле и т. д. Для конкретных условий, очевидно, характерен и свой оптимальный процент выполняемых микроорганизмами функций, а следовательно, и определенное сочетание групп.

Для исследуемых почв учхоза «Михайловское» содержание отдельных групп микроорганизмов составляло соответственно для слабоокультуренной и хорошо окультуренной почв в тыс. на 1 г почв гетеротрофов на МПА — 1118 и 1975; олиготрофов — 1093 и 1260; использующих минеральный азот — 3306 и 3598; актиномицетов — 427 и 594

[14]. Содержание аммиачного азота тесно коррелировало с численностью микроскопических грибов ($r = 0,91$). Содержание углерода биомассы тесно коррелировало с численностью бактерий, развивающихся на КАА ($r = 0,95-0,99$); с гетеротрофами — аммонификаторами, развивающимися на МПА, и олиготрофами ($r = 0,76-0,84$). При этом количество микроорганизмов, использующих органические формы азота, было больше на окультуренных почвах, а содержание микроорганизмов, использующих минеральные формы азота, — на слабоокультуренной почве [14].

Кислотно-основное состояние почв в значительной степени определяет баланс и других свойств, процессов и режимов почв. Согласно полученным данным, изменение рН за период 1967–2001 гг. было незначительное и составило для слабоокультуренной почвы под викоовсяной смесью от 4,4 до 4,6; под озимой пшеницей — от 4,4 до 4,4; под картофелем от 4,5 до 4,6; под ячменем — от 4,5 до 4,5; под травами — от 4,4 до 4,5; под овсом — от 4,4 до 4,5, в отдельные годы — до 4,1. На хорошо окультуренной почве во всех вариантах значения рН колебались от 5,7 до 6,2.

Изменение суммы поглощенных оснований за 5 ротаций под с.-х. культурами полевого севооборота составило в вариантах ОК₁-1 и ОК₃-2 соответственно под викоовсяной смесью от 6,5 до 9,6 и от 15,0 до 15,4; под пшеницей — от 6,4 до 10,0 и от 14,4 до 16,4; под картофелем — от 8,1 до 9,0 и от 12,9 до 15,2; под ячменем — от 6,9 до 9,4 и от 14,5 до 16,2; под травами 1-го года — от 7,2 до 9,0 и от 15,2 до 13,7; под травами 2-го года — от 7,1 до 9,4 и от 13,7 до 16,1; под овсом — от 6,3 до 9,6 и от 14,6 до 15,6. Таким образом, за 37 лет вы-

ращивания культур даже без повторного известкования значимого уменьшения суммы поглощенных кальция и магния в почвах не отмечается.

По полученным результатам, с учетом статей кислотно-основного баланса в системе почва — растение — окружающая среда в данной почвенно-климатической зоне возможно не только подкисление почв в процессе с.-х. использования, но и стабилизация рН. При этом оптимизация рН обусловлена локальным поступлением в почву нейтральных или щелочных осадков, подтягиванием кальция и магния в верхние слои из подстилающих пород, развитием дернового процесса почвообразования, освобождением оснований при разрушении алюмосиликатов продуктами разложения органических остатков. Это иллюстрируется данными по отчуждению Са из почвы и поступлению его в почву с пожнивными остатками (табл. 2).

Как видно из табл. 2, в почву с пожнивными остатками поступает значительное количество Са. Вынос Са культурами севооборота значительно превышает наблюдающееся в отдельных вариантах уменьшение суммы поглощенных оснований в пахотном слое. Стабильность кислотно-основного состояния почв обуславливает баланс и других свойств, процессов и режимов почв.

Окислительно-восстановительное состояние почв является интегральной характеристикой протекающих в почве процессов, так как определяет прямо или косвенно очень многие процессы баланса трансформации и миграции вещества и энергии. Для прогрессивного развития почв и их окультуривания необходимо равновесие процессов окисления и восстановления. При этом для разных групп почв и

Таблица 2

Отчуждение Са из почвы с товарной продукцией и его возврат в почву с пожнивными остатками (1968–2002 гг.), кг/га

Вариант	Вика +овес	Озимая пшеница	Картофель	Ячмень	Травы 1-го года	Травы 2-го года	Овес
OK ₁ -1							
1	21,0±8,1	2,4±0,6	3,5±0,4	8,1±1,0	77,2±4,6	48,1±2,6	3,8±0,6
2	8,8±6,7	6,1±0,9	21,6±2,7	4,5±0,3	63,6±3,4	54,9±3,3	9,7±0,8
OK ₃ -1							
1	17,8±1,5	3,5±0,9	4,0±0,3	11,0±1,7	128,5±9,2	90,1±6,4	4,2±0,7
2	9,1±0,8	10,4±0,8	36,5±1,9	5,9±0,6	76,8±4,2	75,6±4,5	12,8±1,0
OK ₃ -2							
1	27,4±2,3	5,6±1,5	7,2±0,6	11,8±1,4	148,8±8,9	128,8±7,1	5,2±0,8
2	11,7±0,9	18,7±1,8	64,0±4,0	9,7±0,9	90,8±4,6	96,7±4,7	16,1±1,2

Примечание. OK₃-1 — хорошо окультуренная почва без внесения удобрений.

климатических условий характерно и свое оптимальное сочетание процессов окисления и восстановления.

С нашей точки зрения, важным является не только баланс вещества, но также баланс энергии и информации в агрофитоценозе. Эти составляющие взаимосвязаны и определяют трансформацию, миграцию и аккумуляцию друг друга. Накопление энергии в почве определяет возможность протекания в ней реакций с затратой тепла, образования более энергоемких органических соединений и вторичных минералов, создание условий для микробиологической активности почв.

Расчет баланса энергии в почве важен для выбора культур и систем земледелия (табл. 3).

С энергетической точки зрения, на конкретных почвах более пред-

почтительно выращивать те культуры, которые больше энергии аккумулируют в урожае и оставляют в почве с пожнивными остатками. Для изучаемых дерново-подзолистых почв Московской обл. с энергетической точки зрения более выгодно выращивание на слабоокультуренных почвах многолетних трав, а на хорошо окультуренных почвах — пшеницы. Предлагается учитывать данный показатель при выборе оптимальных систем земледелия.

Важным элементом баланса являются оптимальные взаимосвязи между свойствами почв. Изменение в неблагоприятную сторону структурных взаимосвязей между свойствами почв, а также между процессами и режимами приводит к снижению эффективности использования систем земледелия.

Таблица 3

Энергетическая эффективность выращивания озимой пшеницы и многолетних трав на дерново-подзолистых почвах разного уровня плодородия

Уровень плодородия	Культура	Отчуждение с урожаем, ккал/га	Поступление в почву, ккал/га
OK ₁	Пшеница	10632000	6804000
	Травы 1-го г. п.	24144000	20760000
OK ₃	Пшеница	55237000	Одинаковое количество
	Травы 1-го г. п.	44344000	

Выводы

1. Повышение урожая с.-х. культур, прогрессивное развитие почв и других компонентов экологической системы могут быть достигнуты только при балансе различных свойств почв, протекающих в них процессов и режимов.

2. Наряду с общепринятыми статьями баланса существенный вклад в баланс биофильных элементов в почвах вносят отчуждение их сорняками, возврат в почву с послеуборочными остатками, испарение элементов из почв, транспирация их из растений, прижизненные выделения растений, развитие дернового процесса почвообразования и потребление растениями элементов из нижних горизонтов почв, переход элементов под влиянием развития растений и пожнивных остатков из валовых форм в подвижное состояние.

3. При проведении балансовых расчетов целесообразно учитывать возобновляющую способность почв и их буферную емкость.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гехаев Т.Я. Миграция ионов из почвы и растений в атмосферу. Автореф. канд. дисс. М.: ТСХА, 1984. — 2. Гущина Е.О. Использование кормовой свеклой аммонийного и нитратного азота из разных слоев дерново-подзолистой почвы. Автореф. канд. дисс. М., МСХА, 1999. — 3. Жуков Ю.П., Филиппова А.Л. Прогнозируемые и фактические изменения агрохимических показателей дерново-подзолистой почвы при использовании расчетных систем удобрений в сочетании с 2,4-Д и ретардантами // Изв. ТСХА, 1985. Вып. 5. С. 68–73. — 4. Кобзаренко В.И. Фосфатный режим дерново-подзолистых

почв // Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии. М.: МСХА, 2004. С. 210–221. 5. Кобзаренко В.И. Ресурсы фосфора и калия дерново-подзолистой почвы // Агрохимия, 1999. № 10. С. 12–23. — 6. Ладонин В.Ф., Козлов Ф.П., Конова А.М. Конкурентные взаимоотношения в агрофитоценозах зерно-льно-пропашного севооборота в сфере потребления питательных веществ при различных уровнях применения удобрений и системах защиты растений // Вопросы известкования почв. М.: ВИУА, 2002. С. 232–238. — 7. Макарова Т.И. Биологический круговорот элементов под полевыми культурами на дерново-подзолистой почве. Автореф. канд. дисс. М.: ТСХА, 1971. — 8. Панов Н.П., Стратанович М.В., Замараев А.Г., Хрипунова Г.Л. Биологическая активность дерново-подзолистой суглинистой почвы и продуктивность озимой пшеницы на фоне применения удобрений // Вестник с.-х. науки, 1984. № 10. С. 120–127. — 9. Савич В.И., Кауричев И.С., Шишов Л.Л. и др. Окислительно-восстановительные процессы в почвах, агрономическая оценка и регулирование. Костанай, 1999. — 10. Савич В.И., Парахин Н.В., Степанова Л.П. и др. Агрономическая оценка гумусового состояния почв. Орел, ОГАУ, 2001. Т. 1, 2. — 11. Савич В.И., Парахин Н.В., Сычев В.Г. и др. Почвенная экология. Орел, ОГАУ, 2002. — 12. Савич В.И., Амергузин Х.А., Карманов И.И. и др. Оценка гочв, Астана, 2003. — 13. Сычев В.Г. Основные ресурсы урожайности с.-х. культур и их взаимосвязь, М.: ЦИНАО, 2003. — 14. Шатилов И.С., Замараев А.Г., Духаннин Ю.А. и др. Энергомассообмен в звене полевого севооборота. Ч. 1, М.: Агроконсалт, 2004.

Статья поступила
8 августа 2005 г.

SUMMARY

Matter, energy and information balance has been considered in the article in soil-plant system of turf-podzol soil 7-field-crop rotation. Considerable role of biophilic elements' balance is shown, their storage in arable layer due to the development of turf process and an increase of its mobility in soil when applying fertilizers, meliorants and under the influence of plants grown. The necessity to reach various soil properties balance was proven, processes and regimes, structural inter-relations between soil properties also taken into account.