УДК 631.41

Проблемы агроэкологической оценки плодородия почв*Савич В.И.¹, Белопухов С.Л.¹, Седых В.А.², Балабко П.Н.³, Гукалов В.В.⁴**¹РГАУ-МСХА им. К.А.Тимирязева**²ФКУ НИИ ФСИН РФ**³МГУ им. М.В.Ломоносова**⁴Северо-Кубанская с/х опытная станция***Аннотация**

В работе доказывается необходимость уточнения агроэкологической оценки почв с учетом миграции веществ, необменного закрепления почвой биофильных элементов, взаимосвязей между свойствами почв, интенсивности и скорости протекающих почвообразовательных процессов, проявления закона убывающего плодородия.

Показано, что на хорошо окультуренных дерново-подзолистых почвах Московской области потери элементов с верховодкой и грунтовыми водами составляли в среднем по севообороту 19,3 и 6,9 кг/га N-NO₃, 0,7 и 1,2 N-NH₄. Потери с поверхностно-стоковыми водами составляли: азота – 2,2 кг/га, калия – 7,0; кальция – 11,0; магния – 6,0; фосфора – 0,9 кг/га в год. При отношении Ca/K в почвенном растворе этой почвы 0,44±0,03 и 2,7±0,1 содержание водорастворимого железа составляло, соответственно, 57,9±7,4 и 5,3±0,7 мг/л; марганца – 2,3±0,4 и 1,1±0,2 мг/л.

Показано, что растения потребляют биофильные элементы из разных горизонтов почв, что необходимо учитывать в балансе биофильных элементов.

Показано, что оптимальные свойства почв отличаются в зависимости от гидротермических условий территории, сочетания свойств почв. Доказывается, что для выбора оптимальных культур для выращивания на определенных почвах следует учитывать отчуждение энергии с урожаем.

Ключевые слова: ПОЧВА, ПЛОДОРОДИЕ, УДОБРЕНИЯ, БАЛАНС, ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ

Объекты исследования

Объектами исследования выбраны дерново-подзолистые среднесуглинистые почвы Московской области на покровных суглинках разной степени окультуренности [1] и обыкновенные глинистые черноземы Краснодарского края [2, 3].

Методика исследования состояла в определении агрохимических и физико-химических свойств принятыми в агрохимической службе методами [2, 4, 5, 6], в оценке миграции ионов по профилю и в грунтовые воды [1], в оценке биофильных элементов в испарениях из почв и в продуктах транспирации растений [2, 7], в определении урожая с/х культур в длительных полевых опытах [1, 3], в оценке накопления энергии в почве и в урожае [1, 3, 8], в расчете взаимосвязей свойств почв [5, 9], в оценке баланса NPK в системе почва-растение [10]. Принятый уровень вероятности $P = 0,95$.

Цели и задачи (проблемы настоящего, проблемы будущего)

Сельскохозяйственное использование почв определяет продовольственную безопасность России и в то же время экологическое состояние территорий и критерии будущего состояния Земли и существования человечества. При этом большое значение имеет экономическая эффективность ведения сельскохозяйственного производства. Выбор систем севооборотов, способов обработки почв, параметров систем удобрений и интегрированной защиты растений определяется не только гидротермическими условиями территории, но и генезисом, плодородием, эволюцией используемых в сельском хозяйстве почв (типов, подтипов, родов, видов, разновидностей и разрядов в классификационной принадлежности почв).

Однако эти параметры, за исключением типов почв и иногда их гранулометрического состава, практически не учитываются при разработке оптимальных компонентов систем земледелия. В балансе биофильных элементов в системе почва-растение практически не учитываются процессы взаимодействия удобрений и мелиорантов с почвами, взаимосвязи свойств почв. Это существенно снижает эффективность ведения сельскохозяйственного производства [11, 12].

Целью исследования является иллюстрация процессов, протекающих в почвах при применении удобрений и мелиорантов. В задачи исследования входило доказательство необходимости при применении удобрений учета их закрепления почвой, миграции в водную и воздушную среды, учета взаимосвязей свойств почв.

В мире и, в частности, в России выделяется большое разнообразие почв от глинистых до песчаных, с содержанием гумуса от 0,5 до 12 %, с рН среды от 2,5 до 11, с Eh от 200 до 750 мВ, с емкостью поглощения катионов от 5 до 50 мг-экв/100 г почв, с малой и большой емкостью поглощения анионов, с плотностью почв от 0,7 до 1,9 г/см³, с мощностью гумусового слоя от 5 до 70-90 см, с содержанием углекислого газа в почвенном воздухе от 1 до 10-15 %, без наличия и с наличием в почве сероводорода, метана и т.д.

По своим свойствам существенно отличаются и почвы разного характера и степени загрязнения, в т.ч. тяжелыми металлами. Существенно отличаются по свойствам почвы плато, склонов и депрессий, склонов разной крутизны и экспозиции, пойменные почвы рек и водоразделов, почвы болот и территорий нормального увлажнения и т.д.

Очевидно, что для разных почв необходимо подбирать свои способы и приемы сельскохозяйственного использования. Правильно подобранные цели и способы сельскохозяйственного использования почв определяют экономическую эффективность и экологическую целесообразность их использования. Неправильное использование ведет к деградации почв и, в конечном итоге, к росту социальной напряженности.

Почвенный покров территории и структура почвенного покрова определяют состав севооборотов, чередование культур, способы обработки почв, дозы и состав минеральных и органических удобрений, дозы и состав средств защиты растений. Сочетание правильно подобранных компонентов систем земледелия определяет урожаи с/х культур, экономическую целесообразность проводимых мероприятий и их экологическую обоснованность.

С нашей точки зрения, необходимо учитывать влияние факторов почвообразования, свойств, процессов и режимов почв на выбор пути их сельскохозяйственного использования (системы земледелия, системы обработки, удобрений, интегрированной защиты растений).

Экспериментальная часть

1. Баланс биофильных элементов в системе почва-растение

Плодородие почв и урожай с/х культур

При расчете доз удобрений под планируемый урожай чаще учитывают только вынос элементов с товарной частью продукции (культурой или всеми культурами в

севообороте) и обобщенные эмпирические коэффициенты [13].

В отдельных методиках принимают во внимание и показатели обобщенного содержания в почвах подвижных форм элементов питания [14, 15], и дозы удобрений, необходимые для изменения NPK на 1 мг/100 г почв [4]. В то же время не принимается в расчет содержание биофильных элементов не только в Ап, но и в подпахотных слоях, миграция удобрений за пределы пахотного слоя, испарение их из почв и с продуктами транспирации из растений, необменное закрепление почвой и т.д. [6, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23].

Вносимые в почву удобрения частично необменно закрепляются в почве. Этот процесс ярче выражен в почвах более тяжелого гранулометрического состава, при значительной доле минералов типа 2:2 и 2:1 с разбухающим межпакетным пространством. Это частично учитывается в показателях затрат NPK удобрений, вносимых в почву для изменения содержания их подвижных форм на 1 единицу [1].

В то же время Аристархов А.Н. [4] указывает, что для изменения содержания подвижных форм биофильных элементов на 1 мг/100 г почв требуется разное количество удобрений как в разных типах почв, в почвах разного гранулометрического состава, так и в разных интервалах содержания этих элементов в почвах.

По данным автора, при внесении 100 кг/га K_2O для изменения содержания обменного калия на 1 мг/100 г почв требуется внесение в почву от 9 до 30 мг/100 г K_2O . Для изменения содержания подвижного фосфора на 10 мг/кг почв требуется внести на среднесуглинистых почвах в зависимости от pH среды до 110 кг P_2O_5 на 1 га. Эта величина была выше на почвах более тяжелого гранулометрического состава и при более низких значениях pH.

Значительные потери элементов происходят с миграцией.

По нашим данным, в слабоокультуренной подзолистой почве в Московской области миграция элементов из почв с инфильтрацией и стоком составляла: азота – до 7 кг/га в год, калия – до 9; кальция – до 40; магния – до 20 кг/га в год. В окультуренной почве потери составляли, соответственно, N – 20 кг/га, K – 11, Ca – 50, Mg – 40, P – 1 кг/га в год.

При этом потери элементов питания из почв отличались для поверхностных вод, с верховодкой и для грунтовых вод. По полученным нами данным [1], на дерново-

подзолистых среднесуглинистых хорошо окультуренных почвах Подмосковья потери с поверхностно-стоковыми водами составляли: азота – 2,2 кг/га; калия – 7,0; кальция – 11,0; магния – 6,0 и фосфора – 0,9 кг/га.

По полученным нами данным, на хорошо окультуренных дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах с верховодкой и грунтовыми водами выносилось в среднем по севообороту 19,3 и 6,9 кг/га N-NO₃; 0,7 и 1,2 N-NH₄. В то же время, при дождевании потери биофильных элементов с поверхностным стоком на дерново-подзолистых среднесуглинистых почвах при склоне 4° составляли, в зависимости от обработки: фосфора – 0,7–2,5 кг/га, калия – 2,3–5,9; кальция – 4,6–18,8 кг/га [5].

По данным Сычева В.Г. [12, 24], потери элементов питания за счет эрозии и вымывания для почв Нечерноземной зоны составляли по азоту 21–31 %, калию – 12–17 %, по фосфору – 2%.

Значительные потери биофильных элементов происходят в почвах весной при неоттаявшем подпахотном слое. Даже при уклоне 0,008° выносилось в % от внесенного осенью количества 40–70 % калия, 30–40 % кальция, до 100% азота аммиачной селитры [2, 25].

По данным Смирнова А.П. [26], в среднем за 5 лет потери питательных веществ из профиля дерново-подзолистой почвы при внесении N₁₁₀P₁₁₅K₁₅₀ на глубине 0,5 м составляли: по N – 21, K₂O – 15, CaO – 47, MgO – 8 кг/га в год. В исследованиях Кидина В.В. [20] установлено, что потери азота удобрений из почвы при внесении одинарной дозы составляли 17–30 %, удвоение дозы удобрений приводило к увеличению потери азота до 42–49 %.

Выделение почвами элементов в воздушную среду с испарениями составляло по отдельным элементам от 0,4 до 10 % от количества ионов, содержащихся в урожае. Из почв наблюдалось и значительное выделение CO₂ (от 20 до 50 кг/га) и аммиака.

Потери катионов растениями с транспирацией составляли от 0,5 до 10 % от количества катионов, содержащихся в урожае [7]. При этом общие потери за сутки достигали 62,5 г/га. Потери катионов с транспирацией из растений и с испарениями из почв составляли: K – 0,8%, Na – 16,4%, Ca – 10,0%, Mg – 19,4% от количества катионов, содержащихся в урожае [10].

Ладонин В.Ф. [27] отмечает необходимость учета в балансе биофильных элементов

в почвах вынос их с сорняками. Как показали исследования автора, нерациональное потребление основных макроэлементов сорняками увеличивает затраты на основную культуру на 30 - 35%.

В то же время выделяется и ряд положительных статей баланса биофильных элементов в системе почва-растение. Часть элементов при выращивании с/х культур переходит в почве из необменного в обменное (подвижное) состояние. Так, по данным Кобзаренко В.И., за 12 лет вегетационного опыта на истощение величина выноса P_2O_5 растениями превышала содержание его подвижных форм в 2-3 раза [22].

В баланс биофильных элементов в системе почва-растение вносят поправки процессы поглощения элементов почвой из воздушной среды. По полученным нами данным, поступление элементов в почву с дождевыми осадками составляло на дерново-подзолистых почвах Московской области в среднем по севообороту: азота – 9,5 кг/га в год, фосфора – 0,2; калия – 4,5; кальция – 12, магния – 17 кг/га в год. Величина pH осадков была равна 6,0–6,8.

По полученным нами данным, одной из статей баланса биофильных элементов в системе почва-растение является поглощение почвами и растениями элементов из воздушной среды. Так, листья кукурузы поглощали до 6,7 кг/га аммиака за вегетацию.

По полученным нами данным [1], поглощение атмосферного аммиака растениями озимой пшеницы в течение вегетационного периода в дерново-подзолистой среднесуглинистой почве в варианте абсолютного контроля составляло 0,01–0,15 кг/га в день, в варианте с внесением удобрений на использование растениями 2% ФАР – от 0,11 до 0,43 кг/га в день. Установлена прямая корреляционная зависимость между интенсивностью поглощения аммиака растениями из атмосферного воздуха и величиной приходящей ФАР.

В то же время растения выделяют элементы в почву. По полученным нами данным, поступление углерода в дерново-подзолистую 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.

Большую роль в балансе биофильных элементов в почвах имеет и развитие микрофлоры. При ежегодной 40% минерализации пожнивных остатков ассимиляция азота атмосферы свободно живущими микроорганизмами на полях зерновых и картофеля

составляла 23–38 кг/га, на низкоплодородной почве – 12-14 кг/га, за счет пожнивных остатков многолетних трав – до 76 кг/га [9].

Растения потребляют элементы питания в определенном соотношении. Так, по данным Кулаковской Т.Н. [28], соотношение $N : P_2O_5 : K_2O : CaO : MgO$ составляет у зерновых 2,4 : 1 : 2 : 0,3 : 0,2; у картофеля – 4,0 : 1,0 : 5 : 1 : 0,6. Очевидно, что такие различия необходимо учитывать и при расчете доз и соотношения удобрений в севообороте. Порядок чередования культур в севообороте также является одним из факторов, влияющих на баланс биофильных элементов в системе почва-растение.

2. Взаимосвязи свойств почв как критерий расчета доз удобрений и мелиорантов

Оптимальное содержание биофильных элементов в почвах для получения планируемого урожая и дозы удобрений определяются как взаимосвязями между свойствами почв, так и проявлением отрицательного действия на почву и растения несбалансированного применения удобрений.

Большое значение при выборе оптимального характера использования земель имеет оценка взаимосвязей между свойствами почв, проявления между ними синергизма и антагонизма. Так, с увеличением pH от 4,5 до 7,0 увеличивается содержание подвижных и водорастворимых фосфатов, но при $pH > 8,0-9,0$ образуются 3-замещенные фосфаты кальция, и содержание водорастворимых фосфатов уменьшается. При нейтрализации pH уменьшается содержание водорастворимых и подвижных форм Fe, Mn, Al, однако при $pH > 9,0$ образуются гидроксидные комплексы Fe, Mn, Al типа $Al(OH)_5^{2-}$, и содержание водорастворимого Al снова возрастает.

При кислых значениях pH происходит протонирование комплексных соединений, при щелочных значениях pH протекает процесс разрушения комплексов за счет эффекта гидратообразования. И то, и другое приводит к изменению подвижности поливалентных катионов, а также кальция и магния в почвах [5, 9].

Так, по полученным нами данным, применение высоких доз $(NH_4)_2SO_4$ на дерново-подзолистой почве привело к изменению S от 17,8 до 14,0; Нг – от 0,3 до 0,8 мг-экв/100 г, pH_{KCl} – от 6,7 до 5,6. Применение высоких доз этого удобрения на черноземах в течение многих лет привело к снижению pH с 7,0 до 4,8. 30-летнее внесение $NH_4NO_3 + KCl$ на известкованную дерново-подзолистую почву привело к снижению pH до 3,2, увеличению

обменного алюминия до 1,8 мг/100 г почв.

Диспергирование почв и разрушение минералов могут быть вызваны также Na^+ , K^+ , NH_4^+ при их содержании в ППК более 10% от емкости поглощения. При промывном типе водного режима это приведет и к выщелачиванию почв.

При расчете доз удобрений под планируемый урожай не учитываются взаимосвязи свойств почв. Так, избыточное содержание фосфатов приводит к связыванию марганца, цинка в недоступные для растений формы. По полученным нами данным, при содержании гумуса 1,2% и P_2O_5 в 0,2н НС1 $4,8 \pm 1,5$ мг/100 г и $24,5 \pm 1,8$ мг/100 г содержание марганца в почвенном растворе в $\text{м/л} \cdot 10^{-5}$ составляло, соответственно, $0,3 \pm 0,2$ и $0,03 \pm 0,03$.

Все свойства почв взаимосвязаны. По полученным нами данным, при соотношении Са : К в почвенном растворе дерново-подзолистой почвы $0,44 \pm 0,03$ и $2,7 \pm 0,1$ содержание водорастворимого железа составляло $57,9 \pm 7,4$ и $5,3 \pm 0,7$; содержание водорастворимого марганца, соответственно, $2,3 \pm 0,4$ и $1,1 \pm 0,2$ мг/л [9].

В ряде стран при разработке градаций содержания подвижных форм элементов в почвах учитывают соотношение элементов, содержание элементов в % от емкости поглощения почв при разных рН среды, в зависимости от степени гумусированности, гранулометрического состава и т.д.

Аналогичные подходы применяются и в России. Так, по данным Прокошева В. [29], средняя обеспеченность почв подвижным калием в вытяжке 0,2н НС1 составляет для песчаных почв 8–12 мг/100 г; для среднесуглинистых – 10–15; для тяжелосуглинистых – 12–17 мг/100 г почв. Оптимальное содержание обменного калия, по данным Шаймухаметова Ш.Ш. [30], составляет 14–16 мг/100 г, в % от емкости поглощения – 5–10 %; для тяжелосуглинистых – 22–25 мг/кг и в % от емкости поглощения – 1,2–1,8 %.

Для субтропических почв хороший уровень обеспеченности почв подвижным калием (при экстракции $\text{CH}_3\text{COONH}_4$ с рН = 7,0) при емкости обмена катионов < 5 мг-экв/100 г составляет 0,1–0,15 мг-экв/100 г, а при емкости обмена > 10 мг-экв/100 г составляет 0,4–0,8 мг-экв/100 г.

Градации обеспеченности почв элементами питания зависят от соотношения катионов. Так, для оценки обеспеченности почв Са соотношение Са : К должно быть > 3,3; для оценки обеспеченности почв калием К : Са > 0,3. Для оценки обеспеченности почв калием отношение подвижных форм К/Мг для пшеницы должно быть > 0,2; отношение

$Mg/K < 0,5$. При этом эти показатели также зависят от емкости поглощения почв.

Оптимальные значения показателей отличаются не только для отдельных почв, но и для различных севооборотов [13, 14]. Так, по данным Артюшина А.М. и Дерюгина И.П. [31], в супесчаных почвах и в глинистых оптимальное содержание рН составляет в кормовом севообороте 5,5 и 6,9; $V\%$ – 70 и 85 %. В культурных пастбищах со злаковым травостоем в супесчаной почве $pH = 5,2$, $V\% = 70$; в тяжелосуглинистой почве $pH = 5,6$; $V\% = 80$ [32].

3. Регулирование интенсивности и скорости изменения свойств почв, протекающих в почвах процессов и режимов

Применяя минеральные удобрения и мелиоранты для оптимизации свойств почв при выращивании с/х культур, прогнозируют изменение определенных свойств, но не учитывают изменение взаимосвязей между свойствами почв и тем более протекающие в почвах процессы и режимы. В то же время эти параметры в большей степени определяют плодородие почв, чем изменение отдельных свойств.

Большое значение для оценки эффективного плодородия почв имеет скорость перехода ионов из почвы в раствор и скорость их поглощения растениями, депонирующая способность почв (содержание подвижных форм изучаемых элементов в твердой фазе почв, а не только в растворе десорбента). Этот показатель выше в почвах более тяжелого гранулометрического состава, в почвах более гумусированных, с увеличением доли в минералогическом составе почв минералов типа монтмориллонита.

Следует учитывать, что содержание ионов в почвенном растворе и в растворе десорбента определяется эффективной растворимостью их осадков, эффективными константами нестойкости их комплексов и эффективными константами ионного обмена в твердой фазе (в ППК). Эти показатели не всегда коррелируют с содержанием ионов в растворе десорбента.

Растения потребляют элементы питания из разных горизонтов почв и частично возмещают недостаток биофильных элементов за счет пожнивных и корневых остатков растений. Это иллюстрируют данные, полученные нами для кальция в полевом севообороте на дерново-подзолистых почвах (табл. 1).

С нашей точки зрения, эти показатели необходимо учитывать при расчете доз удобрений под планируемый урожай.

Таблица 1. Отчуждение Са с товарной продукцией и его поступление в почву с пожнивными остатками, кг/га

Вариант	Картофель		Травы 2-го года	
	отчуждение	возврат	отчуждение	возврат
ДП ₂ ОК ₁	3,5±0,4	21,6±2,7	48,1±2,6	54,9±3,3
ДП ₂ ОК ₃ + НРК	7,2±0,6	64,4±4,0	128,8±7,1	96,7±4,7

Температура и влажность почв, ионная сила почвенных растворов, рН, Eh влияют на рСО₂, рО₂, рН₂S и т.д. Это обуславливает изменение эффективной растворимости осадков, изменение эффективных констант ионного обмена в ППК, изменение эффективных констант устойчивости имеющихся в почве комплексов, состояние растений и микрофлоры.

Существенно изменяются свойства почв и в зависимости от интенсивности и скорости протекания в почвах почвообразовательных процессов, в частности, оглеения.

Полученные нами данные свидетельствуют о том, что в автоморфной дерново-подзолистой почве содержание подвижных форм железа (в вытяжке СН₃COONH₄ с рН = 4,8) составляло в А₂, А₂В+В, соответственно, 7,7±1,3 и 7,0±1,9; марганца – 0,9±0,2 и 0,7±0,1 мг/л. В оглеенной почве содержание железа в А₂ и А₂В+В составляло, соответственно, 40,2±26,2 и 30,3±14,9; а марганца – 3,6±0,3 и 0,2±0,7 мг/л.

С нашей точки зрения, необходима оценка взаимосвязей факторов почвообразования и свойств почв, алгоритмов взаимосвязей интенсивности и скорости протекающих в почвах процессов и режимов; алгоритмов взаимосвязей транспирации, миграции и аккумуляции вещества, энергии и информации. Это дает возможность найти оптимальные пути регулирования свойств, процессов и режимов, протекающих в почвах.

4. Последовательность изменения свойств почв как критерий повышения их плодородия

Внесение в почвы удобрений и мелиорантов изменяет свойства почв. Эти изменения зависят от доз вносимых соединений. Однако эффект зависит и от очередности внесения. Так, внесение органических удобрений в кислые дерново-подзолистые почвы блокирует железо, марганец, алюминий в ППК, и внесенные в дальнейшем в почвы фосфорные удобрения закрепляются менее прочно и становятся более доступными для растений. Внесение в почвы сначала фосфорных удобрений, а затем органических часто приводит к противоположному эффекту.

Содержание подвижных форм биофильных элементов в почвах, как и другие свойства почв, изменяется во времени и в пространстве. Изменения в сезонной динамике связаны с изменением солнечной радиации, влажности, температуры, pCO_2 , с разложением растительного опада, развитием микрофлоры. Изменение свойств в пространстве обусловлено мезо- и микрорельефом поверхности, сменой пород, уровня грунтовых вод, глубиной отдельных горизонтов и т.д.

В сезонной динамике и при изменении гидротермических условий изменяются и процессы поглощения растениями элементов и их выделение с транспирацией и корневыми экзаметаболитами. Все эти процессы приводят к значительному варьированию свойств почв в пределах поля, к проявлению эффектов асимметрии и эксцесса в закономерностях пространственного распределения свойств почв в пределах поля. Взятие смешанного образца при содержании в одной пробе 5 мг P_2O_5 на 100 г и 25 мг/100 г приводит к усреднению данных, но к неравномерному содержанию фосфатов на отдельных участках поля при внесении фосфорных удобрений.

В ряде случаев пахотный слой отличается существенно по pH от нижележащих слоев, и для них требуются разные методы определения, например, P_2O_5 . По полученным нами данным, pH горизонта Ап каштановых почв 6,0-6,5, а горизонт Вк – 8,2. Применение разных методов определения подвижных форм P_2O_5 в этих горизонтах осложняет и интерпретацию данных.

5. Трансформация, миграция, аккумуляция вещества, энергии и информации в системе почва-растение

При внесении удобрений и мелиорантов в почву происходит трансформация, миграция и аккумуляция в почвах не только вещества, но также энергии и информации. Однако на практике учитывается только изменение количества подвижных форм внесенного вещества [27, 28].

Почвы характеризуются свойствами, процессами и режимами. Выделяют физико-химические, водно-физические, механические, агрохимические свойства почв. Это pH, окислительно-восстановительный потенциал, содержание подвижных форм элементов питания, NPK и т.д. Различают процессы, протекающие в почве, и почвообразовательные процессы. К почвенным процессам относится изменение свойств почв при внесении удобрений, мелиорантов, при загрязнении и т.д. К почвообразовательным процессам

относятся такие, которые приводят к формированию новых типов почв в результате многолетней эволюции почв. В последнее время доказывается, что такой переход происходит в виде фракталов – скачка сочетания свойств почв на новый уровень при достижении критических значений. Почвенные режимы определяются изменением свойств и процессов почв во времени и в пространстве. Это водный, тепловой, кислотно-основной, фосфатный и другие режимы.

Почвы выполняют несколько экологических функций, и для выполнения каждой функции оптимально свое сочетание свойств почв. Оптимальное сочетание свойств, процессов и режимов почв для получения максимального урожая с/х культур, оправданного с экологической и экономической точек зрения, определяет модель плодородия почв. Для разных типов почв и уровней интенсификации производства модели плодородия почв свои. Так, нерентабельно изменять содержание гумуса в дерново-подзолистых почвах Московской области до 7–8 %, как в черноземах. Нереально из песчаной почвы сделать глинистую и т.д. Модели плодородия почв отличаются для орошаемых и осушаемых почв, почв без орошения, для урожая 20 ц/га и 120 ц/га зерновых и т.д.

Для оптимального обеспечения растений элементами питания, поглощаемыми из почв, необходимо и оптимальное содержание и соотношение элементов в почвах. Избыток любого элемента вреден. Так, при избытке доз навоза содержание подвижных фосфатов в почве уменьшается, в связи с их блокировкой пленками органического вещества.

Однако процессы взаимодействия удобрений с почвами практически не изучены. В течение года в почве постоянно происходит миграция вещества, энергии и информации по почвенному профилю в вертикальном и горизонтальном направлениях. Это относится и к содержанию подвижных и водорастворимых форм биофильных элементов. Указанные процессы осложняют интерпретацию данных определения подвижных форм элементов питания в сухих образцах и в пределах поля с учетом коэффициентов варьирования, коэффициентов асимметрии и эксцесса распределения NPK по полю.

Корни растений в течение вегетации проникают все глубже в почву и используют NPK не только из пахотного горизонта. При этом в разные периоды жизни растения используют в большей степени разные питательные вещества: азот – весной, фосфор,

калий – летом. Летом при пересыхании верхнего слоя использование из него биофильных элементов затруднено.

По данным, полученным в Тимирязевской академии Кобзаренко В.И. и Кидиным В.В. с аспирантами, растения эффективно используют биофильные элементы из подпахотных слоев, что необходимо учитывать при расчете баланса N, P, K в системе почва-растение и при расчете доз удобрений [19, 20, 21, 22].

В работе Ильюк Е.Н., выполненной под руководством Кидина В.В. [18], показано, что на дерново-подзолистой почве наиболее доступным для кукурузы был азот удобрений из подпахотного горизонта. Коэффициент использования аммиачного азота из слоя 20–40 см составлял 48–53 %, нитратного – 44–49 %. Использование азота из слоя 0–20 см было на 5–7 % ниже.

Однако коэффициенты использования минерального азота почвы были в 2–5 раз ниже из подпахотных слоев, чем из пахотного, и составляли из слоя 10–60 см – 20–26 %; из слоя 60–80 см – 7–12 % от исходного его содержания перед посевом. При этом иммобилизация аммонийного азота составляла в пахотном слое 43–46 %, нитратного – 27–34 %, снижаясь в подпахотных слоях.

В работе Бельдяевой К.Ю. [21], выполненной под руководством Кидина В.В., показано, что овес и ячмень использовали фосфор и калий из подпахотных слоев дерново-подзолистых почв. По мере повышения окультуренности почв усвояемость овсом фосфора и калия из подпахотного слоя увеличивалась, соответственно, на 25% и 38%, а из горизонта В потребление калия овсом увеличивалось на 56%. Коэффициенты использования овсом фосфора и калия из пахотного горизонта составляли 8,6 и 28,2 %, соответственно, из горизонта A₁A₂ – 7,7 и 22,1 %, из горизонта В – 5,4 и 12,9 %.

Отмечается, что проводить почвенную диагностику только по содержанию минерального азота в пахотном слое недостаточно. Необходимо учитывать азот подпахотных слоев почв.

6. Оценка оптимальных свойств почв как критерий расчета доз удобрений и мелиорантов под планируемый урожай

С нашей точки зрения, оптимальные свойства почв отличаются в зависимости от гидротермических условий территории, генезиса почв, сочетания свойств, процессов и режимов почв, для отдельных культур, сортов, севооборотов, в зависимости от

планируемой урожайности и уровня интенсификации с/х производства. При этом оптимумы сочетания свойств почв отличаются для почв на разных элементах рельефа, в зависимости от структуры почвенного покрова. Они отличаются и для разных горизонтов почв.

Рассматривая давний спор, что важнее: структура почв, гумус, водно-физические, физико-химические или агрохимические свойства почв, – следует отметить, что для жизни любого биологического объекта необходимы и биофильные элементы, и воздух, и вода, и приток в систему вещества, энергии и информации. Бессмысленно противопоставлять задачи создания оптимальной структуры почв, гумусового состояния или высокого (достаточного) содержания в почве биофильных элементов.

Оптимальные свойства почв отличаются в зависимости от задач прогрессивного развития плодородия почв, получения высоких урожаев с/х культур хорошего качества, оптимизации состава микрофлоры, оптимизации состояния других компонентов экологической системы. Получение высоких урожаев с/х культур в ущерб экологической обстановке в биогеоценозах в будущем будет запрещено.

Согласно полученным нами экспериментальным данным, при оценке доз удобрений и мелиорантов, вносимых в почву, следует учитывать следующее: 1) зависимость оптимальных свойств почв от гидротермических условий территории; 2) зависимость оптимальных свойств почв от сочетания их показателей; 3) зависимость оптимальных свойств почв для отдельных типов почв и более мелких таксономических единиц; 4) зависимость оптимальных свойств почв от планируемого урожая с/х культур; 5) зависимость оптимальных свойств почв для отдельных видов и сортов с/х культур; 6) зависимость оптимальных свойств почв от уровня оптимизации всех компонентов систем земледелия; 7) отличие оптимальных свойств почв для разных почвообразующих пород.

При этом очевидно, что оптимум для одних свойств, процессов и режимов почв не соответствует оптимумам для других свойств, процессов и режимов. Оптимизация рН не всегда способствует оптимизации окислительно-восстановительного состояния почв, развитию определенных групп микрофлоры, определенным процессам ионного обмена и комплексообразования и т.д. [32].

По полученным нами данным, для оптимизации свойств, процессов и режимов почв как средства сельскохозяйственного производства необходимо дополнительно

оптимизировать кинетику процессов, депонирующую способность почв, буферную емкость и буферность почв, миграционные процессы, учитывая синергизм и антагонизм взаимовлияния отдельных свойств почв, проявление закона убывающей отдачи, экономическую и экологическую целесообразность оптимизации. Следует отметить, что оптимизация свойств для эволюции почв не всегда совпадает с оптимумами для растений и микрофлоры.

7. Кормить почву или растения?

При разработке приемов повышения эффективности ведения сельскохозяйственного производства всегда возникала проблема: кормить почву или растения? Создание агроземов (например, таких почв, как на дачных участках) очень дорого и не оправдывается повышением урожайности на полях. Кормление только растений приводит к появлению скрытого отрицательного действия несбалансированного их применения и, как следствие, к ухудшению качества почв и сельскохозяйственной продукции. Еще Прянишников Д.Н. отмечал, что избыток удобрений не может компенсировать незнание взаимодействия удобрений с почвой.

С нашей точки зрения, необходимо «кормить» растения, но просчитывать все процессы взаимодействия вносимых продуктов с почвой, учитывая изменение взаимосвязей в почвах, изменение протекающих процессов и режимов. При этом растениям, почвам, микрофлоре необходимы в равной степени и NPK, и воздух, и вода, и определенная влажность почв.

Целесообразно выделение и приемов создания свойств почв, оптимальных для отдельных групп и композиций микрофлоры. При этом более эффективно регулирование и свойств почв, и протекающих в них процессов и режимов. Так, например, по полученным нами данным, внесение больших доз органических удобрений в зоне северной и средней тайги приводит не только к увеличению гумуса в Ап, но и к усилению и опусканию вниз подзолистого горизонта и горизонта оглеения. Это связано как с узким отношением $С_{гк}/С_{фк} < 0,7$, так и с усилением микробиологической активности почв в Ап.

При расчете доз удобрений под планируемый урожай необходимо учитывать процессы взаимодействия их с почвой и влияние на другие компоненты биогеоценозов, особенности взаимодействия с почвами отдельных культур и севооборотов и экономическую целесообразность.

8. Экономическая эффективность ведения сельскохозяйственного производства. Проявление закона убывающей отдачи.

Экологическая эффективность ведения с/х производства

При неоправданном увеличении доз вносимых удобрений проявляется закон убывающей отдачи: уменьшение дохода на 1 рубль затрат. Этот закон проявляется и при увеличении затрат на повышение плодородия почв. Однако, чем больше количество факторов жизни растений будет оптимизировано, тем этот закон будет проявляться в меньшей степени. Так, например, его проявление уменьшалось при внесении в почву и NPK, и гербицидов, и ретардантов [14] на почвах большой степени окультуренности [1] при правильном подборе чередования культур [2, 3].

Сычев В.Г., Шафран С.А., Духанина Т.М. [24] отмечают, что эффективность азотных удобрений зависит не только от содержания азота в почве и доз этих удобрений, но и от содержания в почве подвижных форм фосфора и калия. Так, по данным авторов, при содержании $N-NO_3 < 5$ мг/кг и 10,0 при внесении N – 30 и N – 90 прибавка урожая яровой пшеницы на обыкновенном черноземе составила 1,7 и 0,4 ц/га и 1,8 и 0,5 ц/га. При достаточном содержании в почвах фосфора и калия закон убывающей отдачи проявлялся при увеличении доз азотных удобрений в меньшей степени.

Развитие сельскохозяйственного производства определяет экологическое состояние биогеоценозов. Это выделение углекислого газа в воздушную среду из почв, сероводорода, метана, соединений азота. При избытке элементов в почвах в воздушную среду выделяются свинец, хром, цинк, кобальт, радиоактивные элементы и т.д. Применение средств защиты растений также сопровождается как выделением их из почв в водную и воздушную среды, так и поглощением растениями, значительными изменениями состава микрофлоры. Негативное влияние загрязнения на растения, деградация почв сопровождаются ускоренным развитием опустынивания, созданием деградированных ландшафтов и т.д.

С нашей точки зрения, большое агроэкологическое значение имеет энергетическая оценка плодородия почв [8]. Ее показатели зависят от уровня плодородия почв. Так, по полученным нами данным, накопление энергии в дерново-подзолистых почвах за 30-летний период их использования в 7-польном полевом севообороте составляло для слабой и высокой окультуренности + NPK, соответственно, гумуса млн ккал/га 195–210 и 284–

335. Поступление энергии в почву с послеуборочными остатками млн ккал/га при слабой окультуренности почв составляло 11,7, при повышенной окультуренности и внесении НРК на использование растениями 2% ФАР – 23,9–24,5. При этом энергоемкость почв, включая биоту, грибы, микро- и мезофауну, растительные остатки и гумус, составляла для слабоокультуренной почвы 352 млн ккал/га, для хорошо окультуренной – 517–563. Урожай озимой пшеницы составлял, соответственно, 16,2 и 37,8 ц/га.

Большее накопление энергии в гумусе и в микроорганизмах почв создает предпосылки и для выращивания более требовательных к плодородию культур. По полученным нами данным, на слабоокультуренной почве было более выгодно выращивание многолетних трав (отчуждение с урожаем составляло $24 \cdot 10^6$ ккал/га, с урожаем озимой пшеницы – $10 \cdot 10^6$ ккал/га, а на хорошо окультуренных почвах в урожае пшеницы накопление энергии составляло $55 \cdot 10^6$ ккал/га, в урожае трав – $44 \cdot 10^6$ ккал/га.

Появление неблагоприятного фактора деградации компонента экосистемы (У) пропорционально весу (степени влияния свойства, процесса, режима почв) (K_1) и интенсивности влияния этого фактора X_i и продолжительности его влияния t : $= \sum K_i X_i^t$. При этом между влиянием свойств почв на деградацию компонентов экосистемы проявляются эффекты синергизма и антагонизма.

Заключение

Агроэкологическая оценка плодородия почв определяет мероприятия по окультуриванию почв, повышению урожая с/х культур, повышению эффективности ведения с/х производства и мероприятия по оптимизации экологической обстановки. Однако в настоящее время дозы удобрений рассматриваются, в основном, по выносу биофильных элементов с урожаем. При этом не учитывается сорбция удобрений почвой, их миграция в грунтовые воды с транспирацией из растений и с испарениями из почв. Не учитываются взаимосвязи между свойствами почв, кинетика процессов, депонирующая способность почв, эффективная растворимость осадков, эффективные константы ионного обмена в системе почва-растение, эффективные константы устойчивости образующихся комплексов.

Существующие методы оценки содержания в почвах подвижных форм биофильных элементов были разработаны при планировании урожая зерновых 20–30 ц/га и не учитывают все многообразие почв и изменение взаимосвязей в системе почва-

растение при интенсификации с/х производства.

Недостаточная оценка реакций взаимодействия удобрений и мелиорантов с почвой и в системе почва-растение приводит к проявлению закона убывающей отдачи и к недостаточно высокой эффективности ведения с/х производства.

Список использованных источников

1. Замараев А.Г., Савич В.И., Сычев В.Г. Энергомассообмен в звене полевого севооборота, ч. 2. – М.: ВНИИА, 2005. – 336 с.
2. Гукалов В.В., Савич В.И. Интегральная оценка кислотно-основного и окислительно-восстановительного состояния почв таежно-лесной и лесостепной зон. – М.: РГАУ-МСХА, ООО «Плодородие», 2019. – 408 с.
3. Гукалов В.В., Баршадская С.И., Сорокин А.Е., Савич В.И. Изменение эффективности применения минеральных удобрений на черноземах и дерново-подзолистых почвах при неоправданном увеличении их доз // Международный с/х ж-л. – 2020. – №1. – С. 83-86.
4. Аристархов А.Н. Оптимизация питания растений и применения удобрений в агроэкосистемах. – М.: ЦИНАО, 2000. – 500 с.
5. Духанин Ю.А., Савич В.И., Замараев А.Г. Экологическая оценка взаимодействия удобрений и мелиорантов с почвой. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2005. – 324 с.
6. Шильников И.А., Сычев В.Г., Шеуджен А.Х. Потери элементов питания растений в агробиогеохимическом круговороте веществ и способы их минимизации. – М.: ВНИИА, 2012. – 351 с.
7. Савич В.И., Белопухов С.Л., Гукалов В.В. Агрономическая оценка продуктов испарений из почв и транспирации из растений // Вестник Казанского технологического ун-та. – 2015. – Т. 18. – №23. – С. 134.
8. Савич В.И., Сычев В.Г. и др. Энергетическая оценка плодородия почв. – М.: ВНИИА, 2007. – 478 с.
9. Духанин Ю.А., Савич В.И., Савич К.В. Информационная оценка плодородия почв. – М.: ФГНУ «Росинформагротех», 2006. – 476 с.
10. Савич В.И., Сычев В.Г., Балабко П.Н., Гукалов В.В. Баланс вещества в системе почва-растение // Известия БГАУ. – 2016. – С. 14-19.
11. Савич В.И., Седых В.А., Балабко П.Н., Замана С.П., Гукалов В.В. Инновационные технологии в агропромышленном комплексе. – М.: РГАУ-МСХА, ООО «Плодородие», 2020. – 350 с.
12. Сычев В.Г. Основные ресурсы урожайности с/х культур и их взаимосвязи. – М.: ЦИНАО, 2003. – 228 с.
13. Демин В.А. Обоснование рациональных систем удобрения в севооборотах при

интенсификации сельскохозяйственного производства Нечерноземной зоны: автореферат дис. д-ра с.-х. наук – М. – 1985. – 38 с.

14. Жуков Ю.П. Комплексная химизация в интенсивных технологиях возделывания культур в Нечерноземье. – М.: ТСХА, 1989. – 90 с.

15. Мерзлая Г.Е., Фомкина Т.П., Зябкина Т.А. и др. Руководство по эффективному использованию органических и минеральных удобрений на дерново-подзолистых почвах Смоленской области. – Смоленск: НИИСХ, 2014. – 52 с.

16. Беллахуел Дж. Трансформация аммонийного и нитратного азота в разных горизонтах дерново-подзолистой почвы: автореферат дис. канд. биол. наук: 06.01.04 – М. – 1998. – 22 с.

17. Гусева Ю.Е. Использование растениями ячменя элементов питания из разных слоев дерново-подзолистой почвы: автореферат дис. канд. биол. наук: 06.01.04 – М. – 2012. – 20 с.

18. Ильюк Е.Н. Превращение и использование ^{15}N сульфата аммония и натриевой селитры кукурузой из разных горизонтов почвы // Бюллетень ВИУА. – 1997. – №1. – С. 35.

19. Кидин В.В., Малахова Ю.Е. Использование ячменем элементов питания из разных слоев дерново-подзолистой почвы // Агрохимический вестник. – 2012. – №6. – С. 16-17.

20. Кидин В.В., Ионова О.Н. Использование растениями аммиачного и нитратного азота из разных слоев дерново-подзолистой почвы // Известия ТСХА. – 1992. – №5. – С. 50-57.

21. Кидин В.В., Бельдяева К.Ю. Доступность растениям ячменя и овса фосфора и калия из подпахотных слоев дерново-подзолистой почвы // Плодородие. – 2015. – №5. – С. 24-26.

22. Кобзаренко В.И. Фосфатный режим дерново-подзолистых почв // Актуальные проблемы почвоведения, агрохимии и экологии: сборник научных трудов. – М.: МСХА. – 2004. – С. 210-221.

23. Savich V.I., Belopukhov S.L., Gukalov V.V. Freezing of soil solutions as a factor of the changing properties of soils, their genesis and fertility // GeoScience. – 2017. – N 4. – P. 60-68.

24. Сычев В.Г., Шафран С.А., Духанина Т.М. Научные основы и методика определения доз питательных веществ и прогнозирования экономической эффективности применения минеральных удобрений. – М.: ВНИИА, 2020. – 152 с.

25. Горбылева А.И., Воробьев В.Б., Лаломова Т.В., Яроцкий Я.У. Влияние систем удобрений и способа обработки дерново-подзолистой легкосуглинистой почвы на продуктивность севооборота // Агрохимия. – 2002. – №12. – С. 42-46.

26. Смирнов А.П., Филиппов А.А., Постников А.В. Лизиметрическая станция ВНИИПТИХИМ: опыт сооружения и эксплуатации, в сб. «Лизиметрические исследования

почв», М., МГУ, 1998, с. 38-41

27. Ладонин В.Ф., Юркин С.Н., Акимова Т.Ю. О факторах формирования урожаев в Нечерноземной зоне, Плодородие, 2002, №5, с. 5-6

28. Кулаковская Т.Н. Почвенно-агрохимические основы получения высоких урожаев, Минск. 1978, 272 с.

29. Прокошев В.В., Дерюгин И.П. Калий и калийные удобрения, М., Ледум, 2000, 185 с.

30. Шаймухаметов Ш.Ш., Травникова Л.С. Использование физико-химических методов определения обеспеченности почв фосфором и калием и расчета потребности в удобрениях, в кн. «Совершенствование методологии агрохимических исследований», М., МГУ, Белгород, 1995, с. 315-324

31. Артюшин А.М., Дерюгин И.П., Кулюкин А.И., Ягодин Б.А. Удобрения в интенсивных технологиях возделывания сельскохозяйственных культур, М., Агропромиздат, 1991, 220 с.

32. . Савич В.И., Булгаков Д.С., Раскатов В.А. Интегральная оценка плодородия почв, М., РГАУ-МСХА, 2010, 347 с.

=====

Цитирование:

Савич В.И., Белопухов С.Л., Седых В.А., Балабко П.Н., Гукалов В.В. Проблемы агроэкологической оценки плодородия почв [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2021. – №3 (45). – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2021/3/st_304.pdf DOI: <https://doi.org/10.51419/20213304>.