

Ю.А.ОВСЯННИКОВ

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ
ЭКОЛОГО-БИОСФЕРНОГО
ЗЕМЛЕДЕЛИЯ**

Екатеринбург
Издательство Уральского университета
2000

УДК 581.5+631.8+ 631.46

Рекомендовано к изданию решением ученого совета Уральской государственной сельскохозяйственной академии

Рецензенты:

зав. кафедрой земледелия Уральской сельскохозяйственной академии *В.А. Арнт*;
зав. лабораторией экологии почв Института экологии растений и животных УрО
РАН, с. н. с., к. б. н. *В.С. Дедков*; зав. лабораторией фитомониторинга и охраны
растительного мира Института экологии растений и животных УрО РАН,
проф., д. б. н. *В.А. Мухин*

Овсянников Ю.А.

Теоретические основы эколого-биосферного земледелия. — Екатеринбург: Изд-во Урал, ун-та, 2000.— 264 с. **15ВИ 5-7525-1073-2**

В монографии рассматриваются вопросы влияния земледелия на окружающую среду. Автор делает вывод о необходимости перевода аграрной отрасли на новую природоохранную стратегию развития. В ее основе лежит использование естественных природообразовательных процессов.

Монография представляет интерес для научных работников, интересующихся проблемами сельского хозяйства, охраны окружающей среды и экологии. Она также может быть использована специалистами аграрной отрасли и студентами учебных заведений при изучении соответствующих курсов.

Табл. 67. Ил. 13. Библиогр.: 658 назв.

15ВИ 5-7525-1073-2

© Ю. А. Овсянников, 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

Монография явилась результатом длительной экспериментальной, а затем аналитической работы автора. В разные годы ее проведение поддерживалось научными сотрудниками УралНИИСХоза, преподавателями Пермской СХА, УрСХА и УрГЭУ. На первом этапе неоценимую помощь оказали Ольга Андреевна Дурасова и профессор Николай Александрович Халезов. Ольга Андреевна помогала проведению полевых и вегетационных опытов, а Николай Александрович давал нам своевременные замечания и рекомендации по обработке их результатов.

Большую признательность автор выражает бывшему ученому секретарю Ботанического сада УО РАН Лидии Александровне Семкиной, которая предоставила возможность провести лабораторные исследования с использованием специальных приборов. Работа на них была бы невозможной и без помощи инженера-биолога Ольги Максимовны Овсянниковой.

Эффективность исследовательской работы во многом зависит от соответствующего ее оформления. В этом нам значительную поддержку оказал Виталий Георгиевич Серебрянников. При его содействии была издана монография "Экологическое земледелие". Идеи и мысли автора, изложенные в ней, стали основой для написания настоящей монографии.

Автор выражает благодарность и заведующему кафедрой экономики природопользования УрГЭУ профессору Якову Яныбаевичу Яндыганову. Его исследования и активная позиция оказали на него заметное влияние.

Не без основания может быть поставлен вопрос: не сведется ли в будущем успешная культура и богатые урожаи хлебных растений на приспособление почвы к роскошному развитию в ней микробиологических процессов.

А.С. Фаминцын

Не исключена возможность с течением времени заменить внесение минеральных удобрений полностью или частично, по крайней мере, при некоторых сельскохозяйственных культурах, созданием соответствующего микробного режима почв.

С.П. Костычев

ВВЕДЕНИЕ

Главной задачей земледелия является увеличение урожайности культурных растений. Для этого в настоящее время в сельском хозяйстве используются технологии, предусматривающие интенсивное применение минеральных удобрений, ядохимикатов, многократную обработку почвы, превращение на обширных территориях естественных биоценозов в искусственные. Ориентация на индустриально-технологические системы земледелия позволила многим развитым странам в относительно короткий исторический отрезок времени значительно увеличить объемы производства продуктов питания.

Однако на фоне имеющихся достижений сельского хозяйства к концу XX в. обозначились и его недостатки. В пахотных почвах наблюдается постоянное снижение содержания гумуса, ухудшаются их биологические свойства. Нерегулируемое применение средств химизации стало причиной накопления в почвах и грунтовых водах остатков минеральных удобрений и ядохимикатов, изменения биогеохимических потоков и загрязнения природных объектов. Агрэкосистемы, утратившие видовое разнообразие, свойственное естественным, превратились в простые одновидовые, а следовательно, и неустойчивые сообщества. Поддерживание их состояния, которое обеспечивает необходимый уровень урожайности, с каждым годом требует все больших и больших затрат. В целом воздействие сельскохозяйственного производства на окружающую среду стало настолько сильным, что это может быть причиной подрыва плодородия пахотных земель в будущем и постепенной деградации отдельных структурных компонентов агроландшафтов.

Неконтролируемое использование средств химизации явилось причиной ухудшения качества продукции сельского хозяйства. В ней стали обнаруживаться нитраты, химические элементы, содержащиеся в удобрениях, остатки ядохимикатов. Снизилась ее биологическая полноценность. Это проявляется в неблагоприятных изменениях в аминокислотном составе, снижении содержания витаминов, Сахаров, различных биологически активных веществ. Употребление таких продуктов питания населением, проживающим в условиях сильного техногенного загрязнения, снижает устойчивость человеческого организма к действию неблагоприятных факторов.

В сложившейся ситуации нужно безотлагательно начать поиски принципиально новых способов выращивания культурных растений, которые бы обеспечивали высокую продуктивность пахотных земель, получение биологически полноценной сельскохозяйственной продукции, не наносили ущерба биосфере, и, более того, способствовали решению глобальных экологических проблем. Думается, что решение этой задачи в рамках индустриально-технологических систем земледелия невозможно. Это объясняется особенностями существующих подходов к повышению урожайности культурных рас-

тений. Они основаны на технократических приемах, которые с течением времени неизбежно вступают в противоречие с природными процессами.

Некоторые считают, что все перечисленные проблемы возникают из-за несоблюдения технологий выращивания сельскохозяйственных культур. Другие не придают им значения, так как с переходом к новой экономической системе объемы использования минеральных удобрений и ядохимикатов резко сократились. Полностью согласиться с этими аргументами нельзя. Во-первых, в странах с развитым сельским хозяйством, с высоким уровнем технологической дисциплины многие обозначенные проблемы еще более актуальны, чем в России. Во-вторых, спад в экономике будет продолжаться не вечно. Наступит период экономического роста. А это значит, что воздействие земледелия на окружающую среду достигнет прежних размеров, и все экологические проблемы вновь заявят о себе.

В связи с быстрым ухудшением состояния окружающей среды программой биосферных и экологических исследований РАН на период до 2015 г. предусматривается разработка альтернативных вариантов технологических стратегий природопользования. Этому вопросу, в приложении к сельскохозяйственному производству, и посвящена данная работа.

Глава 1. МИНЕРАЛЬНЫЕ УДОБРЕНИЯ И ПРОБЛЕМЫ ИХ ПРИМЕНЕНИЯ

По мнению широкого круга специалистов, обеспечение населения планеты продуктами питания невозможно без химизации сельского хозяйства. Под этим подразумевается широкое применение минеральных удобрений и пестицидов. В настоящее время объемы их мирового производства достигли внушительных размеров и в ряде стран продолжают увеличиваться.

Вместе с тем, неконтролируемое использование минеральных удобрений и пестицидов стало причиной загрязнения окружающей среды [398]. И поэтому они стали рассматриваться не только как фактор повышения урожайности сельскохозяйственных культур, но и как фактор, нарушающий глобальные круговороты веществ в биосфере.

1.1. Минеральные удобрения в сельском хозяйстве

К выдающимся достижениям науки XIX в. относится создание учения о минеральном питании растений. Это дало сильный толчок развитию целой отрасли промышленности, занимающейся производством минеральных удобрений. Их применение в земледелии давало возможность очень быстро повысить урожайность сельскохозяйственных культур. Уже в 1890 г. мировое производство туков составило 1,4—1,5, в 1913 г. — 3,9, а в 1938 г. — 8,4 млн. т действующего вещества [430]. За одно десятилетие, с 1960 по 1970 г., производство минеральных удобрений увеличилось более чем в два раза и достигло 67,7 млн. т. В результате этого на каждый гектар европейской пашни вносилось 103,7 кг азота, фосфора и калия. Благодаря применению минеральных удобрений и других агротехнических приемов урожайность зерновых культур в Англии, Дании, Нидерландах и ФРГ к 1965 г. была доведена до 30—40 ц/га.

Исследования, проведенные во второй половине XX в., показали, что при использовании минеральных удобрений, наряду с увеличением урожайности, изменяется и качество растениеводческой продукции. Например, внесение азотных удобрений в дозе 180—300 кг/га (действующего вещества) позволило повысить содержание сырого протеина в злаковых травах с 13 до 17—22% и превратить их в корм, белковость которого сопоставима с бобовыми культурами [507]. Учитывая высокую требовательность бобовых растений к условиям выращивания, сложность их семеноводства и появившуюся возможность получения достаточного количества кормов с высоким содержанием сырого протеина за счет применения азотных удобрений на злаковых травостоях, в научной и производственной сферах появляются первые признаки недооценки бобовых как источника кормов и средства воспол-

нения дефицита азота в земледелии [458]. В подтверждение этой точки зрения специалисты, считающие, что выращивание бобовых становится невыгодным, в дискуссиях со своими оппонентами обращают их внимание на продолжающееся насыщение рынка минеральными удобрениями. За следующее десятилетие, с 1970 по 1980 г., мировое производство туков увеличилось с 67,7 до 122,7 млн. т действующего вещества, то есть практически опять удвоилось [549].

Немногим ранее, в конце 50-х — начале 60-х гг., в исследованиях по уточнению баланса питательных веществ в почве, проведенных с использованием радиоактивных изотопов, выяснилось, что коэффициент использования азота из минеральных удобрений оказался на 20% ниже уровня, который был определен расчетным разностным методом [464]. Одновременно обнаружены способность минерального азота передвигаться по профилю почвы и существование газообразных потерь [327]. Но эта информация в большинстве случаев воспринималась только как некоторое уточнение наших представлений об эффективности минеральных удобрений, что вполне объяснимо, так как последствия миграции биофильных элементов в биосфере проявились не сразу.

В погоне за высокими урожаями, под влиянием, как казалось, от почти беспредельных возможностей повышения урожайности полевых культур за счет интенсивного применения минеральных удобрений, фермерами Европы к 1977 г. на каждый гектар пашни вносилось 210,3, ГДР — 332,7, ФРГ — 422,0, а Нидерландов — 737,3 кг действующего вещества азота, фосфора и калия [549]. Произошло и увеличение урожайности сельскохозяйственных культур. Она у зерновых культур поднялась до 40—50 ц/га. Определение доли участия различных факторов в повышении урожайности растений показало, что на минеральные удобрения приходится от 35 до 50% [423, 562]. Поэтому их применение, по мнению многих специалистов, остается на данный момент и на отдаленную перспективу основным способом увеличения продуктивности пахотных земель. В исследованиях, проведенных автором, минеральные удобрения также повышали урожайность сельскохозяйственных культур (прил. 1—4).

По оценке ЮНИДО, сделанной в 1970-х гг., мировое производство минеральных удобрений в 2000 г. должно было составить 307 млн. т действующего вещества [548, 549]. Однако сейчас становится ясно, что этот прогноз не оправдывается. В Западной Европе объемы использования удобрений в последние годы стабилизировались, а в Северной Америке рост незначителен. К концу века потребление удобрений, очевидно, не превысит 140 млн. т (табл. 1). Большая часть применяемых удобрений — это азотные удобрения. Их доля в общем объеме составляет более 56% [262].

Таблица 1

Мировое потребление минеральных удобрений, млн. т [239]

Годы	Западная Европа	Северная Америка	Мировое потребление
1994—1995	17,7	21,7	121,8
1995—1996	17,7	22,4	128,7
1996—1997	17,8	23,0	130,1
1997—1998	17,3	23,4	134,4

До 1990 г. увеличивалось производство и применение минеральных удобрений и в бывшем СССР. К 1987 г. выпуск туков был доведен до 27,4 млн. т азота, фосфора и калия в действующем веществе [493]. После распада Союза и наступления экономического кризиса производство и применение минеральных удобрений в России неуклонно сокращалось (табл. 2).

Таблица 2

Поставка минеральных удобрений сельскохозяйственным предприятиям в России, в пересчете на д. в. [475]

Показатель	1990	1991	1992	1993	1994	1995
Поставка удобрений, тыс. т	11051	10 102	5510	3721	1398	1601
Внесение, кг на 1 га пашни	83,4	79,4	44,2	31,8	12,1	14,1

Отмечается сокращение использования минеральных удобрений и в ряде развитых стран. Так, применение минеральных удобрений в США в 1988 г., по сравнению с 1980 г., снизилось с 20,96 до 17,68 млн. т [189]. За этот же период их внесение на 1 га пашни снизилось в США с 113 до 106, Италии — с 189 до 169, Дании — с 263 до 245, Японии — с 429 до 378 кг [416]. Но это вызвано совсем другими обстоятельствами, чем в России. Одной из причин сокращения применения минеральных удобрений в некоторых странах с развитым сельским хозяйством является рост озабоченности по поводу отрицательных последствий, возникающих в результате их использования.

1.2. Биогеохимические аспекты миграции азота и фосфора из почв сельскохозяйственного использования

Изучение эффективности применения удобрений показало, что из общего количества внесенного в почву азота сельскохозяйственными расте-

ниями усваивается около 40% [507]. Остальная часть подвергается иммобилизации, улетучивается в виде газообразных соединений и вымывается из пахотного горизонта (рис. 1). Вымывание азота удобрений объясняется хорошей растворимостью его минеральных форм в воде. Это позволяет им легко передвигаться по профилю почвы. На скорость миграции оказывают влияние растительный покров, механический состав почвы, ее водопроницаемость, количество фильтрующейся воды, запас подвижных соединений азота [69].



Рис. 1. Судьба азотных удобрений в почве [38]

В опытах, проведенных в полевых условиях на среднесуглинистой серой лесной почве, установлено, что после внесения в течение четырех лет аммиачной селитры в дозе 60 и 120 кг/га действующего вещества азот удобрений обнаруживался ниже пахотного слоя на глубине 20—200 см в количестве от 7 до 21% [383]. В других исследованиях при внесении за девятилетний период 1020 кг/га нитраты вымывались на глубину 2—3 м, а потери от внесенного азота составили 8,14% [73]. В условиях Эстонской ССР из почв вымывается в среднем 0,2—10% азота минеральных удобрений [237].

Принимая во внимание, что от 20 до 70% атмосферных осадков, выпадающих в лесной зоне, принимают участие в питании грунтовых вод [249], к решающим факторам, определяющим миграцию азота в подпахотные горизонты почвы, очевидно, следует отнести водный режим почв и наличие подвижных соединений. Так, в годы с недостаточным количеством осадков передвижение нитратного азота глубже одного метра, независимо от выращиваемых сельскохозяйственных культур, происходит очень слабо, но в увлажненные годы потери при внесении N_{120} составили 29 кг/га, что было выше, по

сравнению с вариантом без внесения удобрений, на 20% [311].

В то же время имеются сведения, что и в зонах с недостаточным количеством осадков соединения азота способны проникать в подпочвенные горизонты. В опыте, проведенном в Курганском НИИЗХ, систематическое применение в течение 10 лет азотных удобрений даже в умеренных дозах (40 кг/га) увеличивало содержание нитратов в грунтовых водах на глубине 2,5—3 м в 2 раза [241].

Минеральные соединения азота, накапливающиеся в подпахотных горизонтах почв, включаются в геохимическую миграцию. Это в стационарном опыте наблюдал И.С. Шатилов [582]. Изучение геохимических потоков показало, что существует положительная корреляция между количеством применяемых удобрений и содержанием нитратов в фунтовых водах (табл. 3). В модельных опытах внесение азота в дозе 129 кг/га повышало его вымывание по сравнению с контролем на 6—19% [576].

Таблица 3

Средневзвешенные величины доз азотных удобрений и содержание нитратов в грунтовых водах [280]

Бассейн	Доза N, кг/га		NO ₃ , мг/л	
	1969	1979	1969	1979
р. Городнянка	107	170	14,7	18,9
р. Скнига	23	50	1,6	8,2
р. Ицка	27	32	4,1	6,2
р. Сохна	52	73	3,0	12,4

Отражением миграционных процессов являются и результаты исследований, согласно которым в пробах воды лесного родника нитратов обнаружено не было, а в роднике, дренирующем пашню, их содержание было максимальным и составляло 7,1—8,9 мг/л [82]. В геохимических исследованиях, проведенных в водоохранной зоне Ивановского водохранилища, содержание азота в грунтовых водах под лесом и естественным лугом составляло 0,1—0,3 мг/л, а под сельскохозяйственными культурами — 16,3 мг/л [37]. Еще большее содержание нитратов в грунтовых водах наблюдали в опытах, проведенных на экспериментальной базе ТСХА "Михайловское". При систематическом применении удобрений в количестве 200 кг/га N, P₂O₅, K₂O их концентрация превысила 30—50 мг/л [187].

Оценивая степень загрязнения грунтовых вод, необходимо учитывать не только участие в этом процессе удобрений, но также и их способность повышать подвижность почвенного азота. Причины этого явления будут рассмотрены ниже.

Подвержен вымыванию из почв, но в меньшей степени, чем азот, и фосфор. При общих незначительных потерях фосфора из пахотного слоя, от

0,2 до нескольких килограммов в год, внесение фосфорных удобрений увеличивает их в 1,5—3,7 раза [65, 378].

Вымывается из почв и калий. Но этому процессу пока еще не уделяется большого внимания, так как считается, что калий не представляет особой опасности. Его содержание в грунтовых водах в России даже не регламентируется. Вместе с тем, известны примеры, когда его концентрация в воде колодцев достигает 85—92 мг/л. Это значительно выше фоновой, которая составляет 0,5—3 мг/л [37].

Изменение биогеохимических потоков в агроландшафтах в результате применения минеральных удобрений настолько значительно, что это дало основание для выделения на территориях с интенсивной сельскохозяйственной деятельностью целых биогеохимических районов. Их отличает от естественных повышенное содержание соединений азота и фосфора в почвах, культурных и дикорастущих растениях, грунтовых водах [48, 453]. Так, по сведениям В.Н. Кудеярова и В.Н. Башкина, грунтовые воды, дренирующие только лесные ландшафты, практически не содержат соединения азота, а грунтовые воды, формирующиеся на освоенной территории реки Оки, содержат нитратный азот в количестве 0,11—17,0 мг/л [284].

Загрязнение грунтовых вод, изменение в агроландшафтах биогеохимических циклов неизбежно ведет к усилению миграции нитратов и соединений фосфора. Они с грунтовыми и поверхностными стоками поступают в водные объекты. Это является главной причиной загрязнения биогенными элементами водоемов, расположенных в районах с неразвитой промышленностью. Даже при низких концентрациях азота и фосфора в почвенных водах они могут аккумулироваться в значительных количествах в водных объектах, имеющих в своем бассейне большие площади сельскохозяйственных угодий. Например, потери фосфора из удобрений за счет вымывания невелики и составляют всего 0,1—0,2% от внесенного в почву. В то же время содержание фосфатов в озерах Эстонии за последние 30 лет повысилось в среднем в 9 раз [237]. Такие же результаты получены при исследовании озер Литвы, в которых концентрация азота и фосфора под влиянием главным образом сельскохозяйственного производства увеличилась в 5—10 раз [526]. В реках южного региона содержание соединений азота только за период с 1983 по 1987 г. увеличилось в два раза [47].

Из общего количества биогенных веществ, поступающих в водоемы, азот и фосфор, теряемые с аграрных территорий с жидким и твердым стоком, могут составлять до 70% [626, 631, 9]. Существующие методы изучения геохимических потоков пока не позволяют достаточно надежно определить долю участия в этом процессе минеральных удобрений и элементов, содержащихся в почве. Простые математические расчеты дают только ориентировочные сведения. Специалисты из Чехословакии считают, что загрязнение водоемов на 45—50% связано со смывом удобрений [650]. По сведениям ученых из Германии, 10—25% азота и 1—5% фосфора, обнаруживаемых в водоемах,

имеют происхождение из минеральных удобрений [562]. В работах русских ученых эти показатели равны соответственно 20 и 2,5% [65]. Ландшафтно-геохимические исследования баланса азота в бассейне реки Оки показали, что 50—80% от всех поступлений этого элемента в водоемники приходится на минеральные удобрения [282]. В реках, впадающих в Каспийское море, доля биогенных элементов минеральных удобрений достигает 50 и даже 80% [529].

Одним из источников поступления в окружающую среду азота и фосфора являются погрузочно-разгрузочные работы, а также транспортировка минеральных удобрений. По данным БелНИИПА, потери минеральных удобрений на этапе "завод — поле" составляют около 15% [342].

Следствием увеличения содержания в водоемах азота и фосфора является повышение скорости размножения водорослей. Это явление называется эвтрофирование. Эвтрофирование водоемов представляет собой природный процесс, развитие которого обусловлено геохимической миграцией в ландшафтах биофильных элементов. В естественных условиях, из-за ограниченного поступления биогенных элементов, оно происходит на протяжении нескольких тысячелетий. Однако под действием антропогенного фактора, и в частности минеральных удобрений, образование первичной продукции в водных экосистемах повышается в несколько раз. Это способствует быстрому последовательному переходу водоемов от одного трофического уровня к другому. Такие изменения часто приобретают лавинообразный характер и ведут к быстрому превращению водного объекта в болото [506]. Скорость эволюционных преобразований настолько велика, что срок жизни водоемов может сокращаться с десятков тысяч до нескольких сотен лет.

Эвтрофирование существенно изменяет характеристики водных экосистем. Изменяется физико-химический режим водоема и состав его биоты. На первых этапах происходит увеличение общей биологической продуктивности за счет усиленного размножения отдельных компонентов фито- и зоопланктона на фоне одновременного сокращения его видового состава. Например, в мезотрофных озерах постепенно уменьшается число видов ракообразных и увеличивается разнообразие коловраток [375]. Среди первичных продуцентов чаще всего преимущественное развитие получают сине-зеленые водоросли [303]. В результате повышения биопродуктивности вода обогащается органическим веществом, образующимся после разложения отмирающего планктона. Этот материал, представляя благоприятную среду для микроорганизмов, способствует бактериальному загрязнению воды, максимум которого наблюдается в период гниения планктона [358].

Интенсивное разложение органического вещества, после его осаждения на дно водоема, сопровождается выделением большого количества метана, сероводорода, углекислоты и сокращением запасов растворенного кислорода. В отдельные годы содержание кислорода снижается настолько, что это приводит к массовым заморам молоди рыб. Поэтому во всех водоемах, за-

тронутых эвтрофированием, с течением времени происходит сокращение видового состава обитающих там живых организмов и снижение рыбопродуктивности [501].

Эвтрофирование водоемов представляет определенную опасность для человека и сельскохозяйственных животных. Являясь продуцентами токсических веществ, сине-зеленые водоросли могут способствовать повреждению кожных покровов, возникновению заболеваний дыхательной системы и острых аллергических конъюнктивитов [148]. С интенсивным развитием в водоемах сине-зеленых водорослей связывают возникновение у людей и животных гафской болезни. Установлено, что содержащаяся в водорослях тиамилаза, аккумулируясь в организме планктоноядных рыб, вызывает разрушение витамина В₁. Развивающаяся тиаминная недостаточность может стать причиной их гибели. Систематическое употребление человеком и млекопитающими рыбы с признаками В₁-авитаминоза приводит к возникновению у них гафской болезни и желудочно-кишечных заболеваний [63].

Свидетельством реальной опасности интенсивного развития водорослей в водоемах стали случаи существенного ухудшения качества питьевой воды [411]. Ее очистка и доведение до параметров, соответствующих санитарно-гигиеническим нормам или технологическим условиям, требует дополнительных затрат. Так, ежегодный ущерб от "цветения" воды только на предприятиях водоочистки днепровского каскада достигает в ценах 1988 г. 1 млн. руб. [260]. Кроме того, необходимо учитывать и потери, возникающие в результате снижения рыбопродуктивности, а также социальный ущерб, проявляющийся в ухудшении эстетических характеристик водоема. Отдыхающие на берегах чистых рек и озер получают положительные эмоции, и это, несомненно, благоприятно отражается на их настроении, а впоследствии и работоспособности. Созерцание же того, как из года в год усиливается "цветение" воды, снижается ее прозрачность, уменьшаются рыбные запасы, производит на отдыхающих унылое впечатление, а значит, и не дает полной психоэмоциональной разгрузки. Приведенный пример достаточно наглядно показывает, как экологические проблемы трансформируются в социальные и экономические. Но именно этот аспект очень часто не попадает в поле зрения специалистов, определяющих эффективность применения минеральных удобрений и величину ущерба, наносимого окружающей среде.

Газообразные потери азотных удобрений являются источником загрязнения атмосферы. Их появление связано с процессами денитрификации, аммонификации и нитрификации, происходящими в почве с участием микроорганизмов. По обобщенным данным 80 полевых опытов, газообразные потери составляют в среднем 26% от внесенного азота. Изучение этого явления показало, что улетучивание азота происходит в основном в форме N₂, NO₂ и NH₃. Размеры газообразных потерь увеличиваются при внесении высоких доз удобрений и их мелкой заделке. До последнего времени газообразным потерям как фактору загрязнения окружающей среды не придавалось

существенного значения, так как наблюдающееся при этом увеличение концентрации азота в приземном слое воздуха не превышает предельно допустимых норм [328, 327]. Однако сейчас стало известно о способности соединений азота, наряду с другими химическими веществами, разрушать озоновый экран стратосферы, являющийся своеобразным щитом, прикрывающим все живое на планете от жесткого ультрафиолетового излучения [250, 326].

Газообразные соединения азота, поступающие в атмосферу, способствуют потеплению глобального климата. На долю NO_2 приходится 6% парникового эффекта. В будущем роль двуокиси азота может возрасти. Это объясняется увеличением ее концентрации в атмосфере. С конца прошлого века она повысилась более чем на 20%. Основной причиной насыщения атмосферы соединениями азота является производство и применение азотных удобрений [138].

Появление и накопление соединений азота в атмосфере приводит к выпадению кислотных дождей. Около 30% их кислотности обусловлено присутствием HNO_3 . Азот возвращается с осадками на землю в количестве до нескольких десятков кг/га в год [584]. Такой путь поступления азота на сельскохозяйственные угодья в некоторой степени компенсирует его дефицит в земледелии, но в то же время ведет к подкислению почв и водоемов [250]. Так, если до 1940 г. только 4% горных озер Канады имели рН воды ниже 5,0, то к середине 70-х гг., в результате выпадения загрязненных осадков, этот показатель увеличился до 51% [632]. Под действием кислотных дождей ускоряется разрушение строительных материалов, окисление металлов, нарушаются природные экосистемы. Гибнут рыбы, моллюски, насекомые, растения и даже крупные животные. На больших территориях повреждаются лесные массивы [619, 618]. Доля таких участков в Западной Европе составляет 22% от общей площади лесов.

Кислотные осадки отрицательно влияют на агроэкосистемы. Подкисление почв ухудшает их физические, химические и биологические свойства; у сельскохозяйственных культур снижается интенсивность фотосинтеза, скорость роста, утрачивается иммунитет. Все это, в конечном итоге, значительно снижает урожайность. Конечно, основными загрязнителями атмосферы являются промышленные предприятия, но, без сомнения, в определенной степени в этом повинно и сельское хозяйство.

Сокращение потерь азота, предотвращение его вымывания из пахотного слоя почвы могло бы значительно повысить эффективность азотных удобрений и уменьшить загрязнение окружающей среды. С этой целью ведутся работы по различным направлениям. Наиболее простым способом сокращения газообразных потерь азота является увеличение глубины заделки и локальное внесение удобрений. Другими вариантами предусматривается использование цеолитов [171] или медленнодействующих удобрений [191]. Вместе с тем, все перечисленные способы только частично снижают потери азота. Часто их применение не всегда вписывается в технологию выращи-

ния сельскохозяйственных культур, а иногда просто невозможно ввиду их большой стоимости [281].

Определенные надежды связывали с использованием ингибиторов нитрификации и денитрификации. Их применение позволяет повысить урожайность растений, но при этом не удастся полностью предотвратить потери азота. Например, в опытах, проведенных на дерново-подзолистой почве, при ежегодном внесении ингибиторов потери азота снижались всего на 10—26,7% [262]. Кроме того, имеются данные об отрицательном влиянии ингибиторов нитрификации, относящихся к биологически активным соединениям, на микрофлору почвы [281, 566]. Последствия этого воздействия изучены еще недостаточно

. 1.3. Влияние минеральных удобрений на свойства почвы

Самым важным вопросом современного земледелия, от которого зависит не только производство продуктов питания, но и состояние биосферы, является сохранение плодородия почв. Значение почвенного покрова для современной биосферы сравнимо с озоновым экраном стратосферы. Деградация почв ведет к постепенному снижению объемов образования первичной продукции и катастрофическим изменениям в окружающей среде [250, 167].

Основным показателем, характеризующим плодородие почв, является содержание в них гумуса. Высокогумусированные почвы имеют благоприятную для растений структуру, хорошую водоудерживающую способность и достаточный запас питательных веществ. Экспериментальным путем установлено, что повышение содержания гумуса в дерново-подзолистой почве на 1% увеличивает продуктивность пашни более чем на 25% [183]. Аналогичные данные получены и в других опытах. Следовательно, создание запасов органического вещества в пахотных землях должно стать первоочередной задачей земледелия. Вместе с тем, наблюдения показывают, что за 30 лет интенсивной эксплуатации почв Саратовской области содержание в них гумуса снизилось с 7,0 до 6,5%, а в целом по Центрально-Черноземной зоне РСФСР — с 5,6 до 5,1% [388]. В Башкортостане почвы за время их сельскохозяйственного использования утратили около 20% гумуса. Ежегодная его потеря составляет в среднем 300 кг/га [561].

По мнению ведущих почвоведов, за последние 100 лет запасы органического вещества в черноземах нашей страны уменьшились в два раза [248, 251]. К таким же выводам пришла Г.С. Макунина. Согласно ее расчетов общие потери гумуса на всей площади сельскохозяйственного освоения черноземов составили около 40% [329].

Роль минеральных удобрений в увеличении гумусированности почв до недавнего времени рассматривалась с положительной стороны. Однако в последние годы происходит переоценка их значения. Все чаще специалисты выражают сомнение по поводу возможности повышения содержания органи-

ческого вещества за счет применения минеральных удобрений [339, 283, 291]. Более того, они могут явиться причиной обеднения почв гумусом. По данным Л.К. Шевцова, которые использует В.Н. Кудеяров с соавторами [283], полученным на основе обобщения данных более 400 длительных полевых опытов, его содержание в дерново-подзолистых почвах при внесении полного минерального удобрения в первые 20—30 лет снижалось в среднем на 12—14%. Им сделан вывод, что внесение только минеральных удобрений не компенсирует потерь почвенного органического вещества. Такое же заключение делает и В.Г. Минеев [339]. Механизм этого явления состоит в следующем.

Определение коэффициентов использования питательных веществ из почвы показало, что их значения при внесении минеральных удобрений, по сравнению с неудобренными вариантами, как правило, увеличиваются. При выяснении обстоятельств отмеченного явления было обнаружено существенное усиление процессов минерализации гумуса, происходящее под действием азотных удобрений [282, 279]. Оказывается, каждая единица азота удобрений способствует дополнительной мобилизации от 0 до 1,2 единицы почвенного азота [283]. Это и ведет к увеличению содержания в почве подвижных соединений и, как следствие, повышению коэффициентов использования растениями питательных веществ. Подвижные соединения азота, образовавшиеся в результате минерализации органического вещества, так же, как азот минеральных удобрений, включаются в геохимическую миграцию. Их доля от общего количества инфильтрационных потерь азота из пахотных угодий составляет от 10 до 50% [93, 239].

Сведения о происходящей трансформации гумуса подтвердились при изучении его качественного состава. Под влиянием минеральных удобрений меняется соотношение между гуминовыми и фульвокислотами, увеличивается доля сахаридных и кислородсодержащих соединений, белковоподобных остатков [79, 611]. По данным Г.П. Гамзикова с соавторами, длительное внесение минеральных удобрений достоверно снижало долю гуминовых кислот [122]. Учитывая то, что гумусовые вещества являются важным экологическим фактором, влияющим на жизнедеятельность почвенных организмов, их разрушение неизбежно повлечет за собой изменения в естественной структуре педоценозов.

Возможны и более существенные отрицательные экологические последствия дегумификации почв. Гумусовые вещества на 52—62% состоят из углерода. При их минерализации происходит образование CO_2 , который поступает в атмосферу и способствует формированию парникового эффекта. Полагают, что 20% всего углекислого газа, накопившегося в атмосфере в результате антропогенной деятельности, образовалось вследствие разрушения почвенного органического вещества [167].

Опасность минерализации гумуса под влиянием каких-либо агротехнических приемов, в том числе и азотных удобрений, заключается не только

в сокращении прямых запасов питательных веществ в почве, ухудшении ее свойств, возникновении экологических проблем, но и в снижении потенциальной возможности, небιологической фиксации азота. В настоящее время имеются убедительные данные, свидетельствующие о существовании в почве механизмов химической природы, обеспечивающих фиксацию азота без участия живых организмов [13]. По оценкам специалистов, потребность сельскохозяйственных культур в азоте в полевых условиях на 40—50% удовлетворяется за счет его фиксации природными гумусовыми веществами. В перспективе это свойство почв может быть использовано для создания регулируемых азотфиксирующих систем [13]. Изменение качества гумуса, очевидно, может оказать существенное отрицательное влияние на активность абиотических систем фиксации азота в почве, так как их функционирование зависит от физико-химических свойств органического вещества.

Плодородие почвы и направленность различных химических и биологических превращений, происходящих в ней, во многом зависит от кислотности среды. Оптимальное значение рН почвы для большинства культур соответствует 6,0—6,5. Ее увеличение приводит к угнетению растений. Внесение физиологически кислых удобрений, к которым относятся такие широко распространенные виды, как аммиачная селитра, хлористый калий и другие виды способствует подкислению почвенного раствора. Если при разовом использовании удобрений в небольших дозах существенного изменения рН не наблюдается, то при длительном, в течение ряда лет, происходит сильное подкисление почв. Например, внесение за 25-летний период 2480 кг N, 1820 кг P₂O₅ и 2500 кг K₂O увеличивало актуальную кислотность дерново-подзолистой почвы в слое 0—20 см с 4,9 до 4,0—4,3, а степень насыщенности основаниями при этом снижалась с 69,4—70,0 до 48,2%. Еще большее снижение степени насыщенности основаниями наблюдалось в слое почвы 20—40 см [144, 184].

Степень и срок, в течение которого происходит изменение рН почв, зависят от их типа. Более заметному подкислению подвержены дерново-подзолистые почвы, характеризующиеся низким содержанием органического вещества и высокой естественной кислотностью. Но при длительном внесении удобрений увеличение кислотности, уменьшение суммы поглощенных оснований и степени насыщенности основаниями происходит и в черноземных почвах [159].

Среди практикующих агрономов распространено мнение об отсутствии заметного повышения рН, если используются умеренные дозы удобрений. Однако исследования показывают, что ежегодное внесение в течение ротации севооборота даже 38 кг/га аммиачной селитры и 70 кг/га действующего вещества хлористого калия увеличивает кислотность дерново-подзолистых суглинистых почв на глубину до 60 см [246].

Незначительное на первый взгляд изменение кислотности почв воспринимается совсем по-другому, когда мы вспоминаем о том, что шкала рН

логарифмическая. А это значит — при снижении значения рН с 5 до 4 кислотность среды увеличивается в 10 раз.

Ухудшение агрохимических показателей почвы отражается на эффективности применяемых удобрений и, как следствие, на продуктивности растений. Например, если в первый год внесения минеральных удобрений урожай картофеля и овса повышался соответственно со 118 до 251 ц/га и с 25 до 40,1 ц/га, то через 10 лет их регулярного использования они уже не повышали, а, наоборот, снижали урожайность полевых культур [4]. Аналогичные данные получены и в других опытах. Так, на шестой год внесения азотных удобрений в дозе 60—90 кг/га действующего вещества также не было получено прибавки урожая. Результаты этого опыта приведены в табл. 4.

Таблица 4

Урожайность ячменя на шестой год внесения удобрений [12]

Вариант	Урожайность, ц/га
РК-фон	26,4
Фон + кальциевая селитра	35,2
Фон + сульфат аммония	26,0
Фон + хлорид аммония	24,1
Фон + мочевины	26,4

Отрицательное действие систематического применения удобрений на растения обусловлено как подкислением почвенного раствора, так и происходящим при этом увеличением подвижности соединений алюминия, марганца и железа, которые угнетают рост растений [486]. Их комплексное воздействие отрицательно влияет на биологические показатели почвы. Изменяется численность и видовой состав микроорганизмов. Среди них появляются фитопатогенные виды. Кроме того, ухудшение отдельных показателей химической характеристики почвы снижает устойчивость растений к недостатку воды [245] и, очевидно, другим факторам окружающей среды.

Особого внимания в современной земледелии заслуживает факт обеднения пахотного горизонта кальцием, магнием и изменение доступности для растений ряда микроэлементов (табл. 5). На разных типах почв минеральные удобрения повышают выщелачивание оснований из пахотного горизонта на 11—36% [588]. По другим сведениям, интенсивность вымывания кальция и магния на удобренных почвах увеличивается в 2—3 раза [544, 262].

Расчеты, проведенные с целью выяснения связи между вымыванием оснований и внесением удобрений показывают, что на суглинистых почвах каждый килограмм внесенных питательных веществ ведет к потере 0,5 кг СаО и 0,06 кг MgO, а на супесчаных почвах соответственно 1,0 и 0,19 кг. Поэтому на удобряемых участках дополнительно рекомендуется вносить 60—80

кг/га MgO [290].

Таблица 5

Влияние минеральных удобрений на вымывание кальция и магния из почвы [290]

Дозы удобрений	Потери, кг/га, суглинистая почва		Потери, кг/га, супесчаная почва	
	CaO	MgO	CaO	MgO
Без удобрений	99	12	205	41
N ₁₇₀ P ₁₇₀ K ₁₇₀	252	31	467	98
N ₃₄₀ P ₃₄₀ K ₃₄₀	484	67	1016	142

К отрицательным последствиям применения удобрений следует отнести и увеличение подвижности некоторых микроэлементов, содержащихся в почве. Они более активно вовлекаются в геохимическую миграцию. Это ведет к возникновению в пахотном слое дефицита В, Zn, Cu, Mn [141]. Ограниченное поступление микроэлементов в растения, которые вымываются из почвы, неблагоприятно влияет на процессы фотосинтеза и передвижение ассимилятов, снижает их устойчивость к заболеваниям, недостаточному и избыточному увлажнению, высоким и низким температурам [113, 337, 22], то есть к наиболее важным факторам внешней среды, подверженным к тому же сильным колебаниям, часто выходящим за оптимальные параметры. Основной причиной нарушений в обмене веществ растений при недостатке микроэлементов является снижение активности ферментных систем.

Недостаток микроэлементов в почве вынуждает применять микроудобрения. Так, в США их использование в период с 1969 по 1979 г. возросло с 34,8 до 65,4 тыс. т действующего вещества [508].

В связи с глубокими изменениями в агрохимических свойствах почв, происходящими в результате применения удобрений, возникла необходимость изучения их влияния на физические характеристики пахотного слоя. Основными показателями физических свойств почвы являются агрегатный состав и водопрочность почвенных частиц. От того, насколько эти параметры близки к оптимальным, зависят водный и воздушный режимы корнеобитаемой зоны. Анализ результатов ограниченного количества исследований, проведенных с целью изучения влияния минеральных удобрений на физические свойства почвы, не позволяет сделать определенных выводов. В некоторых опытах наблюдалось ухудшение физических свойств [285]. При повторной культуре картофеля доля почвенных агрегатов более 1 мм в варианте с внесением азота, фосфора и калия, по сравнению с неудобренным участком, снижалась с 82 до 77%. В других исследованиях при внесении полного минерального удобрения на протяжении пяти лет содержание в черноземе агро-

номически ценных агрегатов уменьшилось с 70 до 60%, а водопрочных — с 49 до 36% [589].

Чаще всего отрицательное влияние минеральных удобрений на агрофизические свойства почвы обнаруживается при изучении ее микроструктуры. Возможно, это связано с тем, что новые методы в некоторых случаях более надежны.

Микроморфологические исследования показали, что даже небольшие дозы минеральных удобрений (30—45 кг/га) оказывают отрицательное влияние на микроструктуру почвы, сохраняющееся на протяжении 1—2 лет после их внесения. Возрастает плотность упаковки микроагрегатов, снижается видимая порозность, уменьшается доля зернистых агрегатов [332]. Длительное внесение минеральных удобрений ведет к снижению доли частиц губчатого микросложения и к увеличению на 11% неагрегатированного материала [440]. Аналогичные результаты были получены и в других исследованиях. Одной из причин ухудшения структуры является обеднение пахотного слоя экскрементами почвенных животных [49, 571].

В ряде опытов существенного влияния минеральных удобрений на физические свойства почв не обнаружено. Но это, очевидно, объясняется не отсутствием реальных изменений, а сложностью их обнаружения, так как происходят они в течение длительного времени. Наше предположение основано на том, что агрохимические и агрофизические свойства почв тесно связаны между собой, и поэтому увеличивающаяся кислотность, обеднение пахотного горизонта основаниями, уменьшение содержания гумуса, ухудшение биологических свойств должны закономерно сопровождаться ухудшением агрофизических свойств.

Для предотвращения отрицательного влияния минеральных удобрений на свойства почвы следует периодически проводить известкование. Необходимость в этом мероприятии была очень высока в доперестроечный период, когда наблюдался рост поставок сельскому хозяйству минеральных удобрений. К 1966 г. ежегодная площадь известкования в бывшем СССР превысила 8 млн. га, а объем вносимой извести составил 45,5 млн. т. Однако это не компенсировало потерь кальция и магния. Поэтому доля земель, подлежащих известкованию, в ряде регионов не уменьшилась, а даже несколько увеличилась. Для того чтобы не допустить увеличения площади кислых земель, предполагалось удвоить поставки сельскому хозяйству известковых удобрений и довести их к 1990 г. до 100 млн. т [220, 393, 312].

Известкование, понижая кислотность почвы, одновременно повышает газообразные потери азота. При проведении этого приема они возрастают в 1,5—2 раза [326]. Такая реакция почв на внесение мелиорантов является результатом изменений в направленности микробиологических процессов, что может являться причиной нарушения геохимических круговоротов. В связи с этим Г.В. Добровольским высказываются сомнения в целесообразности использования известкования [167]. Известкование усугубляет и другую про-

блему — загрязнения почв токсическими элементами.

1.4. Обогащение почв сопутствующими элементами, содержащимися в минеральных удобрениях и мелиорантах

Минеральные удобрения являются основным источником загрязнения почв тяжелыми металлами и токсичными элементами. Это связано с содержанием в сырье, используемом для производства минеральных удобрений, стронция, урана, цинка, свинца, ванадия, кадмия, лантаноидов и других химических элементов. Их полное извлечение или не предусматривается вообще, или осложняется технологическими факторами [11, 226]. Поэтому они в качестве примесей частично входят в состав суперфосфатов, калийных удобрений, извести и фосфогипса. Возможное содержание сопутствующих элементов в суперфосфатах и в других видах минеральных удобрений, широко применяемых в современной земледелии, приведено в табл. 6 и 7.

Таблица 6

Содержание примесей в суперфосфатах, мг/кг [465]

Примесь	Содержание	Примесь	Содержание
Мышьяк	1,2—2,2	Свинец	7—92
Кадмий	50—170	Никель	7—32
Хром	66—243	Селен	0—4,5
Кобальт	0—9	Медь	4—79
Ванадий	20—180	Цинк	50—143

В больших количествах элементы-загрязнители обнаруживаются в извести. Ее внесение в количестве 5 т/га может изменить природные уровни кадмия в почве на 8,9 % от валового содержания [442].

При внесении минеральных удобрений в дозе 109 кг/га ИРК в по поступает примерно 7,87 г меди, 10,25 — цинка, 0,21 — кадмия, 3,36 свинца, 4,22 — никеля, 4,77 — хрома [44]. По расчетам ЦИНАО, за весь период использования фосфорных удобрений в почвы бывшего СССР внесено 3200 т кадмия, 16 633 — свинца, 553 — ртути [336]. В опы проведенных на Долгопрудной агрохимической станции, применен! течение 60 лет минеральных удобрений в дозе $N_{60-90}P_{80-90}K_{80-120}$ в раза повышало содержание в почве фтора и в 4 раза — подвижного стронция [450]. Большая часть химических элементов, попавши почву, находится в слабоподвижном состоянии. Период полувыведе кадмия составляет 110 лет, цинка — 510, меди — 1500, свинца - несколько тысяч лет [564].

Содержание тяжелых металлов в удобрениях и извести, мг/кг [343]

Вид удобрения	Zn	Cu	Ni	Pb	Fe
Хлористый калий	3,11	8,67	4,33	8,67	680,53
Аммиачная селитра	0,20	0,25	0,84	0,05	603,00
Известь	10,83	12,67	26,00	26,50	4853,00

Загрязнение почвы тяжелыми и токсическими металлами ведет к накоплению их в растениях. Так, в Швеции концентрация кадмия в пшенице за текущее столетие увеличилась вдвое. Там же, при применении суперфосфата в суммарной дозе 1680 кг/га, внесенной частями за 5 наблюдений повышались содержания кадмия в зерне пшеницы в 3,5 [341]. По данным Ю.А. Потатуевой с соавторами, при загрязнении выстронцием происходило трехкратное увеличение его содержания в клубнях картофеля [450]. В России пока еще не уделяется необходимо внимания загрязнению растениеводческой продукции химическими элементами. Имеются только разрозненные данные организаций, контролирующих качество продуктов питания. По данным Свердловской санитарно-эпидемиологической службы, в 1991 г. доля образцов овощей и бахчевых культур, не соответствующих нормам по содержанию свинца, составила 1,2, а кадмия — 7,2% [415].

Использование загрязненных растений в качестве продуктов питания или кормов является причиной возникновения у человека и сельскохозяйственных животных различных заболеваний. К наиболее опасным тяжелым металлам относят ртуть, свинец и кадмий. Попадание в организм человека свинца ведет к нарушениям сна, общей слабости, ухудшению настроения, нарушению памяти и снижению устойчивости к бактериальным инфекциям [364, 606]. Накопление в продуктах питания кадмия, токсичность которого в 10 раз выше свинца, вызывает разрушение эритроцитов крови, нарушение работы почек, кишечника, размягчение костной ткани [340]. Парные и тройные сочетания тяжелых металлов (ТМ) усиливают их токсический эффект [606]. Определенную опасность представляют и другие элементы.

Экспертным комитетом ВОЗ разработаны нормативы поступления в человеческий организм тяжелых металлов. Предполагается, что каждую неделю здоровый человек массой 70 кг может получать с пищевыми продуктами, без вреда для своего здоровья, не более 3,5 мг свинца, 0,625 мг кадмия и 0,35 мг ртути [640].

В связи с возрастанием загрязнения продуктов питания были приняты нормативы содержания ТМ и ряда химических элементов в продукции растениеводства (табл. 8).

**Предельно допустимые концентрации химических элементов,
мг/кг сырого продукта [29]**

Элемент	Хлебные продукты и зерно	Овощи	Фрукты	Молочные продукты
Ртуть	0,01	0,02	0,01	0,005
Кадмий	0,02	0,03	0,03	0,01
Свинец	0,2	0,5	0,4	0,05
Мышьяк	0,2	0,2	0,2	0,05
Медь	5	10	10	0,5
Цинк	25	10	10	5,0
Железо	50	50	50	3,0
Олово"	—	200	100	100,0
Сурьма	0,1	0,3	0,3	0,05
Никель	0,5	0,5	0,5	0,1
Селен	0,5	0,5	0,5	0,5
Хром	0,2	0,2	0,1	0,1
Алюминий	20	30	20	1,0
Фтор	2,5	2,5	2,5	2,5
Йод	1	1	1	0,3

Загрязнение растениеводческой продукции ТМ и химическими элементами опасно для человека не только при непосредственном ее употреблении, но и при использовании на кормовые цели. Например, скармливание коровам растений, выращенных на загрязненных почвах, привело к увеличению концентрации кадмия в молоке до 17—30 мг/л [645], в то время как допустимый уровень составляет 0,01 мг/л.

Для предотвращения накопления химических элементов в молоке, мясе, исключения возможности отрицательного их влияния на состояние сельскохозяйственных животных во многих странах принимаются предельно допустимые концентрации (ПДК) для химических элементов, содержащихся в кормовых растениях. По стандартам ЕЭС безопасное содержание свинца в фураже составляет 10 мг/кг сухого вещества. В Нидерландах допустимый уровень содержания кадмия в зеленых кормах равен 0,1 мг/кг сухой массы [29, 341].

Фоновое содержание химических элементов в почвах приведено в табл. 9. При накоплении ТМ в почве и последующем поступлении их в растения они концентрируются в основном в вегетативных органах, что объясняется защитной реакцией растений [200]. Исключение составляет кадмий, который легко проникает как в листья и стебли, так и в генеративные части [212]. Для правильной оценки степени накопления в растениях различных элементов необходимо знать их обычное содержание — то, которое наблю-

дается при выращивании сельскохозяйственных культур на незагрязненных почвах. Сведения по этому вопросу довольно разноречивы. Это объясняется большими различиями в химическом составе почв. Фоновое содержание свинца в почвах равно примерно 30, а кадмия — 0,5 мг/кг [123]. Концентрация свинца в растениях, выращиваемых на чистых грунтах, составляет 0,009—0,045, а кадмия — 0,011—0,67 мг/кг сырого вещества [658].

Таблица 9

Содержание некоторых элементов в пахотных почвах, мг/кг [479]

Элемент	Обычное содержание	ПДК	Элемент	Обычное содержание	ПДК
As	0,1—20	20	Ni	2—50	50
B	5—20	25	Pb	0,1—20	100
Be	0,1—5	10	Sb	0,01—0,5	5
Br	1—10	10	Se	0,01—5	10
Cd	0,01—1	3	Sn	1—20	50
Co	1—10	50	Tl	0,01—0,5	1
Cr	2—50	100	Ti	10—5000	5000
Cu	1—20	100	U	0,01—1	5
F	50—200	200	V	10—100	50
Ga	0,1—10	10	Zn	3—50	300
Hg	0,01—1	2	Mo	0,2—5	200

Необходимость установления жестких норм по загрязнению растений объясняется тем, что при выращивании их на загрязненных почвах содержание отдельных элементов может увеличиваться в десятки раз. В то же время некоторые химические элементы становятся токсичными при трех- и даже двукратном увеличении их концентрации. Например, содержание меди в растениях обычно составляет примерно 5—10 мг/кг в расчете на сухую массу. При концентрации 20 мг/кг растения становятся токсичными для овец, а при 15 мг/кг — для ягнят [479]. Таким образом, к загрязнению растений и почв химическими элементами следует относиться с большим вниманием.

В настоящее время проводятся исследования по определению ПДК химических элементов в почвах. В ряде стран они уже приняты к исполнению. Чаще всего ПДК по кадмию составляет 3, ртути — 2, свинцу — 100 мг/кг [640]. Превышение указанных уровней содержания химических элементов в почвах отрицательно отражается на качестве сельскохозяйственных культур. В них снижается содержание витаминов, ухудшается биологическая полноценность белка. При выращивании растений на загрязненных ТМ грунтах происходят нарушения в обмене веществ отдельных органов, угнетается рост. По сведениям Л.Г. Бондарева (цит. по: В.Г. Минеев [341]), продуктивность основных сельскохозяйственных культур при выращивании их на почвах, содержащих ТМ, снижается на 20—47%. Воздействию ТМ подвергаются и генетические структуры растений.

В результате всестороннего изучения последствий загрязнения почвы некоторые исследователи пришли к заключению, что принятые ПДК не могут полностью исключить отрицательного влияния ТМ и ряда химических элементов на урожай сельскохозяйственных культур и его качество. Оказывается, различные растения неодинаково реагируют на присутствие в почве загрязнителей. Так, фасоль в 10—15 раз чувствительнее кукурузы к кадмию [479]. Поэтому необходимо дальнейшее уточнение принятых ПДК. По мнению некоторых исследователей, ПДК по кадмию должно составлять не 3 мг/кг, а значительно меньше. Это связано с тем, что безопасный уровень для картофеля составляет только 1,5, а зеленых — 0,5 мг/кг [214]. Корректировка пороговых концентраций необходима и тогда, когда в почве присутствует не один элемент-загрязнитель, а несколько. Так, если марганец и ванадий присутствуют в почве одновременно, то их ПДК уменьшается в два раза [75]. Такой же эффект наблюдается при загрязнении почвы ртутью и свинцом. В опытах с капустой было установлено, что если в субстрате одновременно обнаруживаются оба этих элемента, то их допустимые уровни должны быть уменьшены вдвое [523].

Приведенные примеры показывают, что эффективность земледелия, его возможности в условиях продолжающегося поступления в почвы различных химических элементов неизбежно будут снижаться. И одной из причин этого является ограничение нашей свободы при выборе культур, пригодных для выращивания на загрязненных почвах. Специфичность реакции растений затруднит составление севооборота. В него уже нельзя будет включать менее устойчивые к загрязнению культуры.

Одним из последствий применения минеральных удобрений является повышение радиоактивности окружающей среды. В окультуренных почвах Германии с начала применения фосфорных удобрений содержание урана и радия возросло соответственно на 9 и 6% [149]. Это является следствием содержания в фосфорных удобрениях радиоактивных элементов. Они, концентрируясь в продуктах питания и кормах, могут повышать уровень внутреннего облучения человека и сельскохозяйственных животных.

Увеличение содержания ТМ в почве отражается и на ее химических свойствах. Прежде всего, подвергается изменению ферментативная активность. Например, при содержании в перегноино-глееватых почвах 5 мг/кг кадмия наблюдается снижение активности дегидрогеназы и инвертазы, а при концентрации 7 мг/кг происходит полное подавление этих ферментов [50].

Кроме растений, отрицательное влияние ТМ, а также токсичных элементов испытывает на себе и почвенная биота. При загрязнении почв хромом, цинком, никелем и свинцом, на уровне одного-двух кларков, уменьшается численность бактерий, сокращается видовой состав микроорганизмов, насекомых и дождевых червей. В то же время увеличивается количество грибов, то есть происходит нарушение структуры педоценоза [90, 317]. Особое беспокойство должно вызывать снижение азотфиксирующих свойств почвы,

которое наблюдается при ее загрязнении различными химическими элементами.

Удвоение фонового содержания металлов в почве при интенсивном применении удобрений возможно за 80 и более лет [646, 343]. Но при этом необходимо помнить, что одновременно почва загрязняется целым комплексом элементов, присутствующих в удобрениях. Следовательно, опасный уровень загрязнения будет достигаться значительно быстрее.

Большую озабоченность вызывает загрязнение почв фтором. Он входит в состав суперфосфатов и фосфогипса в количестве 1—5%. Ежегодное использование таких удобрений способствует повышению его содержания в почве на 5% [265], а при длительном применении фосфорных удобрений (в течение 15 лет и более) содержание фтора в слое почвы 0—30 см может увеличиться в 1,7—5 раз [500].

При накоплении фтора в почве его концентрация в растениях увеличивается в несколько раз и может достигать 77,6 мг/кг [170]. Это отрицательно отражается на продуктивности растений, приводит к загрязнению продукции растениеводства и увеличивает вероятность возникновения заболеваний у человека, а также сельскохозяйственных животных. При скармливании коровам кормов с содержанием фтора более 40 мг/кг они заболевают флюорозом, а концентрация этого элемента в молоке повышается более чем в два раза [634].

По данным японских ученых, поступление фтора в организм человека с продуктами питания и водой к 1965 г., по сравнению с 1958 г., увеличилось в 2,7 раза. Усиливающееся загрязнение окружающей среды фтором даже дало основание правительству Швеции для запрещения его использования при дезинфекции воды [121].

Наряду с фтором в кальций-, гипсосодержащих и известковых мелиорантах обнаруживается относительно большое количество (1—2%) стабильного стронция. С обычной нормой фосфогипса в почву поступает от 100 до 400 кг/га этого элемента [346]. Его опасность состоит в том, что в организме человека и сельскохозяйственных животных стронций вступает в конкурентные отношения с кальцием, замещая его в костных тканях. Избежать отрицательного влияния стронция можно только в том случае, если его содержание в продуктах питания и кормах будет в 140 раз меньше, чем кальция. Применение мелиорантов и удобрений, содержащих стронций, как правило, изменяет это соотношение. Так, в результате использования фосфогипса отношение Ca:Sr снизилось у овса со 105 до 68, проса — с 64 до 61, ячменя — с 67 до 61, донника — с 60 до 46 [53].

При прогнозировании загрязнения почвы следует учитывать и возможное поступление элементов, имеющих техногенное происхождение [620, 643, 655]. Аэрозольное распространение ТМ от промышленных районов достигает 25 км. В ряде стран Западной Европы на 1 га пашни с удобрениями и аэрозольным путем ежегодно поступает около 10 г кадмия, в том числе 3—5

г с суперфосфатом, при валовом его содержании в слое почвы 0—15 см 0,2—2 кг/га [654, 657, 647]. Загрязнение почв соединениями тяжелых металлов в некоторых странах достигло такого уровня, что возникли трудности с использованием сельскохозяйственных угодий [649]. Аналогичная ситуация складывается вокруг крупных промышленных центров в России. На Среднем Урале почти все пахотные земли в округе Ревды, Первоуральска, Нижнего Тагила не пригодны для получения диетической продукции. Сведения о поступлении металлов в почвы с атмосферными осадками в европейской части России приведены в табл. 10.

Принимая во внимание опасность накопления в почве тяжелых, токсичных и радиоактивных элементов производители удобрений в ФРГ в 1986 г. приняли решение о введении норм на содержание в них кадмия. Однако извлечение из сырья, используемого для производства фосфорных удобрений, только этого элемента не исключит загрязнения почв [657, 623]. Более радикальным шагом, хотя и не решающим все проблемы, следует считать предложение о необходимости снизить объемы применения фосфорных удобрений [627].

Таблица 10

Поступление металлов с жидкими атмосферными осадками в Тульской области, мг/м² в год [554]

Элемент	Район наблюдений			
	Тульские засеки	г. Тула	Усадьба Ясная Поляна	Угледобы- вающий район
Железо	84	263	133	210
Медь	14	84	42	7
Марганец	2,8	118	73	70
Цинк	49	185	112	70
Кобальт	1,2	11	2,6	1,8
Никель	4,2	15,4	8,4	7
Хром	3,5	20,3	9,8	8,6
Свинец	1,4	24,5	8,4	7,7
Кадмий	0,1	19	2,1	1,8

Поступление в почвы различных химических элементов значительно осложняет определение безопасного уровня. Установленные ПДК обеспечивают безвредность среды только тогда, когда в ней содержится один загрязняющий компонент. Если появляются другие, то они могут усиливать отрицательное воздействие друг друга. Поэтому при комплексном загрязнении среды необходимы другие подходы к установлению его безопасного уровня. Считается, что он может определяться следующим образом:

$$\frac{C_1}{ПДК_1} + \frac{C_2}{ПДК_2} + \dots + \frac{C_n}{ПДК_n} \leq 1,$$

где C_1, C_2, \dots, C_n — концентрация загрязняющего элемента в среде;

$ПДК_1, ПДК_2, \dots, ПДК_n$ — предельно допустимая концентрация элемента для данной среды.

Однако приведенный порядок определения безопасного уровня загрязнения химическими элементами неприемлем для почв. Это объясняется тем, что в них всегда наблюдается определенное фоновое содержание разнообразных химических элементов. И поэтому допустимый уровень загрязнения должен устанавливаться с учетом фонового содержания химических элементов, их поступления с минеральными удобрениями, мелиорантами, атмосферными осадками, а также с учетом миграционных процессов. Для этого, по нашему мнению, в вышеприведенный порядок необходимо внести следующие изменения. Показатели C_1, C_2, \dots, C_n должны определяться по следующей схеме:

$$C = Oф - Фк,$$

где $Oф$ — общая (фактическая) концентрация элемента в почве, мг/кг;

$Фк$ — фоновая (кларковая) концентрация элемента в почве, мг/кг.

Предложенный порядок определения безопасного уровня загрязнения почв учитывает: содержание химических элементов в почве, их привнесение, вымывание, а также установленные ПДК.