

УДК 631.1

ОСНОВЫ РАСЧЕТА ОПТИМАЛЬНОЙ СТРУКТУРЫ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ

К. КУДРНА

(Пражский высший сельскохозяйственный институт)

В работе изложен системный подход к ускорению интенсификации сельскохозяйственного производства при одновременном повышении экономических показателей. Сельскохозяйственная система охарактеризована как сложная динамическая система, дано ее выражение в виде агрегатной схемы. Установлено, что решающим моментом системного подхода является определение измеримых признаков и параметров внутренней структуры системы и ее состояния. Выведены параметры консервативных элементов ландшафта, параметр оценки углеродных источников и соотношение между углеродными ресурсами и продуктивностью зерновых культур. Установлено, что сельскохозяйственная система развивается по строго определенным и определяемым закономерностям, которые отражаются на ее экономических параметрах.

Концепция агропромышленного комплекса — редкий пример системного подхода к существенному ускорению интенсификации сельскохозяйственного производства при одновременном повышении экономической эффективности. Она позволяет целенаправленно ориентировать производство и науку на материально-техническое обеспечение развития АПК и всех его звеньев, включая соответствующие учебные заведения и т. д.

Так как сельскохозяйственная система входит в оперативные звенья этого комплекса, необходимо наметить новые подходы к разработке ее внутренней структуры и обеспечению устойчивости. Важность выявления оптимальной структуры системы определяется тем, что в ее основе лежат биологические факторы, природные законы, при нарушении которых система не сможет прогрессивно развиваться. Рассматриваемую систему можно охарактеризовать как сложную динамическую систему и представить агрегатной схемой (рис. 1).

На рис. 1 изображены обратные компенсирующие связи, обуславливающие прочность и равновесие системы. Все они входят в агрегат G_{ps}, C . Совокупность этих связей имеет здесь определенную иерархию. Обратная компенсирующая связь $\Sigma_m \rightarrow G_{ps}$ первичная и может прочно существовать лишь при наличии двух других связей $Z_c \rightarrow G_{ps}, C$, поскольку именно в таком случае в почве начинает накапливаться углерод органического вещества корней многолетних кормовых культур. Третья компенсирующая связь выражается в возвращении углерода соломы зерновых культур в форме органического удобрения. Вторая обратная компенсирующая связь — основная, она обуславливает степень устойчивости и равновесия системы, третья — их сохраняет. Наконец, четвертая связь может дей-

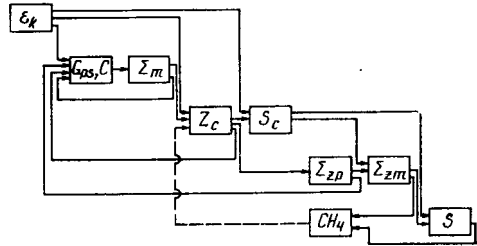


Рис. 1. Агрегатная схема сельскохозяйственной системы.

E_k — энергия климата, G_{ps} — геолого-петрографический субстрат грунтов; C — аккумуляция углерода; Σ_m — микробные сообщества; Σ_c — ресурсы углерода; S_c — расход углерода; Σ_{zp} — полигастрические животные; Σ_{zm} — моногастрические животные; S — микрорайоны; CH_4 — утилизация органических отходов после их промышленной переработки.

ствовать в системе только при условии, что отходы, получаемые при промышленном разведении моногастрических животных, будут трансформированы, т. е. превращены в биогаз (метанизованы), который затем послужит энергоисточником, например, для сушки многолетних кормовых трав, что позволит предотвратить значительные их потери при сушке на солнце. Таким образом, эта связь также может участвовать в замыкании системы и в ее упрочении.

Все эти обратные компенсирующие связи, входящие во внутреннюю структуру сельскохозяйственной системы, отражают соотношения между ресурсами углерода и его потребителями, т. е. культурами, которые вносят в систему активный углерод (многолетние фуражные культуры, луговой травостой, солома зерновых и пр.) и которые его не вносят (сахарная свекла, картофель, лен, хмель и т.п.). От внутренней структуры зависят и поголовье полигастрических животных, и активность микробных сообществ в почве.

Как показали системные анализы значительных территорий ЧССР, областей, районов и хозяйств, внутренняя структура сельскохозяйственной системы сама является параметром ее состояния. С использованием этого параметра можно выразить в первую очередь отношение для зерновых ξ_2 и пропашных ξ_3 культур:

$$\xi_2 = \frac{k_1 \sum Y_{s_1} + k_4 \sum Y_{s_4}}{\sum Y_{s_2}},$$

$$\xi_3 = \frac{k_1 \sum Y_{s_1} + k_4 \sum Y_{s_4} + k_2 \sum Y_{s_2}}{\sum Y_{s_3}},$$

где k_1 — 1; k_2 — 0,75; k_4 — 0,5; $2 y_{st}$ — вся продукция многолетних кормовых культур, y_{st} — вся продукция зерновых; $\sum Y_{s_3}$ — вся продукция пропашных; $\sum Y_{s_{4a}}$ — вся продукция лугового травостоя. Учитывается продукция (сухое вещество) отдельных культур в годы с максимальными урожаями. Выражение указанных параметров через изолинии (рис. 2) показывает, что значения их возрастают по мере увеличения высоты ландшафта над уровнем моря и ресурсов углерода. Значения рассматриваемых показателей самые низкие на аллювиальных почвах низменностей, расположенных вдоль рек.

Таким образом, мы установили, что внутренняя структура сельскохозяйственной системы, выраженная через данные параметры, дает измеримый признак — высота над уровнем моря (неизменный элемент ландшафта). Отсюда следует практический вывод: в областях с аллювиальными отложениями для выравнивания содержания углерода в почве достаточен повышенный процент однолетних кормовых культур, а с повышением местности и при гетерогенности аллювия необходимо увеличение доли многолетних культур — сначала чистых посевов люцерны, потом клевера, люцерно- и клеверо-злаковых смесей и, наконец, луговой и пастбищной растительности. Полученные параметры служили в качестве линейных операторов в алгоритме для определения оптимальной структуры сельскохозяйственной системы.

Для следующего консервативного элемента ландшафта — геолого-петрографического субстрата грунтов — была взята максимальная урожайность отдельных культур. Здесь мы исходили из предположения, что за длительный период времени при наличии оптимального соотношения изменчивых «прогрессивных» факторов (метеоусловий, затрат средств, труда, энергии и пр.) максимальная урожайность будет определяться таким консервативным элементом, как геолого-петрографический субстрат почв. Это предположение полностью себя оправдало. Если максимальный урожай полевых культур выразить изолиниями (рис. 2, а), то проявляются некоторые закономерности, имеющие особое значение для выделения специализированных регионов. В результате были сделаны следующие важные выводы:

1. Изолинии максимальных урожаев отграничивают на данной высоте над уровнем моря эквипотенциальные участки с определенным гео-

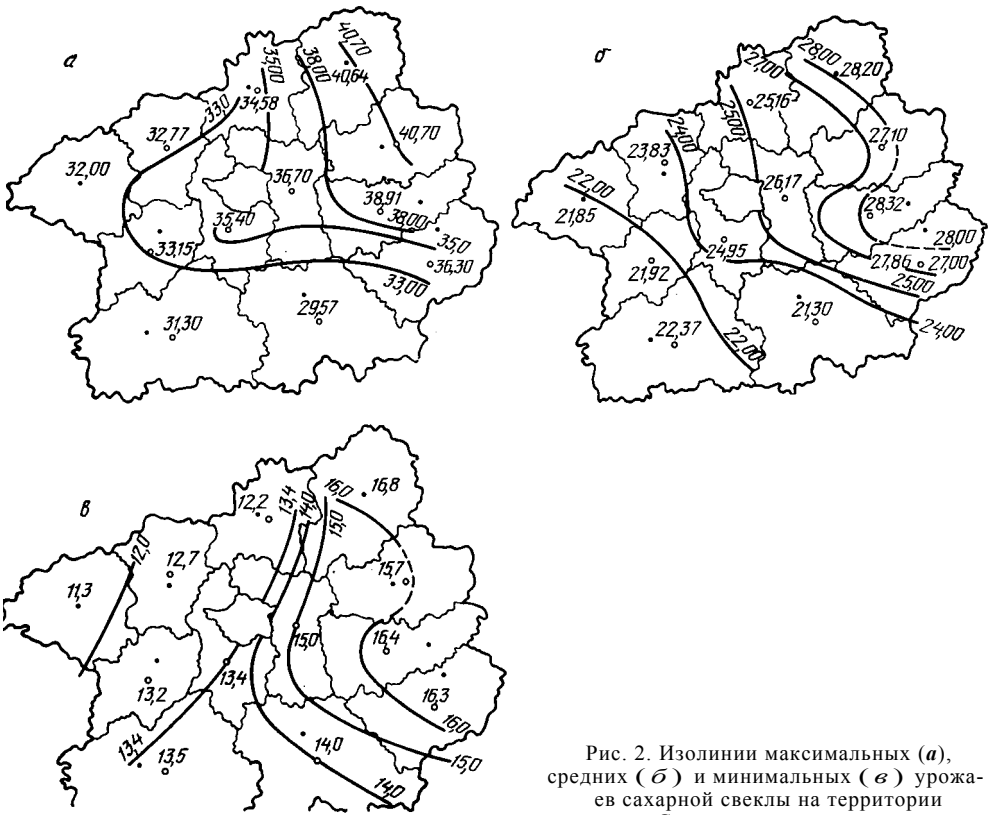


Рис. 2. Изолинии максимальных (а), средних (б) и минимальных (в) урожаев сахарной свеклы на территории Среднечешского края.

лого-петрографическим субстратом, который в наибольшей мере отвечает требованиям данной культуры.

2. Если максимальные урожаи определяются, например, в разные интервалы времени, то размеры ограниченных изолиниями участков уменьшаются с ростом значения максимального урожая; это создает условия для выявления оптимальной структуры системы при наибольшей ее нагрузке определенной культурой.

3. Если с помощью изолиний выражаются и другие уровни урожайности — средние и минимальные, то ограниченные ими участки характеризуются менее благоприятными петрографическими субстратами для данной культуры.

Изолинии средних и минимальных урожаев смещаются из области аллювиальных отложений меловой формации в область гнейсовых и гранитных (рис. 2, б, в).

Таким образом, консервативные элементы служат основой при выделении специализированных регионов с условиями, наиболее благоприятными для возделывания отдельных культур, а также позволяют вычислить оптимальную структуру и максимальную загрузку системы.

Для почвы, т. е. субстрата, возникшего в результате взаимодействия «прогрессивных» и консервативных факторов, выведен параметр — биоэнергетический потенциал почвы (E_p). Получен он теоретически, из модели электроконденсатора; его измерительный признак — соотношение

$$E_p = \frac{\Sigma Y_s}{\Sigma H},$$

где ΣY_s — общее количество убранной сухой массы выращенных растений в сельскохозяйственной системе, млн. т; ΣH — общее количество внесенных NPK, т д. в.

В. И. Вернадский [1] считал, что прогрессивное развитие биосферы обусловлено количеством элементов, которые быстро попадают в биооборот и быстро из него выходят. При этом важно не количество имеющихся элементов, а скорость их миграции. Анализы сельскохозяйственной системы однозначно показали (рис. 3), что увеличение любой сухой массы растений (ΣY_s) в данной области приостанавливается или же ее рост не отвечает количеству внесенных минеральных удобрений (ΣH).

Из рис. 3 видно, что E_p уменьшается во времени. Поэтому снижается использование минеральных удобрений ΣH и, следовательно, рост общего количества сухой массы неадекватен количеству внесенных удо-

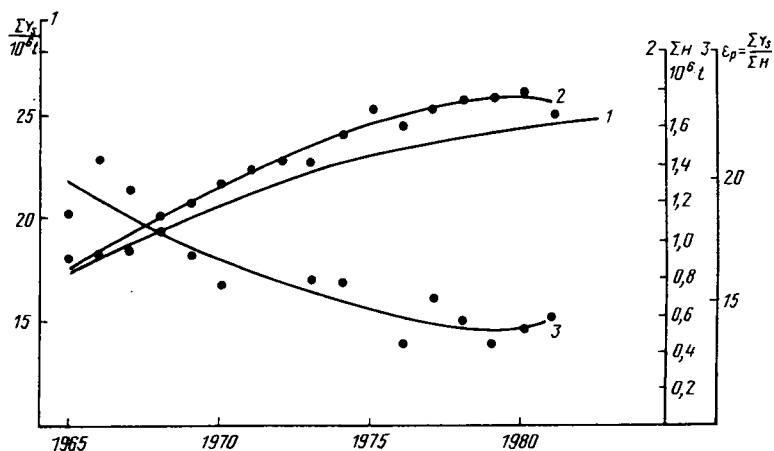


Рис. 3. Изменение ΣY_s , млн. т (1), при изменении общего количества НРК, ΣH (2) и биоэнергетического потенциала E_p (3) в изучаемой области.

брений. Отсюда следует, что параметр состояния сельскохозяйственной системы E_p является измерительным признаком усвоения минеральных удобрений. Анализы показали, что причины снижения E_p заключаются не только в нарушении внутренней структуры системы на данной территории (т. е. в нарушении соотношения между ресурсами и потреблением углерода), а и во внутреннем нарушении структуры самих этих ресурсов. За рассматриваемый период заметно сократились площади посевов многолетних трав при чрезвычайном возрастании посевов силосных культур (кукурузы на силос). Поэтому при анализе данного состояния мы исходили из предположения, что влияние обеих групп углеродных ресурсов (трав и силосных культур) зависит от качественной разницы гумусовых веществ, поставщиками которых они являются. И. В. Тюрин [9] писал, что накопление гумуса обуславливается ежегодным приростом органических остатков и их качеством, а также интенсивностью их разложения и содержанием самого гумуса. Следовательно, важно не одно лишь количество гумуса, но и его качество, которое во многом определяется видом возделываемых культур. В почве под посевами кукурузы на силос, удобряемыми органикой, преобладают фульвокислоты, а в почве под посевами многолетних трав — темные гуминовые и ульминовые кислоты. Фульвокислоты отличаются значительно более низким содержанием углерода, максимальным количеством O_2 и H и минимальным содержанием N . Так, в ульминовой кислоте соотношения $O : C$, $H : C$ и $N : C$ равны 0,54, 0,075 и 0,070, а в креновой — 1,07, 0,12, 0,042.

Если сравнивать субстраты, из которых возникают гумусовые кислоты, то обнаруживаются значительные различия их по общей щелочности. Нами были проведены расчеты общей щелочности кормов по

методу Ганссона, И. Герциг, И.-Жак [2], И. Герциг [3] и получены следующие ее значения (г • экв):

Клевер красный (среднее по всем фазам роста)	1,358
Люцерна (среднее)	1,459
Бобово-злаковые смеси	0,721
Люцерно-злаковые смеси	1,350
Сено с лугов (среднее)	0,687
» с пастбищ	0,878
Кукуруза на силос	0,288
Зерновые (среднее) — зерно	-0,115
Солома зерновых (среднее)	0,334

Из приведенных данных видно, что различия культур по общей щелочности высоки. Вот почему так важно соблюдать строгое соотношение между посевами одно- и многолетних кормовых культур, а также учитывать качество урожая во время уборки многолетних трав. В данном случае особое внимание следует уделять концентрации водородных ионов и закону Гульдберга — Вага.

В связи с этим мы провели анализ влияния увеличения урожая зернофуражных культур (кукурузы) на урожай зерновых, которые хорошо

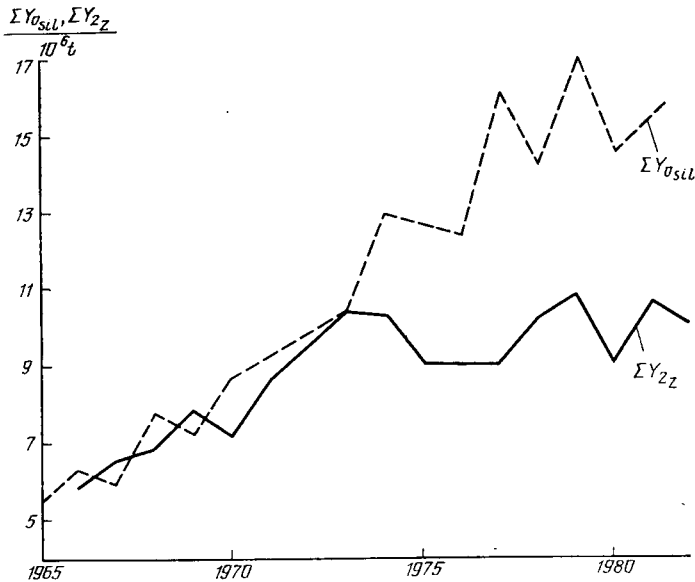


Рис. 4. Зависимость общего урожая зерновых культур ΣY_{2z} от урожая силосных культур (ΣY_{0118}).

растут на почвах со слабокислой реакцией, а также на колебания урожая сахарной свеклы и картофеля за период с 1965 по 1982 г.

Как видно из рис. 4, до 1974 г. действовала прямая корреляция между сборами силосной массы и общим урожаем зерна зерновых культур; коэффициент корреляции 0,99. В 1974 г. впервые была превзойдена граница общего урожая зерновых 10,500 млн. т, в последующие годы он оставался примерно на таком же уровне, а сбор силосной массы значительно повысился (14,735 млн. т).

Посевные площади под кукурузой на силос после 1964 г. возросли с 584 до 684 тыс. га к 1974 г. и до 761 тыс. га к 1982 г., тогда как площадь зерновых не превышала 55 % пахотных земель. Площади посевов и урожай многолетних кормовых трав понизились: в 1972 г. на 17,73 %, а в 1982 г. — на 14,38 %. Соотношение сборов сухого вещества однолетних силосных и многолетних трав вместе с травостоем лугов (η_0) в год излома кривых (1972/73) в среднем было 0,277.

С целью более точного определения пригодности условий для зерновых был выбран параметр

$$\eta_2 = \frac{\Sigma Y_{2z}}{2,27 \Sigma C (0+1+1\mu+4a)}.$$

Показатель η_2 , подобно η_0 , E_p , зависит от основного консервативного элемента ландшафта — высоты над уровнем моря. В период 1965—1974 гг. значение $\eta_0 < 0,274$, а $\eta_2 = 0,64$. Оптимальное значение $\eta_2 = 0,75$ отмечено в 1973/74 г. Затем оно сохранялось до 1984 г. Необычайный рост сборов силосной массы к 1982 г. (почти на 80 % по сравнению с 1972—1974 гг.) обусловил получение большого количества кормов, но значение тем не менее снизилось до 0,66, т. е. на 12,5 %, по той причине, что силосная масса в процессе реализации соответствующей компенсирующей связи оказалась поставщиком низкокачественного углерода, возвращающегося в почву. Согласно вычисленному значению η_2 , общее количество имеющегося углерода достаточно для получения 13,55 млн. т зерна зерновых, однако из-за нарушения η_0 общий урожай зерновых сократился на 12,5 %, или на 1,645 млн. т. Неиспользованный запас углерода может быть реализован лишь при очень благоприятных климатических условиях. Представляет интерес сопоставление значений η и запаса углерода: так, превышение η_0 составляет 12 %, а запас углерода — 12,5 %. Если это рассматривать с точки зрения обратной компенсирующей связи в системе, то следует признать необходимость определенного соотношения между силосом и грубыми кормами в рационе полигастрических животных. В связи с указанным мы провели системные анализы данных, полученных в большинстве европейских стран за длительный период, и установили, что в годовой рацион крупного рогатого скота (при живой массе животных 500 кг) включается 2,59 т сена. Нами была составлена также математическая модель с учетом поступления в почву органического вещества навоза крупного рогатого скота, превращения его микроорганизмами почвы и ризосферы полевых культур. Благодаря такой модели (модель проникновения по окружностям Эйлера — Венна) мы получили уравнение биоэнергетического потенциала почвы E_p :

$$E_p = E_{rs} \cap \Sigma zp \cap \Sigma m,$$

где E_{rs} — накопленная энергия растительных сообществ; Σzp — поголовье полигастрических животных; $2t$ — численность микроорганизмов в почве.

На этой же основе нами выведен коэффициент для пересчета сухого вещества отдельных полевых культур на активный углерод. Так, для сухого вещества силосных культур (ΣY_{S4}), многолетних трав (ΣY_{S1}), соломы зерновых культур ($2 Y_{zsl}$) и луговых трав (ΣY_{S4a}) значение этого коэффициента оказалось одинаковым и равным 0,386, для сухого вещества корней многолетних кормовых трав (ΣY_{41u}) — 0,360, зерна (ΣY_{22}) — 0,065.

Использование коэффициента пересчета сухого вещества силосных, многолетних трав, соломы и луговых трав, равного 0,386, при расчетах необходимого количества грубых кормов для полигастрических животных дало то же значение этого показателя $1 : 0,386 = 2,59$, которое было установлено в результате анализа экспериментальных данных по европейским странам.

На основании полученных материалов нами была составлена нограмма, по которой можно определить общее количество сухих веществ силоса, сена и зерна в годовом рационе крупного рогатого скота. Оно составило для многолетних и луговых трав 2,59 т в год (7,1 кг в день), для силоса — 0,709 т (1,94 кг), для зерна — 0,386 т (1,05 кг), а всего — 3,7 т в год (10,1 кг в день). Рассчитанная нами годовая норма кормов (K_n) соответствует полученной экспериментально в НИИ животноводства в г. Нитре.

Из соотношения $\Sigma Y_{So} : \Sigma Y_{S1+4a} = 0,709:2,59$ получаем 0,274, что практически равно значению $\eta_0 < 0,274$. Совпадение этих величин подтверждает прямую пропорциональную зависимость между составом рациона полигастрических животных и качеством ризосферы полевых культур. Вот почему мы обозначили эту связь как параметр обратной компенсирующей связи в сельскохозяйственной системе — ΣY_{So} :

$:\Sigma Y'_{S1+4a} = \eta_0$.

Из-за нарушения соотношения $\Sigma Y_{So}:\Sigma Y_{S1+4a}$ в процессе реализации обратной связи в ризосфере полевых культур идет накопление светлых гуминовых кислот, в результате чего увеличивается концентрация водородных ионов и из сорбционного комплекса почвы вытесняются многовалентные катионы Ca и Mg, высвобождаются и мигрируют микроэлементы. Чтобы их использовать, надо обеспечить такое же интенсивное усвоение указанных элементов корнями полевых культур. В этих условиях при высоких нормах минеральных удобрений, особенно при недостаточном количестве осадков в критический для культур период, при необходимой интенсивности радиации и наличии кислорода в ризосфере значительное количество питательных веществ остается неиспользованным.

Дефицит кислорода возникает из-за высвобождения Ca и Mg из сорбционного комплекса, вследствие чего разрушается микроструктура почв, а аэрация понижается до уровня более низкого, чем суточная норма, — $7,5 \text{ л CO}_2 \cdot \text{м}^{-2}$ при 25° [10] из ризосферы в атмосферу. Эту ситуацию убедительно иллюстрирует кривая 3 биоэнергопотенциала почвы на рис. 3. Анализы показали также, что при значении $\eta_0 < 0,274$ не обеспечивается нужной миграции элементов, а при $\eta_0 > 0,274$ возможно лишь случайное усвоение минеральных удобрений при благоприятных метеоусловиях. В таком случае начинает действовать второй компонент гумусовых кислот, источником которого являются сеяные многолетние и луговые травы, сухое вещество которых характеризуется высокой щелочностью. Светлые гуминовые кислоты (их источником является силосная масса кукурузы) служат кумуляторами и вызывают отрицательную обратную компенсирующую связь, тогда как темные и ульминовые — стабилизаторами: с увеличением их количества растет и возможность связывания ионов минеральных солей на активной поверхности, сорбционный комплекс при этом упрочается, утечка минеральных солей из ризосферы понижается. Эти выводы были подтверждены работами Э. Шпалдона и сотр. [8]. В его опытах урожаем озимой пшеницы 9,98 т/га после клевера собран при норме NPK 317,2 кг, а урожаем 9,50 т/га после силосной кукурузы потребовал 362,6 кг NPK.

Пониженное действие минеральных удобрений связано с изменением их баланса. С 1965 г., когда систематически понижался биоэнергопотенциал почвы в результате значительного увеличения выноса элементов питания из удобрений и почвы силосными культурами, общий урожай которых возрос с 5,404 млн. т в 1965 г. до 16,992 млн. т в 1984 г., т. е. на 314%. Системные анализы некоторых районов однозначно подтверждают высокую положительную зависимость η_2 от η_0 ; в нашем же случае она резко падает. Другая причина снижения эффективности минеральных удобрений связана, видимо, со строгой зависимостью значений η_2 и η_0 от высоты над уровнем моря. Отсюда вытекает целесообразность разработки дифференцированных систем удобрения. Более высокие значения η_0 свидетельствуют о благоприятных условиях для зерновых (ввиду более низкой рН) и менее благоприятных — для сахарной свеклы и картофеля. Поэтому колебания урожая у зерновых 16 %, а у свеклы и картофеля — 27 и 28 %. При высоком значении η_0 понижаются и качественные признаки выращиваемой продукции (например, сахаристость свеклы [7]).

Вследствие нарушения микроструктуры почвы ухудшаются ее физические свойства, и для поддержания благоприятных режимов ризосферы приходится усиливать технологическое вмешательство, что ведет к повышению затрат труда, химических средств и энергии.

Определение устойчивости почвенных агрегатов методом деформации центробежной силой (К. Кудрна, 1957, 1959) показало, что отдельные культуры значительно меняют устойчивость структурных агрегатов почвы и, следовательно, инфильтрацию воды в почву (рис. 5).

На рис. 5 крайние состояния агрегатов обозначены темными точками. На оси ординат указаны сроки действия (в секундах) центробежной силы, сжимающей колонку почвенных агрегатов на Δt . Устойчи-

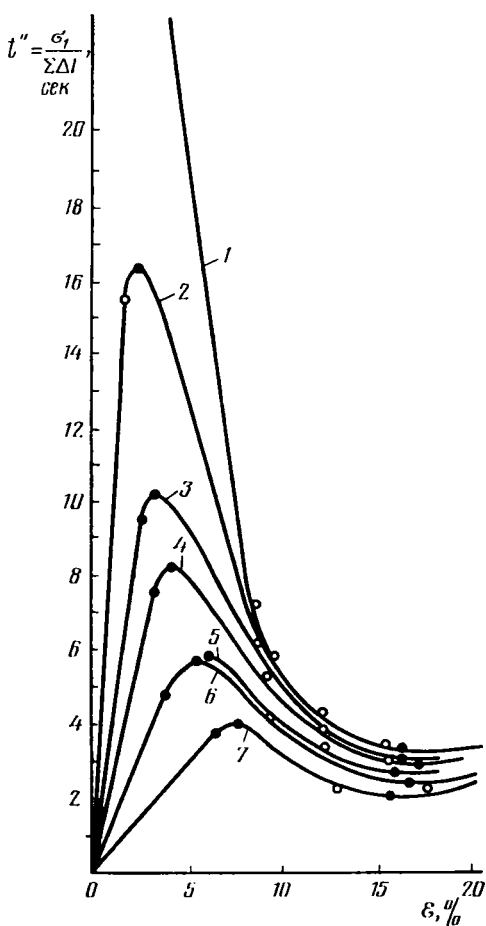


Рис. 5. Зависимость деформации структурных агрегатов почвы ε от нагрузки σ .

1 — люцернозлаковая смесь; 2 — луговые травы;
3 — рожь; 4 — клевер; 5 — картофель; 6 — ячмень; 7 — овес.

соотношения становятся общими параметрами при разработке оптимальной структуры сельскохозяйственной системы.

Заключение

Анализ сельскохозяйственных систем показал, что решающим моментом при их планировании является определение измеримых признаков и параметров внутренней структуры системы и ее состояния. Нами установлены параметры консервативных элементов ландшафта — высота над уровнем моря и геолого-петрографические субстраты почв, параметры оценки свойств источников углерода, какими являются одно- и многолетние кормовые культуры, соотношение между углеродными ресурсами и объемом производства зерна зерновых культур. Выявлено, что сельскохозяйственная система развивается по определенным и определенным закономерностям.

вность агрегатов тем больше, чем дольше этот срок и чем меньше деформация $\varepsilon\%$. При разрушении агрегатов все кривые сближаются. Состояние агрегатов почвы соответствует степени инфильтрации воды в ней. В результате сравнения хода кривых на рис. 5 и значений коэффициентов гидропроводности установлена их строгая корреляция. Почвы под многолетними и луговыми травами отличаются максимальной инфильтрацией, а под пропашными — минимальной. Вследствие этого для физических свойств почвы особое значение получают параметры ξ_2 , ξ_3 η_0 .

В животноводстве нарушение параметра η_0 также ведет к ухудшению ряда показателей. Чрезмерное скармливание скоту силоса вызывает дисфункцию преджелудков (ацидоз). В результате ухудшается качество молока, снижается выход мяса, ослабляются репродукционные способности и пр.

Из сказанного ясно, что внутренняя структура сельскохозяйственной системы определяется соотношением между ресурсами и потреблением углерода (параметры ξ_2 , ξ_3) и между накопителями и стабилизаторами (параметр η_0). Они являются решающим фактором ее устойчивости и равновесия. Вот почему эти

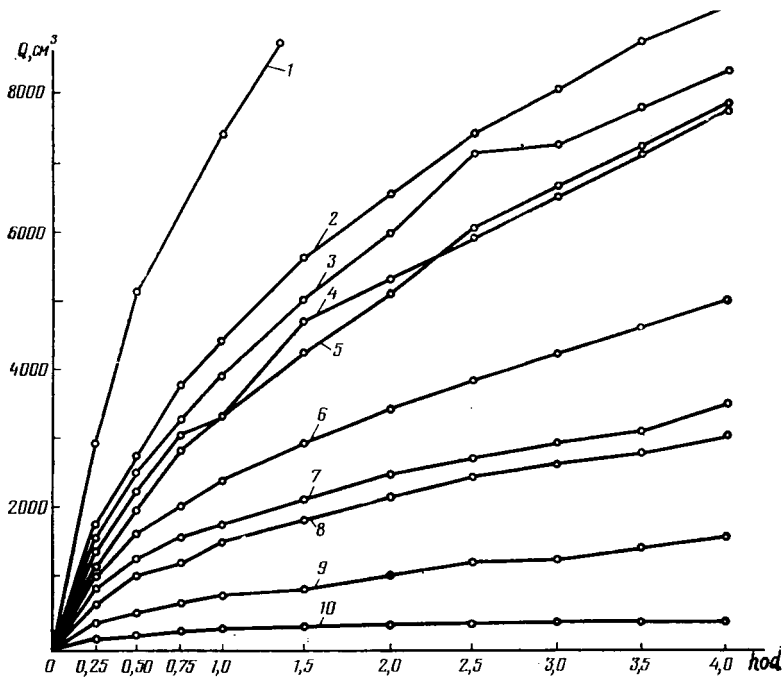


Рис. 6. Количество фильтрованной воды, прошедшее через колонку образцов почв, взятых в посевах разных культур.

1, 2 — многолетние травы; 3 — луговые травы; 4 — клевер; 5 — рожь; 6 — картофель; 7 — ячмень; 8 — овес; 9, 10 — ячмень.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вернадский В. И. Избр. соч. Т. 1. М.: Изд-во АН СССР, 1960.
2. Герциг Й., Жак И. — В сб. науч. работ ЧАСХН, т. XVIII, Прага, 1944, с. 297.
3. Герциг И. и др. Таблицы питательной ценности кормов. Прага, Госсельхозиздат, 1965.
4. Кудрна К. Определение оптимальной структуры сельскохозяйственной системы по методу углеродного баланса. — Растениеводство, т. 6, ИНТИСХ, Прага, 1984.
5. Кудрна К. Рекомендация подходов и методов разработки Программы развития чехословацкого сельск. хоз-ва и других отраслей, обеспечивающих население продовольствием. — В сб. науч. работ ЧАСХН, т. 19, Прага, 1984, с. 3—74.
6. Кудрна К. Методы системного проектирования в сельск. хоз-ве, Прага, 6, Сельскохоз. ин-т, 1985.
7. Салаев Р. К. Поглощение веществ растительной клеткой. М.: Наука, 1969.
8. Шпалдон Э. Отчет НИИ СПСХВ, Нитра, 1986.
9. Тюрин И. В. Органическое вещество почв и его роль в почвообразовании. М.: Сельхозгиз, 1937.
10. Кеен В. А. The physical properties of the soil. L., 1931.

Статья поступила 5 июня 1986 г.

SUMMARY

A systemic approach to acceleration of agricultural production intensification with simultaneous increasing the economic factors is discussed. Agricultural system is characterized as a complex dynamic system, and it is expressed as an aggregate scheme. It has been found that determining the measurable indications and parameters of the inner system structure and of its condition is the main point of the systemic approach. The parameters of conservative landscape elements, the parameter of estimating the sources of carbon, and the relationship between carbon resources and productivity of grain crops have been deduced. It is found that agricultural system develops according to strictly defined and definable regularities which affect its economic parameters.