

ЗАКОНЫ ЗЕМЛЕДЕЛИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ОТРАСЛИ РАСТЕНИЕВОДСТВА

Часть II. Использование расширенного перечня законов земледелия и растениеводства в учебном процессе

В. А. РАДОВНЯ, Д. А. РОМАНЬКОВ, А. С. МАСТЕРОВ

*УО «Белорусская государственная орденов Октябрьской Революции
и Трудового Красного Знамени сельскохозяйственная академия»,
г. Горки, Республика Беларусь, 213407*

А. Ч. СКИРУХА

*РУП «Научно-практический центр НАН Беларуси по земледелию»,
г. Жодино, Республика Беларусь, 222160*

(Поступила в редакцию 15.02.2024)

Сделаны предложения по формированию нового перечня законов земледелия, изучаемых в рамках учебной дисциплины «Земледелие». С помощью закона единства «организм-среда» вводятся элементы агроэкосистемы (совокупность среды и населяющих живых организмов) и направления взаимодействия между компонентами. С помощью Закона автотрофности зеленых растений определяются основные факторы жизни растений, их ведущая роль в агроэкосистеме в качестве преобразователей солнечной энергии в энергию химических связей, а также их влияние на почвенное плодородие. С помощью Закона равнозначности и незаменимости факторов жизни определяется мультипликативный характер их взаимодействия. Закон минимума и другие законы лимитирующих факторов предполагают различное влияние на продукционные процессы растений факторов жизни и их взаимодействие. Закон толерантности вводит понятие адаптивности растений, после адаптации в соответствии с парадоксом Закона минимума не один, а несколько факторов становятся важными для растений. Закон плодосмена и Закон возврата выступают не только в качестве биологических, но и экономических законов, что важно для оценки эффективности использования факторов жизни.

Предлагается расширенная формулировка Закона минимума, включающая в себя также Закон критических периодов и интенсивного потребления.

Делается вывод, что включение новых законов земледелия в состав традиционно изучаемых, а также логичная их систематизация и использование новых подходов к их пояснению позволят сформировать у студентов системное мышление по всем агрономическим дисциплинам, в том числе «Растениеводство».

Ключевые слова: законы земледелия, законы растениеводства, законы экологии, агроэкосистема, адаптация.

Proposals have been made for the formation of a new list of agricultural laws studied within the framework of the academic discipline "agriculture". Using the law of "organism-environment" unity, the elements of the agroecosystem (the totality of the environment and inhabiting living organisms) and the directions of interaction between the components are introduced. Using the Law of Autotrophy of Green Plants, the main factors of plant life are determined, their leading role in the agroecosystem as converters of solar energy into the energy of chemical bonds, as well as their influence on soil fertility. With the help of the Law of equivalence and irreplaceability of life factors, the multiplicative nature of their interaction is determined. The law of the minimum and other laws of limiting factors assume different influences of life factors and their interaction on the production processes of plants. The Law of Tolerance introduces the concept of plant adaptability; after adaptation in accordance with the paradox of the Law of the Minimum, not one, but several factors become important for plants. The law of fruit replacement and the law of return act not only as biological, but also economic laws, which is important for assessing the effectiveness of using life factors.

An expanded formulation of the Law of the Minimum is proposed, which also includes the Law of critical periods and intensive consumption.

It is concluded that the inclusion of new laws of agriculture in the traditionally studied ones, as well as their logical systematization and the use of new approaches to their explanation will allow students to develop systematic thinking in all agronomic disciplines, including crop production.

Key words: laws of agriculture, laws of crop production, laws of ecology, agroecosystem, adaptation.

Введение

В первой части статьи мы показали, что в научной литературе имеется ряд законов земледелия (далее – 33), которые имеют растениеводческую направленность, показывают ведущую роль растений в агроэкосистеме и учитывают их адаптивные способности. Несомненно, данные 33 необходимо использовать в учебном процессе в рамках учебной дисциплины «растениеводство».

Традиционно, в аграрном образовании курсы специальных учебных дисциплин начинаются с предмета «земледелие», теоретическая часть которого в том числе посвящена изучению факторов жизни растений и законов земледелия. И в дальнейшем, уже в рамках заданной системы координат, студенты усваивают поступающую информацию по другим предметам, в том числе по «растениеводству». Излишний механицизм, упрощенность биологических систем (вплоть до игнорирования их свойств), заложенные в классический перечень законов земледелия, могут затруднить сформировать у студентов системное мышление.

Целью настоящей работы мы поставили переработку перечня ЗЗ в рамках учебной дисциплины «земледелие» с тем, чтобы уйти от механицизма, заложенного в них в XIX веке, и освоить современные системные подходы в экологии, земледелии и растениеводстве.

Основная часть

К формированию расширенного перечня законов земледелия и растениеводства.

Механицизм классического перечня ЗЗ заложен уже в определении состава факторов жизни, который обычно ограничивается только внешними факторами: космическими (свет, тепло) и земными (вода, углекислый газ, элементы минерального питания). Перечнем таких условий (или параметров) предлагается упрощённая модель черного ящика (некая сложная система, устройство которой не выяснено), куда «входят» факторы жизни и «выходит» урожай. Во избежание такого упрощения некоторые авторы учебных пособий включают в состав факторов жизни внутренние факторы (вид, сорт растений и т.д.).

Растение (вернее – агроценоз) – это не «идеальный биореактор», это открытая система. Живые организмы обладают активностью, избирательностью потребления, и оказывают влияние на другие элементы системы (живые и неживые). При таком подходе космические и земные факторы жизни растений являются не «ресурсными входами», а внешней средой жизни растений, откуда растение потребляет необходимые количества и адаптируется к их недостатку или избытку. Поэтому факторы жизни являются не только ресурсами, но и регулируемыми элементами.

Генотип можно считать дополнительным фактором формирования урожая – внутренним фактором жизни, но более правильно рассматривать его в качестве элемента системы. Нужно сказать, что в современной экологии принято считать, что объект и среда в процессе обмена веществом, энергией и информацией не только проникают друг в друга, но даже меняются местами.

Мы согласны с авторами [10], которые начинают перечень законов земледелия и растениеводства с закона **XIII - Закон единства «организм – среда»** (жизнь развивается в результате постоянного обмена веществом и информацией на базе потока энергии в совокупном единстве среды и населяющих её организмов).

Как было показано выше, закон определяет объекты агроэкосистемы (совокупность среды и населяющих живых организмов) и направления взаимодействия между компонентами. Урожай теперь выступает в качестве только одного из выходов системы (хотя и главного), а факторы жизни оказывают влияние не непосредственно на урожай, а на всю экосистему, которая под их влиянием изменяет своё состояние. Это чрезвычайно важно для понимания принципов адаптивного растениеводства.

В качестве второго закона предлагается ещё один малораспространённый закон:

XXI – Закон автотрофности зелёных растений (зелёные растения, используя энергию солнечного света и поглощая из воздуха углекислый газ, а из почвы воду и минеральные соединения, синтезируют все необходимые им органические вещества в количествах, обеспечивающих полное развитие и высокую урожайность растений). Таким образом, Закон **XXI** объединяет теории фотосинтеза и минерального питания растений.

Некоторые авторы трактуют данный закон следующим образом: «Для получения запланированного урожая необходимо, чтобы в почве в достаточном количестве и непрерывно имелись вода, все необходимые минеральные питательные вещества в доступной растениям форме» [12, с. 15]. Другие на его основе выводят необходимость быстрого формирования листовой поверхности [2].

На наш взгляд эти следствия не вполне обоснованы. Закон автотрофности только определяет факторы жизни растений (А, В, С, D, F) и источник энергии (E). В качестве возможных следствий из этого закона предлагаем следующую формулировку: «Зелёные растения и другие фотоавтотрофные организмы являются первыми элементами биосистемы, преобразующих энергию солнца в энергию химических связей и таким образом вводящих её в агроэкосистему».

Данное следствие является основой для выведения **Закона возрастающего почвенного плодородия (V)** в котором растения имеют ведущее значение, как главные производители органического вещества – субстрата для размножения микробиоты, под действием которой происходит почвообразовательный процесс. Благодаря растениям и микробиоте почва продолжает развиваться, а продуктивность экосистемы (плодородие) постепенно увеличивается.

При такой подаче материала студенты уяснят, что при интенсивных технологиях плодородие почвы увеличивается не только за счёт увеличения поступления в почву НРК с минеральными и органическими удобрениями. Благодаря улучшению условий жизни растения увеличат производство биомассы, в том числе корневых выделений и корней, а благодаря активизации микробиологической де-

тельности будут улучшены химические и агрофизические свойства почвы и её производительная способность (т.е. плодородие почвы в полном его понимании).

В качестве следующего закона предлагается «классический» ЗЗ (I):

I – Закон равнозначности и незаменимости факторов жизни растений, который устанавливает, что ни один из факторов жизни растений не может быть заменён никаким другим.

В научной литературе не приводится математическое выражение данного закона. Исходя из его логического содержания мы представляем его в следующем виде (модель I):

$$Y = ABCDF \quad \text{модель I;}$$

где Y – урожай, $ABCDF$ – факторы жизни.

Биологическое значение данного закона мы видим только в определении характера связей: факторы жизни оказывают на продукционные процессы растений мультипликативное, а не аддитивное влияние. Некоторые авторы приписывают данному закону относительный характер, указывая, что потребность в факторах жизни для различных растений отличается. Мы считаем чрезмерно расширенным данное толкование закона, и не вносим в состав формулы поправочных коэффициентов.

Нужно сказать, что В.Р. Вильямс [20] в своём учебнике «Почвоведение» из всех ЗЗ привёл только данный закон, а также критику Закона убывающего плодородия, в ходе которой раскрыл проблемы взаимодействия факторов жизни. И в настоящее время В. Т. Васько [4] предлагает обобщить все общебиологические ЗЗ (I–III) в один **Закон соотношения факторов жизни**, но при этом большое внимание уделяет Закону критических периодов (VII).

Мы же считаем необходимым сохранить в учебном процессе ретроспективную подачу Закона лимитирующих факторов, которая позволяет лучше понять биологический смысл ЗЗ. И самое детальное рассмотрение должен получить **Закон минимума (IIa)**, который является, пожалуй, наиболее широко применяемым законом не только в земледелии и экологии, но и в экономике, и в образовании [19,21, 25, 28].

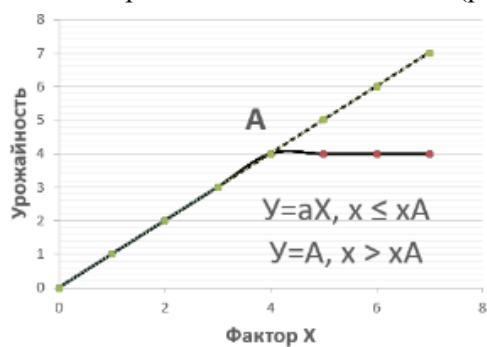
Сущность закона довольно проста и состоит в том, что величина урожая (и всякая производительность) определяется фактором, находящимся в минимуме.

Обычно в отечественных учебниках по земледелию [9] Закон минимума выражают в следующем виде (модель II):

$$Y=aX \quad \text{модель II;}$$

где Y – урожай; a – коэффициент пропорциональности для данного фактора; X – напряжение фактора.

Согласно модели II, закон позволяет ввести в модель I коэффициент пропорциональности для лимитирующего фактора и не рассматривать другие факторы (т.е. принять их за единицу). Однако в классической формулировке речь идёт именно об ограничении – о выходе урожая на плато в некоторой точке A при конечном значении x_A (рис. 1, модель III):



$$Y=aX, x \leq x_A$$

$$Y=A, x > x_A$$

модель III.

Рис. 1. Классическая модель закона минимума Либиха

Принято считать, что активная работа, проделанная Либихом по популяризации Закона минимума, немедленно произвела революцию в сельскохозяйственном производстве. На самом деле Закон минимума не получил однозначно положительного признания, долгое время подвергался критике, так как в полевых исследованиях часто не получал подтверждения. Знаменитый стационарный опыт на Ротемстадской опытной станции, который изначально планировался как кратковременный, был продолжен из-за научных разногласий между Лоусом и Гилбертом в Англии и Либихом в Германии [38].

Впоследствии были разработаны другие законы лимитирующих факторов: Закон максимума, Закон оптимума (II) и Закон совокупного действия факторов жизни (III). Было показано, что различные культуры для формирования урожая требуют разное количество факторов (т.е. было обосновано введение различных коэффициентов при переменных), факторы жизни по-разному взаимодействуют между собой (т.е. были введены понятия антагонизма, аддитивного или синергетического взаимодействия). Урожайность (вначале только прибавку урожая) стали описывать логистической, затем – квадратичной функцией (парабола), и ещё более точно – гауссианой (рис. 2). Последние две функции хорошо описывают не только интенсивность продукционных процессов, но и их итоговое значение (собственно урожайность).

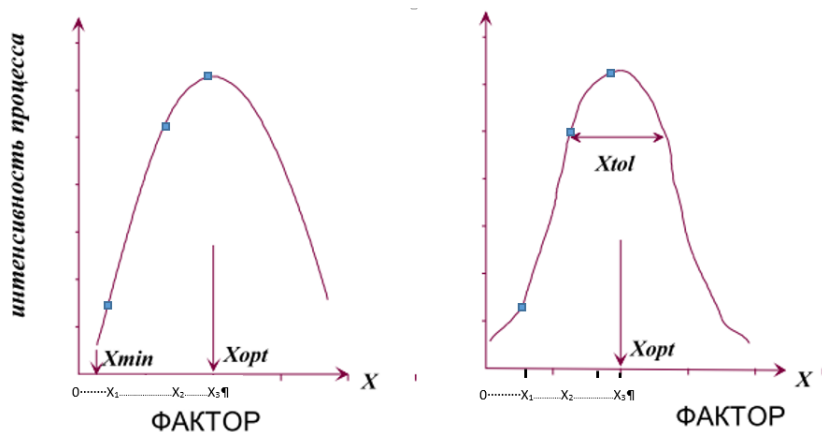


Рис. 2. Параболическая кривая и гауссиада (согласно [1])
 X_{min} – минимальное значение фактора, X_{opt} – биологический оптимум, X_{tol} – диапазон действующего фактора, в котором интенсивность процесса близка к оптимальному (диапазон толерантности)

Особенностью Закона минимума является то, что он описывает только рост в каждый определенный момент времени (интенсивность продукционных процессов). На определенных интервалах значений ($X_1 - X_2$, $X_2 - X_3$) Закон минимума может довольно точно описывать накопление урожая (рис. 2). В целом считается, что Закон минимума хорошо описывает только жизнедеятельность клетки или одноклеточных микроорганизмов (водоросли), но в применении к высшим растениям его точность чрезвычайно низкая [35].

Учитывая, что растения испытывают влияние целого ряда лимитирующих факторов в различные периоды роста, в сельскохозяйственных науках был введен Закон критических периодов (VII).

Некоторые исследователи выводят его как простое следствие из закона минимума, применительно к отдельным этапам развития [2]. Мы также считаем, что для сельскохозяйственных наук, где важна величина конечного урожая, Закон минимума должен объединяться с Законом критических периодов VIII, в том числе учитывать период интенсивного потребления. Например, в расширенной формулировке:

IIb – расширенный закон минимума: «Относительная и абсолютная потребность растений в факторах жизни различается по периодам роста и развития. Ограничение доступности фактора жизни (ресурса) в любой период лимитирует конечную биологическую продуктивность растений». Отметим, что в данной формулировке мы ограничиваем только величину биологического урожая, величина хозяйственного урожая может при этом не уменьшаться.

Важной поправкой и дополнением к Закону минимума служит закон:

XXII – закон неоднозначного (селективного) действия фактора на различные функции организма – любой экологический фактор неодинаково влияет на функции организма, оптимум для одних процессов (например, дыхания) не является оптимумом для других (например, питания) и наоборот [11].

В учебном курсе земледелия «классический» Закон лимитирующих факторов (II), как дальнейшее развитие Закона минимума, предлагается также дополнить Законом толерантности Шелфорда (XVII). Данный закон имеет аналогичное математическое выражение (парабола) и обычно в состав «классических» законов земледелия не вводится. Тем не менее именно этот ЗЗ показывает активную роль живых организмов в биосистеме – их способность адаптироваться к условиям среды. На самом деле, урожайность определяется не только количеством факторов жизни, но и способностью растения (или вернее всей агроэкосистемы) адаптироваться к изменяющимся условиям внешней среды. На примере

Закона толерантности становится заметен переход от ресурсного понимания факторов жизни к биологическому.

Ввиду того, что растения в полевых условиях испытывают не одно (как в Законе минимума), а несколько ограничений, была разработана альтернативная теория:

XXIII – гипотеза множественных ограничений, которая утверждает, что растения регулируют свои модели роста таким образом, что они одновременно ограничены несколькими ресурсами [28]. Данная теория предполагает, что адаптированный посев растений реагирует на ограничение ресурсов, распределяя внутренние ресурсы, чтобы смягчить это ограничение, не акцентируя внимание на приобретении других (не ограничивающих) ресурсов. Это создаёт динамическое равновесие, при котором с течением времени рост в равной степени ограничивается всеми ресурсами.

В целом, Закон минимума обычно поддерживается учёными, занимающимися растениеводством и агрономическими исследованиями, гипотеза множественных ограничений – исследователями по экологии растений [31].

А. Gorban [30] в своих работах по математическому обоснованию Закона минимума попытался ввести условное понятие «адаптационной энергии», или «энергия адаптации Селье», подразумевая под ней внутренний ресурс, затрачиваемый растениями для своей адаптации. И уже однофакторно-ресурсные модели адаптации (по Либиху) привели исследователя к Закону толерантности. На наш взгляд это вполне логическое заключение, если количество факторов жизни рассматривать не как «производственный запас материалов и комплектующих» в механистическом понимании земледелия, а как «давление фактора», которое в крайних значениях оказывает стрессовое воздействие на растения.

На основании своих теоретических исследований А. Gorban [30] выводит два парадокса:

Па – 1 Парадокс Закона минимума: если для случайно выбранной пары (состояние среды – состояние организма) действует Закон минимума (все ограничивается фактором, имеющим с наименьшее значение), то после адаптации многие факторы (максимально возможное их количество) становятся одинаково важными.

Па – 2 Закон Минимального обратного парадокса: если для случайно выбранной пары (состояние среды – состояние организма) множество факторов являются важными и сверхлинейно усиливают друг друга, то после адаптации наименьшее количество факторов остаётся важным (все ограничивается факторами с наименьшими некомпенсированными значениями, система приближается к Закону минимума).

Таким образом, гипотезу множественных ограничений также можно рассматривать в качестве частного случая Закона минимума, наблюдаемого после адаптации растений. Современное же понимание Закона минимума стало более биологическим – ориентированным на взаимодействия биологических систем разного уровня (клетка – организм – популяция) и далеко от линейно-дискретной формы, предложенной во времена Либиха.

В курсе земледелия (от Соколова, 1935 до Воробьёва, 1991) традиционно для объяснения Закона минимума, оптимума и максимума приводятся классические агрохимические примеры Гельригеля и Вольни, свидетельствующие, что все факторы жизни связаны, но при недостатке или избытке факторов урожай снижается [9, 16]. Такой упрощённый подход не объясняет студентам реальные причины снижения урожая.

В новом отечественном учебнике «Земледелие» (Никончик, Прокопович, 2014) лишь поверхностно указывается, что причинами снижения урожайности является замедление и прекращение жизненных процессов при минимальном и максимальном поступлении факторов жизни (температура, элементы питания, влажность) [8, с. 33]. Задачей земледельца при этом является обеспечение всех факторов в оптимальном количестве.

Отметим, что это подходы химико-технологического или интенсивного земледелия.

На самом деле любой недостаток либо избыток фактора жизни является для растений стрессом, к которому оно адаптируется при помощи различных механизмов и с различной скоростью. Урожайность в конечном счёте будет определяться тем, с каким успехом и за счёт каких механизмов растение адаптируется к новым экологическим условиям. Задачей земледельца при современном адаптивном подходе должен быть не только учёт количества факторов жизни и их восполнение, но и расширение возможностей растений адаптироваться к различного рода стрессам с минимальным расходом энергии, либо избежать их.

После введения понятия «адаптации растений» при рассмотрении ЗЗ становится более понятной биологическая сущность закона неравноценности и компенсирующего воздействия факторов среды

(vii): не факторы жизни способны компенсировать друг друга, а растения адаптируются к различному их количеству в системе (или поступлению в систему). При этом лимитирующие факторы обычно выступают в качестве регулирующих, которые индуцируют изменения в растении и в целом агроэкосистеме. Растения должны быть максимально полно обеспечены другими факторами жизни и «адаптационной энергией» (запасы энергии в растении, хорошее развитие корневой системы, развитие желательной и подавление нежелательной микрофлоры и др.), чтобы быстро адаптироваться к стрессам и не потерять потенциал продуктивности.

Закон плодосмена (vi) показывает, что одним из способов снижения количества стрессоров является севооборот. Как считает в.т. васько [4], закон плодосмена (vi), как и закон возврата (iv) выходят за пределы общебиологических законов жизни растений, т.к. Описывает взаимодействие не всех факторов жизни растений, а «... характеризует только почвенный блок». Следует указать, что автор при этом обобщает сугубо теоретические вопросы растениеводства и отношение растений к факторам жизни.

Но законы земледелия – это не только общебиологические законы жизни (или законы формирования урожая). Это руководящие принципы ведения земледелия (постольку, поскольку на их основе разрабатываются технологии возделывания и системы земледелия). И поэтому они должны содержать в себе основные подходы по экономике факторов жизни, т.е. Принципы хозяйственного их использования.

Нужно сказать, что закон плодосмена относительно недавно вернулся в учебники по земледелию. Закон возврата (iv), как самый главный закон земледелия, сформулированный ещё Либихом, также появляется в советских учебниках позднего периода (с 1970 х годов) с началом «широкой химизации сельского хозяйства».

Как закон плодосмена, так и закон возврата чрезвычайно важны, т.к. Объединяют биологические и экономические аспекты земледелия. Они дают понять, что в сельском хозяйстве важен не только урожай растений, но и плодородие почвы, при этом нужно учитывать затраты на выращивание урожая и на повышение почвенного плодородия, а повышение эффективности производства достигается не только за счёт увеличения поступления фактора жизни (удобрение или орошение), но и за счёт организации труда и перераспределения ресурсов.

В итоге после изучения 33 у студента должно сформироваться многовариантное мышление. Он должен понимать, что урожай формируется в результате взаимодействия генотипа с окружающей средой, урожай можно повышать не только за счёт увеличения прихода (или оптимизации) отдельных ресурсов, но и за счёт повышения адаптивности растений и управления ресурсами во времени. Оптимальное количество факторов не просто обеспечивает максимальный урожай, оно обеспечивает наиболее эффективное использование космических факторов жизни (свет, тепло) за счёт включения техногенных факторов (удобрения, орошения, управление посевами).

Заключение

Таким образом, разработан расширенный перечень законов земледелия для изучения в рамках учебной дисциплины «земледелие». Включение новых законов земледелия в состав традиционно изучаемых, а также логичная их систематизация и использование новых подходов к их пояснению позволят сформировать у студентов системное мышление по всем агрономическим дисциплинам, в том числе по предмету «растениеводство».

ЛИТЕРАТУРА

1. Шеин Е. В., Гончаров В. М. Агрофизика; Московский государственный университет. – Издательство: Феникс, 2006. – 400 с.
2. Агрохимия: учебное пособие / Под ред. А. Х. Шеуджена. 2-е изд., перераб. и доп. – Майкоп: Изд-во «Афиша», 2006. – 1075 с.
3. Вальков В. Ф., Денисова Т. В. Социально-экономические аспекты плодородия почв // Научная мысль Кавказа. – 2007. – №2 (50). – С. 38–43.
4. Васько В. Т. Теоретические основы растениеводства. – СПб: ПрофиИнформ, 2004. – 200 с.
5. Григулецкий В. Г. Новая математическая модель продуктивности подсолнечника в зависимости от площади питания растений // Масличные культуры. – 2021. – № 4(188). – С. 8–17.
6. Закон экологического оптимума В. Шелфорда (Закон толерантности). [Электронный ресурс]. – Экологический словарь, 2001. – Режим доступа: <http://bio.niv.ru/doc/dictionary/ecological/fc/slovar-199.htm#zag-300>. – Дата доступа: 15.01.2023.
7. Захваткин, Ю. А. Основы общей и сельскохозяйственной экологии: методология, традиции, перспективы. – М: Мир, 2003. – 360 с.
8. Земледелие: учебник / под ред. Н. И. Никончика, В. Н. Прокоповича. – Минск, ИВЦ Минфина, 2014. – 584 с.
9. Земледелие: учебник для студентов высших учебных заведений по агрономическим специальностям / С. А. Воробьев, А. Н. Каштанов, А. М. Лыков и др.; под ред. С. А. Воробьева, Ред. Е. М. Козина. – Москва: Агропромиздат, 1991. – 527 с. – Библиогр.: с. 519.
10. Зубарев Ю. Н., Елисеев С. Л. История и методология научной агрономии: учебное пособие; М-во с.-х. РФ, ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА. – Пермь: Изд-во ФГБОУ ВПО Пермская ГСХА, 2012. – 251 с.
11. Кирюшин В. И. Экологические основы земледелия. – М. Колос, 1996. – 367 с.

12. Современные технологии возделывания сельскохозяйственных культур: рекомендации / К. В. Коледа и др.; под общ. ред. К. В. Коледы, А. А. Дудука. – Гродно: ГГАУ, 2010. – 340 с.
13. Ларионов Ю. С. Закон плодородия почв – основа новой парадигмы сельскохозяйственного производства // Вестник Сибирской государственной геодезической академии. – 2015. – № 4(32). – С. 120–133.
14. Лихацевич А. П. Приближенная количественная оценка воздействия факторов окружающей среды на формирование урожая сельскохозяйственных культур // Мелиорация. – 2006. – № 1(55). – С. 95–102.
15. Муратов А. С., Поварич И. П. Синергизм и эмерджентность: генезис их гармонизации в экономике и управлении // Вестник КемГУ. – 2012. – №1. – С. 11–23.
16. Общее земледелие: учебное пособие для растениеводческих вузов / Н. С. Соколов. – Москва: Государственное издательство колхозной и совхозной литературы «Сельхозгиз», 1935. – 665 с.
17. Основные законы биологизации земледелия / Г. Жигэу. [Электронный ресурс]. – Lider-agro. Режим доступа: <https://lider-agro.md/?p=11418>. – дата доступа: 18.02.2023.
18. О роли научных понятий в земледелии / И. Я. Пигорев, В. Н. Наумкин и др. // Вестник Курской государственной сельскохозяйственной академии. – 2018. – № 1. – С. 4–10.
19. Портнов И. Не в бочке дело... // Учительская газета. – №37 от 15 сентября 2020.
20. Почвоведение. Земледелие с основами почвоведения: учебник для высших сельскохозяйственных учебных заведений / В. Р. Вильямс. – 5-е издание. – Москва: Сельхозгиз, 1947. – 456 с.
21. Сапогова Г. В. Роль естественных законов и экономических закономерностей в развитии аграрных технологических систем // Экономические науки. – 2011. – 1 (74). – С. 85–89.
22. Синергия. [Электронный ресурс] – Cybernetics Wiki. – Режим доступа: <https://cybernetics.fandom.com/ru/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BD%D0%B5%D1%80%D0%B3%D0%B8%D1%8F>. – Дата доступа: 15.01.2023.
23. Специальность 06.01.09 – растениеводство. – Приказ Высшей аттестационной комиссии Республики Беларусь от 15 мая 2018 г. № 125.
24. Сулов С. А. Законы растениеводства и земледелия // Вестник НГИЭИ. – 2012. – № 1(8). – С. 119–130.
25. Федорова Н. В. Методика определения общественно необходимых затрат в земледелии на основе дифференциации плодородия почв // Вестник Чувашского университета. – 2014. – № 1. – С. 260–268.
26. Шадже А. Е., Сиротюк Э. А., Шадже А. И. Словарь терминов по экологии. – Майкоп: Изд-во ФГБОУ ВО «МГТУ», 2016. – 92 с.
27. Шпаргалка по экологии [Электронный ресурс]. – Кафедра инженерной химии и промышленной экологии СПГУТД. Режим доступа: http://eco.sutd.ru/ecotest/docs/laws.htm#law_13. – Дата доступа: 15.01.2023.
28. Bloom, A. Resource limitation in plants - an economic analogy / A. Bloom, F. I. Chapin, H. Mooney // Annu. Rev. Ecol. Syst., 16 (1985), pp. 363–392.
29. Can We Harness “Enviromics” to Accelerate Crop Improvement by Integrating Breeding and Agronomy? // Frontiers in Plant. – 2021. – V.12
30. Gorban, A. Law of the Minimum Paradoxes / A. Gorban, L. Pokidysheva, E. Smirnova, T. Tyukina // Bulletin of mathematical biology. – 2010. – № 11.
31. Lynch, J. P. Edaphic stress interactions: Important yet poorly understood drivers of plant production in future climates / Jonathan P. Lynch // Field Crops Research. – Volume 283. – 2022.
32. Minimumgesetz [Electronic resource]. – Wikipedia. – Mode of access: [https://de.wikipedia.org/wiki/Minimumgesetz#:~:text=1909%20erschien%20dann%20Eilhard%20Alfred,\(Wirkungsfaktor\)%20die%20Ertragsh%C3%B6he%20steigern](https://de.wikipedia.org/wiki/Minimumgesetz#:~:text=1909%20erschien%20dann%20Eilhard%20Alfred,(Wirkungsfaktor)%20die%20Ertragsh%C3%B6he%20steigern). – Date of access: 15.01.2023.
33. Shelford's law of tolerance. [Electronic resource]. – Wikipedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Shelford%27s_law_of_tolerance. – Date of access: 15.01.2023.
34. Sinclair, T. R. Inadequacy of the Liebig Limiting-Factor Paradigm for Explaining Varying Crop Yields / T. R. Sinclair, W. I. Park // Agron. J. – 1993. – № 85. P. 742–746. Парадигма.
35. Tang, J. Finding Liebig 's law of the minimum / J. Tang, W. J. Riley // Ecological, 2021. – № 31 (8).
36. Villiers, B. A. The Law of Diminishing Return in Agriculture. [Electronic resource]. – Sabinet African Journals. – Mode of access: https://journals.co.za/doi/pdf/10.10520/AJA0000021_693. – Date of access: 15.01.2023.
37. Wit, C. T. Resource Use Efficiency in Agriculture / C. T. de Wit // Agricultural Systems, 1992. – № 40. – P. 125–151.
38. Johnston, A. E. The importance of long-term experiments in agriculture: their management to ensure continued crop production and soil fertility – the Rothamsted experience / A. E. Johnston, P. R. Poulton. – Eur. J. Soil Sci., 2018. – №69. –P. 113–125.