

«БОЧКА ДОБЕНЕКА» КАК МОДЕЛЬ РАСТЕНИЯ

В.А. РАДОВНЯ, кандидат сельскохозяйственных наук
ORCID ID: 0000-0002-1681-0118 E-mail: wladrad@tut.by

УО «БЕЛОРУССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ»,
Г. ГОРКИ, РЕСПУБЛИКА БЕЛАРУСЬ

Аннотация. Бочка Добенека – наиболее яркое изображение среди всех законов земледелия. Считается, что Бочка Добенека является аналоговой моделью Закона минимума и, соответственно, простейшей аналоговой моделью растения. «Бочка минимума» (оригинальное название) впервые появилась в 1903 г. в журнале *Illustrierte Landwirtschaftliche Zeitung*, как оторванная от какой-либо статьи иллюстрация. Общеизвестно, что авторство рисунку принадлежит главному редактору Арнольду фон Добенеку. Изображение Бочки Добенека широко распространилось во всём мире, со временем получив лишь незначительные изменения: изменились, а затем пропали надписи на клёпках бочки, появились источники воды – кран, а затем капли воды. Советскую интерпретацию «бочки минимума» следует называть «бочкой оптимума», т.к. в ней лучше изображён Закон оптимума. Кроме того, В. Реймерсом впервые с помощью ёмкостей с водой в соответствии с концепцией Бочки Добенека изображены и другие законы экологии. В данной статье Бочка Добенека рассматривается как в качестве аналоговой модели растения, так и в качестве произведения искусства, таящего в себе «дух времени». Она инсказательна, многогранна, содержит в себе философский подмысл. Как аналоговая модель Бочка Добенека соответствует структуре моделируемого объекта, но не растения, а всей агроэкосистемы, что было не до конца осмыслено современниками. Благодаря трехмерному изображению и большому количеству элементов, Бочка Добенека обладает определенным запасом развития. Недостатки бочки Добенека связаны в первую очередь с недостатками Закона минимума – дискретностью, детерминированностью, отсутствием учёта влияния генотипа на урожай и способности растений адаптироваться к условиям среды. Это ограничивает использование изображения в образовательном процессе и снижает её ценность как модель растения. В силу уникальной художественной выразительности предлагается и в дальнейшем использовать бочку Добенека в образовательном процессе. Однако для этого требуется усовершенствовать рассматриваемую модель, включив в неё другие законы земледелия.

Ключевые слова: Бочка Добенека, Закон минимума Либиха, законы земледелия, модель растения.

Для цитирования: Радовня В.А. «Бочка Добенека» как модель растения. *Зернобобовые и крупяные культуры*. 2024; 3 (51):58-69. DOI: 10.24412/2309-348X-2024-3-58-69

«DOBENEK BARREL» AS A PLANT MODEL

V.A. Radovnya

EDUCATIONAL INSTITUTION «BELARUSIAN STATE AGRICULTURAL ACADEMY»,
Gorki, Republic of Belarus

Abstract: *Dobenek Barrel is the most vivid image of all the laws of agriculture. The Dobenek Barrel is considered to be an analog model of the Law of the Minimum, and therefore the simplest*

*analog model of a plant. "Minimum Barrel" (original title) first appeared in 1903 in the magazine *Illustrierte Landwirtschaftliche Zeitung*, as an illustration torn from an article. It is generally accepted that the authorship of the drawing belongs to the editor-in-chief Arnold von Dobenek. The image of the Dobenek Barrel has spread widely throughout the world, having undergone only minor changes over time: the inscriptions on the rivets of the barrel changed and then disappeared, water sources appeared - a tap, and then drops of water. The Soviet interpretation of the "minimum barrel" should be called the "optimum barrel", because it better depicts the Law of Optimum. In addition, V. Reimers was the first to depict other laws of ecology using water containers in accordance with the Dobenek Barrel concept. In this article, Dobenek Barrel is considered both as an analog model of a plant and as a work of art that contains the "spirit of the times". It is allegorical, multifaceted, and contains a philosophical subtext. As an analogue model, Dobenek Barrel corresponds to the structure of the modeled object, not the plant, but the entire agroecosystem, which was not fully understood by contemporaries. Due to the three-dimensional image and a large number of elements, Dobenek Barrel has a certain reserve of development. The disadvantages of the Dobenek Barrel are primarily related to the disadvantages of the Law of the Minimum – discreteness, determinism, lack of consideration of the influence of the genotype on the yield and the ability of plants to adapt to environmental conditions. This limits the use of the image in the educational process and reduces its value as a plant model. Due to its unique artistic expressiveness, it is proposed to continue using Dobenek Barrel in the educational process. However, this requires improving the model under consideration by including other agricultural laws in it.*

Keywords: Dobenek Barrel, Liebig's Law of the minimum, laws of agriculture, plant model.

Введение. Бочка Добенека, являющаяся графическим изображением Закона минимума, уже более, чем столетие продолжает формировать мировоззрение специалистов. Уникальное сочетание передачи физического смысла Закона минимума и эмоциональной формы его предоставления делает бочку Добенека не простым дидактическим материалом, а своеобразным культурным феноменом, осмысление которого ещё ждёт своего времени.

Интуитивно-понятный смысл Закона минимума, заключающийся в ряде народных поговорок («Цепь так же крепка, как и ее самое слабое звено», «Где тонко — там и рвется»), тем не менее был изображён в форме бочки, имеющей клёпки различной высоты.

Использование *бочки* (нем. *der Bodden, die Tonne*) очень удачно, т.к. приводит к ряду вербальных ассоциаций:

- это основная мера объема сельскохозяйственной продукции в прежние времена;
- это обозначение метрической меры массы (тонна, децитонна – центнер);
- это убранный урожай, хранящийся в амбаре в бочках;
- это растение, произрастающее в деревянной кадке (цветочный горшок, или сосуд в вегетативном опыте) и нуждающееся в поливе и уходе.

Строение бочки, составленной из множества дощечек – клёпок, подсказывает комплексный характер плодородия почвы (*der Boden*), как совокупности содержащихся в ней минеральных соединений (воды и элементов питания) и других факторов, которые следует рассматривать как элементы плодородия.

При этом зрители не только понимают, что причины получения низких урожаев кроются в недостатке отдельных элементов плодородия, но и приходят к самостоятельным выводам, что земледелец способен отыскать причины низких урожаев и исправить их, подобно бондарю, который может починить бочку.

В общекультурном контексте бочку Добенека следует рассматривать как символ нового сельского хозяйства конца XIX века – начала коренной механизации, химизации и повышения наукоёмкости отрасли. В ней чувствуется дух того времени - века безграничной уверенности человека в свои силы. В то же время века, наполненного излишним антропоцентризмом и века преобладания механицизма в науке.

С научной точки зрения Бочка Добенека является точной моделью Закона минимума – пропорциональный рост при наличии фактора и выход на плато (прекращение роста) при отсутствии фактора. По большому счету это аналоговая модель растений, объясняющая и предсказывающая поведение объекта моделирования. И в настоящее время данная модель, несмотря на ряд недостатков, является отправной точкой для планирования экспериментов в агрономических науках, в первую очередь агрохимических.

И, конечно же, Бочка Добенека – наиболее яркое изображение среди всех законов земледелия, которое с самого начала образования определяет систему координат, в рамках которой студенты усваивают всю учебную информацию, поступающую за период обучения. Затем большинство специалистов в соответствии с этой моделью корректируют свою практическую деятельность.

В данной работе мы попытались проанализировать бочку Добенека, как модель растений, выделить её достоинства и недостатки.

Основная часть

История создания и развития Бочки Добенека

Более чем за столетний период своего существования Бочка Добенека настолько тесно ассоциировалась с Законом минимума Либиха, что стала называться бочкой Либиха. Такая упрощенная интерпретация привела к тому, что в некоторых статьях и даже учебных пособиях приводится информация: «Юстус фон Либих в 1840 г. изобразил свой закон в виде бочки».

На самом деле Ю.Либих не является автором бочки Добенека, и сам Закон минимума был не столько сформулирован им, сколько в своих работах он высказал основные идеи об ограничении урожая недостатком элементов питания. В настоящее время в немецкой и в целом в западной научной литературе общепринятой является точка зрения, что концепция Закона минимума была впервые сформулирована Карлом Шпренгелем в основных научных работах в 1826 и в 1828 гг., а его идеи были подхвачены и распространены Ю.Либихом в 1840-1855 гг. [1, 2]. Поэтому с учетом исторического развития R.R. van der Ploeg и др. [3] предлагают Закон минимума называть Законом минимума Шпренгеля-Либиха.

Только в 1903 году Арнольд фон Добенек, молодой главный редактор одного из ведущих сельскохозяйственных журналов Германии «Иллюстрированная сельскохозяйственная газета» (*Illustrierte Landwirtschaftliche Zeitung*), опубликовал графическую иллюстрацию закона, которую он назвал «бочкой минимума» (оригинальное название «Unsere Minimum-Tonne» – «наша бочка минимума») [4].

Следует отметить, что во время своей учёбы в Королевской баварской политехнической средней школе в Мюнхене среди учителей А. Добенека был Мартин Эвальд Вольни, который в то время на основе Закона минимума разрабатывал свой Закон оптимума.

Roberto Pantaleoni и др. [4] приводят подробный обзор, как менялось изображение бочки Добенека со временем. Приведём ключевые этапы.

Как было указано выше, «бочка минимума» впервые появилась в октябре 1903 г. Рисунок в журнале находился на странице 861 с подписью «Unsere Minimum-Tonne» (рисунок 1а). И что немаловажно, рисунок был оторван от какой-либо статьи, а был размещён в журнале именно как иллюстрация.

Изображение представляло собой деревянную бадью с отношением диаметра к высоте как $3 / 2$ с небольшой обратной конусностью из которой через самую низшую клёпку вытекала жидкость, обозначенная как «наибольший урожай». На клёпках были надписи названий химических элементов, света и тепла, в качестве минимального фактора жизни была приведена вода. Важно, что в бочке была предусмотрена некая неопределённость – клёпки на заднем плане обозначались как «неизвестные факторы произрастания».

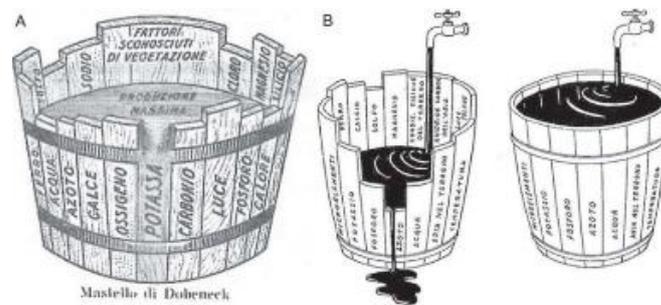


Рис. 2. Примеры генезиса бочки Добенека (согласно [4])

а) Воспроизведение оригинальной бадьи на образовательном плакате ("Fertilizzanti potassici SA – Милан", 1941 г.); б) бочка с краном и её оптимизированный вариант (Бонфильоли, 1958 г.)

Появление иллюстрации бочки Добенека не прошло незамеченным в России. Уже в 1905 г. в своей лекции К.А. Тимирязев (1948) приводил её в качестве примера Закона минимума: «... урожай зависит от того вещества или вообще условия, которого всего менее имеется».

Тем не менее в период 1930-1950 гг. в советских учебниках мы не находим изображений бочки Добенека.

В учебнике «Земледелие» (ряд изданий под редакцией С.А. Воробьева) изображение бочки Добенека появляется в 1970-годы (рисунок 3) и с тех пор является наиболее распространенным в отечественной литературе. На клёпках указаны цифры – содержание факторов жизни в процентах от оптимума и пунктиром приводится образ модели при полном оптимуме факторов жизни. По большому счёту это изображение является очередной интерпретацией «бочки оптимума». Возможно «благодаря» данному изображению в ряде отечественных учебных пособий различия между Законом минимума (который и должна описывать классическая Бочка Добенека) и Законом оптимума даются в довольно непоследовательной форме, а общий смысл всех законов заключается в необходимости оптимизации факторов жизни.

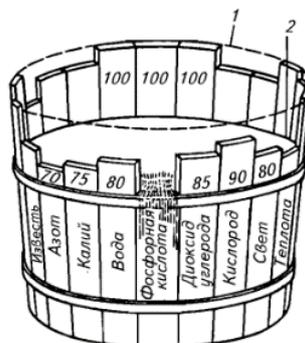


Рис. 3. Графическое изображение закона минимума (согласно [5])

1 – максимально возможный урожай; 2 – фактический урожай

В отечественной литературе [6] мы находим единственное принципиально новое изображение бочки Добенека, предложенное Н.В. Реймерсом, который с её помощью изобразил основные законы земледелия и экологии. Ограничения в урожайности и взаимодействия факторов жизни он показал с помощью дырок в бочке, расположенных на разной высоте (рисунок 4 а-в), а в случае превышения диапазона толерантности (давления отдельного фактора жизни) популяция прекращает своё существование - бочка опрокидывается (рисунок 4 г). Здесь прослеживается дальнейших уход от конкретизации факторов жизни (клёпки даже схематически не изображены), но представлены различные варианты поведения экосистемы в зоне минимума и в зоне максимума давления факторов.

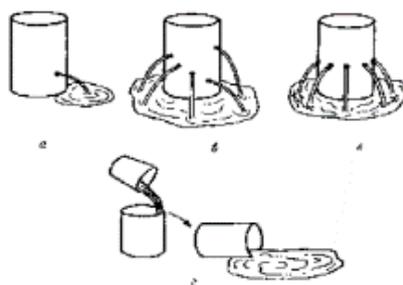


Рис. 4. Иллюстрация закона минимума по Н.В. Реймерсу (согласно [6])

а – Закон минимума, б – Закон равнозначности всех факторов жизни, в – Закон совокупного действия факторов (ряд отверстий на одном уровне), г - Закон толерантности (поток из ведра, переворачивающий бочку)

В настоящее время благодаря Википедии наибольшее распространение получило изображение бочки Добенека в форме собственно бочки [1, 2, 7] (приводится в статьях на русском, немецком и английском языках, дата создания изображения – апрель 2009 год). Действительно, данное изображение можно назвать наиболее удачным, т.к. оно включило в себя все предыдущие нововведения:

- использована форма бочки (усеченный эллипсоид), боковая проекция которой напоминает параболу – основную функцию сложных биологических процессов. Первоначально предложенная А. Добенеком прямая конусность придаёт «излишний оптимизм», позволяет думать, что даже небольшое удлинение клёпки позволит существенно больше увеличить объем воды (величину урожая);

- верхний обруч бочки отсутствует, что указывает на неустойчивость системы, возможность её изменения;

- с помощью капель воды указывается на поступление энергии в систему, но при этом рукотворный кран отсутствует, тем самым ограничивается излишний антропоцентризм;

- наименования клёпок не указываются, что предотвращает возможность манипуляций на подсознательном уровне, но в то же время позволяет более свободно давать названия клёпкам бочки в каких-либо частных случаях. Отсутствие надписей на клёпках позволяет относить к ограничивающим факторам не только первоначальные элементы плодородия (факторы жизни), но и болезни с вредителями, а также физиологические процессы растений (фотосинтез, дыхание и др.) и их генетические качества (например, устойчивость к полеганию, к стрессам и др.).



Рис. 5. Современный вид бочки Добенека [7]

Бочка Добенека как произведение искусства и как модель растений

У исследователей не вызывает сомнения, что иллюстрация бочки была авторским рисунком именно редактора журнала А. Добенека. Он обладал художественным талантом и делал множество иллюстраций самостоятельно [4]. Поэтому в статье мы используем термин «Бочка Добенека», указывая на авторство изображения, или «бочка минимума» в её

оригинальном названии. Наименование «бочка Либиха», приводимое в некоторых источниках, следует считать некорректным.

Бочка Добенека в своё время была создана молодым редактором, вероятно, с единственной целью – изобразить Закон минимума и пропагандировать необходимость внесения удобрений. Вместе с тем, к иллюстрации в журнале «бочки минимума», полностью оторванной от поясняющего текста, стоит в какой-то мере относиться как к произведению искусства, смысл которого должен быть понятен для своих современников.

Бочка Добенека иносказательна, в её изображении нет самого растения, или атрибутов, указывающих на него. Надписи на клёпках чётко указывают, что это факторы жизни, которые вмещают в себя (или ограничивают) максимальный урожай – воду, которая вытекает через край. Собственно, урожай можно было бы представить более доходчиво, например, в форме высыпавшегося через край зерна – главной сельскохозяйственной продукции того времени, которая хранилась в бочках. Собственно, бочками (тоннами) мы измеряем её до сих пор. Но А. Добенек представил его всё-таки в виде воды, что придаёт изображению некий философский смысл.

Поступление воды извне, сперва понимаемое интуитивно (в оригинальном варианте вода всё-таки вытекала из бадьи, следовательно, должна была поступать), но дорисованное лишь полстолетия спустя, по нашему мнению является гениальным художественным открытием А. Добенека, получившим своё научное обоснование четвертью века позже в рамках новой научной дисциплины – экологии. В настоящее время посев сельскохозяйственных растений (точнее – вся агроэкосистема) рассматривается в качестве открытой системы, в которую поступает энергия. И в бочке Добенека вода (поступающая в систему энергия) превращается в урожай, размер которого определяется наличием факторов жизни.

Если же бочку Добенека рассматривать как модель растений, к её достоинствам следует отнести простоту и лаконичность изображения. Модель – аналоговая, т.к. биологический продукционный процесс описывается схожим процессом, но имеющим иную физическую природу (наполнение бочки водой).

Трёхмерное изображение и возможность использования множества элементов (количество клёпок, ширина и высота бочки, её конусность, высота и ширина клёпок) позволяет вводить в модель большое количество факторов, оказывающих влияние как на величину урожая, а также взаимодействующих между собой. Однако в данной модели факторы не учитываются до момента, пока какой-то из них не станет минимальным.

В целом, модель описывает не весь продукционный процесс растений, а только два частных случая – рост растения (накопление урожая, т.е. формирование биомассы) при недостатке всех факторов жизни, или прекращение роста при достижении каким-либо фактором минимального уровня. Кроме того, предполагается третье (потенциальное) состояние системы – достижение максимального урожая при оптимизации всех факторов жизни.

Таким образом, модель полностью соответствует Закону минимума Либиха в его первоначальной формулировке.

Нужно согласиться, что если бы А.Добенек использовал для изображения Закона минимума вполне логичную концепцию «слабого звена цепи», с помощью которой, например, вытаскивают ведро воды из колодца, или поднимают мешок зерна в амбаре, это бы изображение не имело бы такого феноменального успеха. В такой модели количество переменных факторов было бы более ограниченным (фактически только звенья цепи различной толщины), а урожай представал бы в форме ограниченного объекта (мешок), размер которого невозможно увеличить.

Изображение ведра воды, наполненного до различного уровня, было бы более удачным, но возможность падения ведра придала бы изображению негативную окраску. Бочка Добенека, напротив, заряжает оптимизмом и показывает, что успех совсем близок, нужно приложить лишь некоторые усилия.

Кроме того, модель растения «ведро воды, поднимаемое на цепи» плохо отражает процесс формирования урожая, т.к. содержит в себе элементы дискретности - наполнение воды (или зерна) происходит порционно, в какой-то момент цепь разрывается и ведро падает.

Главным достоинством бочки Добенека, как модели растения, нужно считать то, что в ней идеально представлена сама суть моделируемого объекта (его элементы и связи). Вода в бочке – это биологический урожай – масса одного растения или всего посева (а ещё более точно – содержание в ней энергии). Бочка – это не только растение (в котором протекают разнообразные физиологические процессы), это вся агросистема во всей совокупности живой и неживой природы, взаимодействующей между собой, оказывающая влияние на формирование урожая. Высота клёпки бочки, соответственно, это количество фактора жизни, которое растение может усвоить из агроэкосистемы. Это принципиальный момент, упускаемый многими исследователями, – не наличие фактора жизни в агросистеме, а именно доступное для растения (т.е. для формирования урожая) количество фактора.

В классическом виде бочки количество клёпок и их ширина не обсуждаются и считаются условными. Единственным параметром является высота наименьшей клёпки – фактора, находящегося в минимуме.

Во время А. Добенека главной задачей в сельском хозяйстве являлось внесение в агросистему нового вещества (удобрений), т.к. за предыдущие годы активного капиталистического развития почвы Западной Европы были значительно истощены. Замена (увеличение высоты) клёпок в бочке Добенека и означает необходимость поступления в систему дополнительного вещества.

К сожалению, современники А. Добенека не осознали глубокий смысл, заключённый в «бочке минимума», где питательные вещества, и даже энергия (свет и тепло) представлены как элементы системы, которая определяет продуктивность растений, а не просто влияет на неё. В агрохимии, и в целом в земледелии, первоначально получил развитие физико-химический подход, который рассматривает питательные элементы всего лишь как внешние входные факторы, тогда как они являются именно элементами системы. Однако в настоящее время подходы в области агрохимии пересматриваются [8].

Почему бочка Добенека является моделью растений, а не простой иллюстрацией Закона минимума? Потому что она объясняет некоторые другие законы земледелия, но главное позволяет моделировать – предсказывать состояние объекта (посева растений или природной экосистемы) при различной обеспеченности факторами жизни.

Вместе с тем, при всех своих достоинствах, Бочка Добенека, как модель растения, обладает главным недостатком, свойственным самому Закону минимума. Она недостаточно адекватна своему прототипу, т.е. мало соответствует поведению посева растений в полевых условиях.

Еще при жизни Ю. Либиха не прекращались дискуссии, что в контролируемых условиях вегетационного опыта рост одиночных растений в сосудах (особенно, наполненных песком), действительно, прекращается при создании дефицита воды или остром недостатке элементов питания. Однако в полевых условиях данная закономерность часто не подтверждалась. Итогом дискуссий стала разработка последующих законов земледелия и экологии (законы максимума, оптимума, совместного действия факторов жизни).

Напомним, математическим выражением Закона минимума является логистическая функция (в более приближенных интерпретациях – линейная кусочно-дискретная), которая описывает активность ферментов и, соответственно, отдельные биологические процессы (например – фотосинтез). Между тем, известно, что формирование урожая, развитие популяций и другие комплексные биологические процессы описываются параболой (еще более точно – гауссианой). Таким образом, Закон минимума описывает не процесс формирования конечного урожая, а именно рост (интенсивность продукционных процессов) в каждый определенный момент времени.

Во многих формулировках Закона минимума (особенно в литературе по экологии и агрофизике) приводится, что лимитируется именно интенсивность или скорость роста [7, 9]. Современные исследования показывают, что Закон минимума в классической интерпретации

хорошо описывает жизнедеятельность отдельной клетки или одноклеточных микроорганизмов (водорослей), но в применении к высшим растениям его точность чрезвычайно низкая [10].

Поэтому, нужно констатировать, что Бочка Добенека в её современном виде отражает формирование урожая только в конкретный момент времени – в растении протекают ростовые процессы, или рост остановлен по причине достижения минимума фактора жизни. Для имитации динамики продукционного процесса следовало бы изобразить нескольких бочек в ряд, например, в критические периоды вегетации (причем в каждый период времени лимитирующими окажутся различные факторы). Но тогда в модели «Бочка Добенека» потеряется главное её достоинство – целостность конструкции, простота проблемы и ясность решения.

Можно предположить, что само появление бочки Добенека было отражением нового понимания Закона минимума. Данное им название «наша бочка минимума» является своеобразным вызовом, новым заявлением в поддержку Закона минимума. Совершенно логично, что если биологический (продукционный) процесс при недостатке факторов жизни не находит физического обоснования (что видно из рисунка), он попросту невозможен.

Действительно, в начале Закон минимума постулировал только ограничение урожая фактором, находящимся в минимуме. Но со временем из него стали выводить различные следствия и новые законы, в том числе:

– Закон оптимума, заявляющий о необходимости оптимизации количества всех факторов жизни (в бочке все клёпки должны быть одинаковой длины);

– Закон равнозначности и незаменимости факторов жизни, который по большому счёту нужно рассматривать как крайний случай Закона минимума, в бочке Добенека можно изобразить, как полное отсутствие какой-либо клёпки.

В итоге, в настоящее время с помощью современного математического аппарата из Закона минимума уже выводят Закон толерантности [11].

Закон совокупного действия факторов жизни Э. Митчерлиха в первоначальной редакции звучал как «Закон минимума и закон убывающей урожайности почвы» [12], т.е. рассматривался автором как дальнейшее развитие закона минимума.

Недостатком Бочки Добенека также является то, что она плохо описывает Закон максимума. Максимальная высота клёпок (количества факторов) не оказывает никакого отрицательного влияния. Как было видно на рисунке 1b американские авторы решили данную проблему и использовали клёпку «жара», обозначающую по сути избыток (максимальное поступление) тепла.

Модель «Бочка Добенека» не учитывает взаимодействие факторов жизни (Закон совокупного действия), их компенсирующее и регулятивное воздействие на растения (Закон неравноценного и компенсирующего действия факторов жизни, Закон взаимокомпенсации регуляторных факторов).

Кроме того, модель бочки, как рукотворного объекта, совершенно не учитывает способность растений и посевов самостоятельно адаптироваться к условиям внешней среды (Закон независимой адаптации растений, Закон активности растений, Закон критических периодов). При этом Бочка Добенека не отображает значение генотипа в формировании урожайности, хотя и содержит в себе эти возможности (например, пунктирное изображение полностью наполненной бочки на рисунке 3 можно показать с большей конусностью; это даст понять, что при оптимальном сочетании всех факторов жизни и использовании наилучших генотипов объем воды в бочке, т.е. урожайность, увеличится). А без использования данных законов земледелия невозможен переход к биологизированным и адаптивным системам земледелия [12].

Все специалисты и ученые, осознанно или неосознанно пользующиеся в своей практике данной моделью, ориентированы на замену клёпок бочки большей длины (оптимальной или максимальной в зависимости от уровня интенсификации технологий и степени рискованности их применения). Это означает внесение в агроэкосистему

дополнительной энергии и вещества – удобрение, интенсивная обработка почвы и др. В то время как процессы перераспределения в системе энергии, возможность преимущественного использования даровых природных ресурсов взамен технократическим остаются без должного внимания.

Следовательно, для формирования современного биологизированного мировоззрения специалистов требуется новое изображение законов земледелия и растениеводства, по своей художественной выразительности не уступающее бочке Добенека. И нужно признать, что никакие «точные формулировки» законов земледелия, их обоснования в виде графиков и таблиц до сих пор не дали образовательный эффект, равноценный «бочке минимума».

Имеется два выхода из сложившейся ситуации:

1) отказаться от использования бочки Добенека в образовательном процессе, либо приводить её изображение в ретроспективной форме подачи учебного материала с полным анализом её недостатков;

2) разработать новую бочку Добенека, которая в отличие от классического вида будет являться более точной (адекватной) моделью растений. Для этого модель должна содержать в себе несколько законов земледелия и растениеводства, учитывать адаптивные свойства растений, взаимодействие факторов жизни, влияние на урожайность стрессовых условий (в том числе максимального или избыточного поступления факторов).

Нужно сказать, Бочка Добенека имеет несомненный запас развития. Введение в данную модель дополнительных параметров и, главное, связей между элементами значительно повысит её адекватность моделируемому объекту – агроэкосистеме. При этом выразительность и художественная ценность сохранятся, что также немаловажно для образовательных целей.

Заключение

В бочке Добенека художественная выразительность и иносказательность парадоксально соединены с физической точностью изображаемых предметов. В ней предвосхищено понимание сельскохозяйственных посевов как открытых биосистем – единства элементов живой и неживой природы.

Бочка Добенека – это одна из первых аналоговых моделей растений. В ней продукционные процессы роста растений (накопления биомассы) заменены аналогичным физическим процессом – заполнение бочки водой. Это в целом точно отражает суть Законов минимума и оптимума, но не учитывает многие другие законы земледелия.

При этом следует признать структуру модели очень удачной. Она соответствует объекту моделирования и обладает возможностями к дальнейшему совершенствованию. Вместе с тем, содержащийся в ней алгоритм (Закон минимума в первоначальной его интерпретации) не позволяет использовать её для точного моделирования продукционных процессов. Поэтому модель растений «Бочка Добенека» следует рассматривать скорее как качественную модель, отражающую структуру объекта и связи его элементов, но не позволяющую проводить количественные расчёты продукционных процессов.

В современной научной работе используются, преимущественно, математические модели растений, в которых урожайность рассчитывается как конечный показатель основных продукционных процессов (фотосинтез и дыхание). В более современных моделях проводится последующая корректировка эффективности продукционных процессов с учётом лимитирующих и стрессовых факторов, некоторые модели учитывают влияние генотипа. В таких моделях используется большое количество параметров, за счет чего повышается их точность. Однако данные модели громоздки и главное – в силу своей абстрактности сложны для обобщенного понимания.

Поэтому, несмотря на наличие современных моделей растений, и в настоящее время аналоговая модель растений «Бочка Добенека» широко используется в образовательных целях - вероятно, благодаря её высокой художественной выразительности и целостности изображаемого объекта. И, как ни парадоксально, Бочка Добенека до сих пор формирует механистическое мировоззрение наших будущих специалистов, ориентированных на

прямолинейные решения, не учитывающие взаимодействие факторов и не допускающие многовариантность.

В связи с этим, требуется внести поправки в данную модель и переработать изображение бочки, где лучше отобразить системную структуру агроэкосистемы и показать другие законы земледелия, также влияющие на продукционные процессы растений.

Литература

1. Liebig's law of the minimum [Electronic resource]. - Wikipedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Liebig%27s_law_of_the_minimum. – Date of access: 15.01.2023.
2. 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.
3. Ploeg R., Böhm W., Kirkham M. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum // *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999. -№ 63. - Pp. 1055-1062. DOI:10.2136/sssaj1999.6351055x
4. Roberto A. Pantaleoni, Luigi Mariani e Giovanni Ferrari, *Il mastello di Dobeneck* / in Rivista di Storia dell'Agricoltura a. LX. - №. 2. - 2020. - pp. 119-132. DOI: 10.35948/0557-1359/2021.1769
5. Баздырев Г. И. Земледелие с основами почвоведения и агрохимии. - М.: Колос, 2009. - 415 с.
6. Основы экологии и экологическая безопасность: Учеб. пособие под ред. В.В. Шкарина, И.Ф. Колпакшиковой. - Нижний Новгород: Изд-во НГМА, 1998. - 172 с.
7. Закон ограничивающего фактора [Электронный ресурс]. – Википедия. - Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%8E%D1%89%D0%B5%D0%B3%D0%BE_%D1%84%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0. – Дата доступа: 25.01.2023.
8. Lemaire G., Tang L., Bélanger G. Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture // *European Journal of Agronomy*, 2021. - Volume 125. – Pp. 126 -148. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126248
9. Агрофизика / Е. В. Шеин, В. М. Гончаров. Московский государственный университет. - Издательство: Феникс, 2006. - 400 с.
10. Sinclair T. R., Park W. I. Inadequacy of the Liebig Limiting-Factor Paradigm for Explaining Varying Crop Yields // *Agron. J.*, 1993. - №85: - Pp. 742-746. DOI:10.2134/agronj1993.00021962008500030040x
11. Gorban A., Pokidysheva L., Smirnova E. Law of the Minimum Paradoxes // *Bulletin of mathematical biology*. - 2010. - № 11. DOI: 10.1007/s11538-010-9597-1
12. Радовня В.А., Романьков Д.А. Законы земледелия в применении к отрасли растениеводства. // Вестник Белорусской государственной сельскохозяйственной академии: научно-методический журнал. - 2024. - № 1. - С. 125-133.

References

1. Liebig's law of the minimum [Electronic resource]. - Wikipedia. – Mode of access: https://en.wikipedia.org/wiki/Liebig%27s_law_of_the_minimum. – Date of access: 15.01.2023.
2. 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.
3. Ploeg R., Böhm W., Kirkham M. On the Origin of the Theory of Mineral Nutrition of Plants and the Law of the Minimum. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1999, no. 63, pp. 1055-1062. DOI:10.2136/sssaj1999.6351055x
4. Roberto A. Pantaleoni, Luigi Mariani e Giovanni Ferrari, *Il mastello di Dobeneck*, in Rivista di Storia dell'Agricoltura a. LX, n. 2, dicembre 2020, pp. 119-132. DOI: 10.35948/0557-1359/2021.1769
5. Bazdyrev G. I. Agriculture with the basics of soil science and agrochemistry. Moscow: Kolos, 2009, 415 p. (in Russian).
6. Fundamentals of Ecology and Environmental Safety: Textbook edited by V. V. Shkarina, I. F. Kolpakshchikovej. - Nizhnij Novgorod: Izd-vo NGMA, 1998, 172 p. (in Russian).

7. The Law of the Limiting Factor [Electronic resource]. – Wikipedia. - Mode of access: https://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%97%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D0%BD_%D0%BE%D0%B3%D1%80%D0%B0%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B8%D0%B2%D0%B0%D1%8E%D1%89%D0%B5%D0%B3%D0%BE_%D1%84%D0%B0%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%B0. – Date of access: 25.01.2023. (in Russian).
8. Lemaire G., Tang L., Bélanger G. Forward new paradigms for crop mineral nutrition and fertilization towards sustainable agriculture. *European Journal of Agronomy*, 2021, V. 125, pp. 126-148. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126248
9. Shein E. V., Goncharov V. M. Agrophysics. *Moskovskij gosudarstvennyj universitet. - Izdatel'stvo: Feniks*, 2006, 400 p. (in Russian).
10. Sinclair T. R., Park W. I. Inadequacy of the Liebig Limiting-Factor Paradigm for Explaining Varying Crop Yields. *Agron. J.*, 1993, no.85, pp. 742-746. DOI:10.2134/agronj1993.00021962008500030040x
11. Gorban A., Pokidysheva L., Smirnova E. Law of the Minimum Paradoxes. *Bulletin of mathematical biology*, 2010, no. 11. DOI: 10.1007/s11538-010-9597-1.
12. Radovnya V. A, Roman'kov D. A. Laws of agriculture as applied to the plant growing industry. *Vestnik Belorusskoj gosudarstvennoj sel'skohozyajstvennoj akademii: nauchno-metodicheskij zhurnal*, 2024, no. 1, pp. 125-133. (in Russian).