

Ноосферология

УДК 007

DOI: 10.17277/voprosy.2017.04.pp.29-40

ВЕРНАДСКИЙ, ЭВОЛЮЦИЯ И УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ

Н. С. Попов, О. В. Пещерова, А. А. Чуксин

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный технический университет», г. Тамбов, Россия;

ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия

Рецензент д-р техн. наук, профессор В. Н. Шамкин

Ключевые слова: биогеохимические принципы; Вернадский; кибернетика; ноосфера; устойчивое развитие; целеустремленные системы; эволюция.

Аннотация: Проведен анализ проблемы устойчивого развития, возникшей на современном этапе эволюции биосферы. Основу анализа составили биогеохимические принципы Вернадского, представленные в кибернетическом варианте. Действия «живого вещества» в биосфере отождествлены с поведением целеустремленных систем. Ряд особенностей, свойственных биологическим видам, описан на языке математического программирования. Сделан ряд выводов, полезных при реализации стратегии устойчивого развития.

Сейчас мы переживаем новое геологическое эволюционное изменение биосферы. Мы входим в ноосферу.

В. И. Вернадский, 1944 г.

В 2018 году исполнится 155 лет со дня рождения выдающегося ученого XX столетия – академика Владимира Ивановича Вернадского. Его научная, просветительская и общественно-политическая деятельность хорошо известна в нашей стране и за рубежом. Труды ученого обогатили мировую сокровищницу знаний и стали неисчерпаемым источником вдохновения для тех, кто сегодня работает над проблемами эволюции биосферы, выживания человечества, сохранения биоразнообразия и охраны природы.

Попов Николай Сергеевич – доктор технических наук, профессор кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», e-mail: esco@nnn.tstu.ru; Пещерова Ольга Викторовна – ассистент кафедры «Природопользование и защита окружающей среды», ТамбГТУ, г. Тамбов, Россия; Чуксин Антон Андреевич – студент, ФГБОУ ВО «Тамбовский государственный университет им. Г. Р. Державина», г. Тамбов, Россия.

В последние десятилетия имя Вернадского по праву связывают с глобальной проблемой современности – устойчивым развитием цивилизации, поскольку именно его исследования поведения «живого вещества»¹ в биосфере привели к заключению о возникновении очередного этапа в геологической истории Земли, именуемого ноосферой (сферой разума).

В работе [1] ученый пишет: «Он (человек) может и должен перестраивать своим трудом и мыслью область своей жизни, перестраивать коренным образом по сравнению с тем, что было раньше», и далее «...Человек должен теперь принимать все большие и большие меры к тому, чтобы сохранить для будущих поколений никому не принадлежащие морские богатства». Эти мысли близки по сути к определению «устойчивое развитие», сформулированному в 1987 г. в докладе «Наше общее будущее» Международной комиссии по окружающей среде и развитию: «устойчивое развитие – это такое развитие, при котором удовлетворяются потребности настоящего времени, но не ставится под угрозу способность будущих поколений удовлетворять свои потребности».

Идея устойчивого развития, появившаяся в программах ООН примерно в 70-х гг. прошлого века, оказалась объективным отражением многочисленных проблем, возникших на Земле в связи с ростом численности населения, нехваткой продовольствия, загрязнением среды обитания, дефицитом энергоресурсов, ростом заболеваемости людей и т.п. С позиции Вернадского процесс трансформации биосферы в ноосферу объективен, закономерен и необратим. Вопрос состоит в том, какой «должна» быть деятельность человека, чтобы траектория движения цивилизации в будущее соответствовала оптимальной, в смысле одновременного развития экономики, природы и общества.

Особенности данного комплексного процесса таковы, что ставят под сомнение возможности достижения «оптимальности» по каждой из его составляющих в отдельности. Назовем только некоторые из них:

1) впервые в истории естественного (стихийного) развития биосферы человек пытается поставить процесс эволюции под свой контроль, меняя действовавшие правила «игры с природой» и принимая на себя ответственность за возможные последствия. В какой мере он осознает свою ответственность – вопрос остается открытым;

2) оптимальная траектория развития цивилизации – это достижение компромисса между экономическими, экологическими и социальными показателями. Для экономики и социальной сферы данные показатели устанавливает человек и принимает на их основе решения. Природа, в известном смысле, является «пассивным» участником «переговорного процесса» и не может в нем отстаивать свои приоритеты «на равных». За нее принимает решения опять же человек и не всегда делает это объективно;

3) учет потребностей будущих поколений людей подразумевает процесс планирования с горизонтом в 20 и более лет, что резко снижает доверие к его результатам. Весь смысл такого планирования состоит в «конструировании будущего», в условиях возможной смены технологических укладов, общественных формаций, использования систем искусственного интеллекта, действия новых мировых вызовов и т.д.

¹ По Вернадскому «живое вещество» есть совокупность всех живых организмов, находящихся на Земле в данный период времени.

С учетом названных особенностей варианты решения проблемы устойчивого развития должны базироваться на объективных законах природы и истории эволюции биосферы, насчитывающей миллиарды лет. Только при условии понимания механизмов трансформации геосфер под действием «живого вещества» должны выстраиваться образы будущего, соответствующие цивилизационному прогрессу. По Вернадскому основу эволюции Земли составляет биогеохимическая функция «живого вещества», в связи с чем им сформулированы три важнейших биогеохимических принципа, являющихся эмпирическим обобщением сведений о состоянии биосферы в различных геологических периодах [1].

Целью данной работы является анализ биогеохимических принципов с кибернетических позиций, что позволяет по-иному осмысливать эволюционный процесс и одновременно ответить на вопрос Вернадского о том, каким образом мысль способна изменять материальные процессы [1, с. 349].

Первый биогеохимический принцип утверждает следующее: *биогенная миграция атомов химических элементов в биосфере всегда стремится к максимальному своему проявлению.*

Семантический анализ данного принципа позволяет сделать ряд полезных выводов:

1) «живое вещество» относится к классу целеустремленных систем [2], поскольку при сложившихся внешних условиях «всегда стремится» к достижению цели;

2) целеустремленное поведение «живого вещества» наделено возможностью выбора полезных биогенных веществ и направляется целью;

3) цель системы – максимизация потоков элементов питания и энергии через «живое вещество».

При описании параметров состояния целеустремленной системы воспользуемся терминологией из работы [2].

На рисунке 1 «живое вещество» назовем объектом A , осуществляющим выбор ресурсов в окружении S . Способы действий «живого вещества» C_i , $i = 1, m$, представляют собой качественно различные типы поведения A в структурно определенном окружении (местообитании), а O_i – возможные при таком окружении результаты, например, продуктивность «живого вещества». Под продуктивностью здесь будем понимать скорость усваивания (накопления) биогенных веществ и энергии в тканях «живого вещества».

Из-за неопределенности поведения субъекта A выбор C_i определяется вероятностью того, что A продуцирует C_i в S

$$P_i = P\{C_i | A \text{ в } S\}. \quad (1)$$

Эффективность системы действий E_{ij} также оказывается вероятностной мерой

$$E_{ij} = P\{O_j | A \text{ выбирает } C_i \text{ в } S\}, \quad (2)$$

означающей вероятность того, что C_i продуцирует O_j в S , в случае его выбора субъектом A . Эффективность способа действия повышается, если C_i удовлетворяет целям возможно большего числа организмов, входящих в состав «живого вещества».

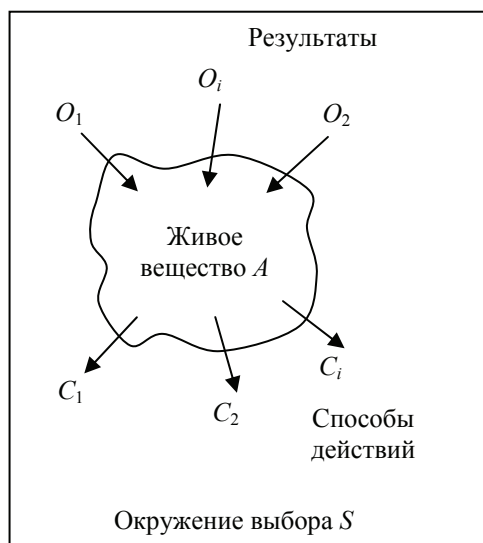


Рис. 1. Концептуальная схема целеустремленного состояния «живого вещества» в собственном окружении

Наконец удельную ценность результата O_j представим в виде

$$V_j = P \left\{ \max_j O_j \mid A \text{ выбирает } C_i \text{ в } S \right\}, \quad (3)$$

где P – вероятность выбора C_i в S субъектом A , при котором O_j максимально.

Из (1) – (3) следует, что не только состояния «живого вещества» в окружении S имеют вероятностную природу, но и сам процесс поведения является стохастическим. Видимо поэтому Вернадский в формулировке принципа употребил слово «стремится», означающее в данном случае свойство «живого вещества» добиваться «максимального проявления», которое в полной мере не всегда может состояться. В реальности данное свойство гарантировано самокопированием белковых молекул, делением клеток, размножением организмов, что приводит к увеличению биомассы «живого вещества» в биосфере, т.е. все большему потреблению «строительного материала» – биогенных веществ и энергии. Тем самым подтверждается высказывание о том, что «...жизнь – это непрерывный рост упорядоченной материи» [3].

Пользуясь языком математического программирования, смысл первого принципа сформулируем в виде оптимизационной задачи. Пусть q_M и q_S означают потоки пищевых элементов и энергии соответственно, поступающие из биотопа в биоценоз. Биоценозу требуется отыскать такие значения q_M^* и q_S^* , при которых его продуктивность будет максимальной:

$$B(q_M^*, q_S^*) = \max_{\substack{q_S \in Q_S \\ q_M \in Q_M}} B(q_M, q_S \mid S, \varepsilon), \quad (4)$$

в условиях сложившейся структуры биотопа S и наличия случайных факторов ϵ , воздействующих на систему «биотоп – биоценоз» и способных повлиять на биогенную миграцию элементов питания и поглощения энергии.

Проводя аналогию между целеустремленным поведением «живого вещества» и гипотетической экономической организацией (типа завода, фирмы), можно увидеть определенное сходство их целей. Для организации – это максимизация дохода D за вычетом потерь P , что, по сути, означает извлечение максимальной прибыли. Ее целевая функция имеет вид

$$\max_{u \in U} B(D(u) - P(u)), \quad (5)$$

где $u \in U$ – вектор управляющих воздействий. Из сопоставления выражений (4) и (5) сделаем акцент на том, что современное общество «потребления» базируется на одной из глубинных биологических сущностей – максимального увеличения своей пропускной способности.

В соответствии с первым биогеохимическим принципом модель поведения «живого вещества» представим на рис. 2.

Особый интерес в системе представляет работа положительных и отрицательных обратных связей: при наличии ресурсов в биотопе биоценоз увеличивает свою продуктивность по принципу положительной обратной связи (ПОС), а образуемые в процессе «метаболизма» отходы попадают в биотоп и ухудшают его качественные состояния по принципу работы отрицательной обратной связи (ООС).

Поскольку процесс потребления ресурсов происходит во времени, то на каждом этапе идет рост продуктивности до тех пор, пока не ограничатся существенные изменения в биотопе. Далее включаются адаптационные механизмы биоценоза, способствующие лучшему его приспособлению к новым условиям за счет совершенствования структуры и функций

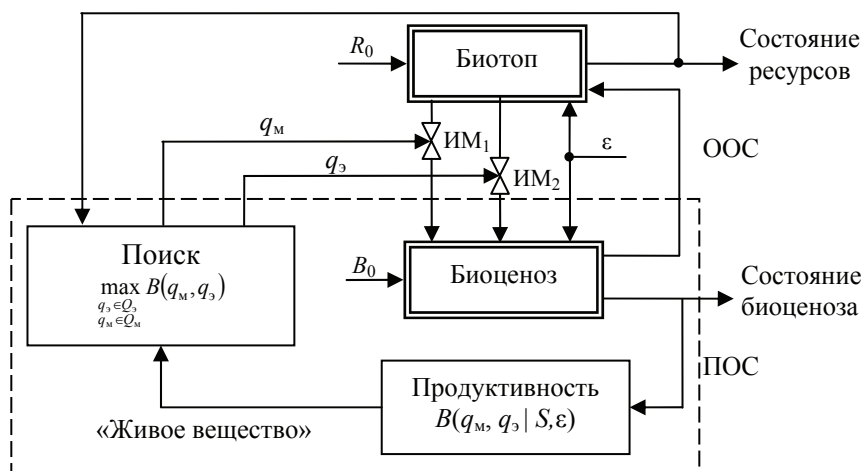


Рис. 2. Кибернетическая модель поведения целеустремленной системы «биотоп – биоценоз»:

R_0, B_0 – начальные состояния ресурсов и продуктивности соответственно;
 ϵ – случайные факторы; $ИМ_1, ИМ_2$ – исполнительные механизмы

биологических видов. По данным причинам процесс устойчивого развития может реализовываться с помощью коррекции ПОС и ООС, то есть контроля за скоростью потребления ресурсов и производства отходов.

Из анализа рис. 2 следует и ответ на вопрос Вернадского о том, каким образом мысль изменяет материальные процессы. По сути, мысль является информационным продуктом деятельности мозга. В биосистемах информационные сигналы различной природы усиливаются мышечной деятельностью организма, а с помощью силы органов приводят в движение интересующие материально-энергетические потоки.

С философской точки зрения первый принцип напоминает закон «перехода количества в качество», ибо рассеянные в геосферах биогенные элементы «живое вещество» концентрируют и используют для построения сложных упорядоченных структур, обладающих огромными функциональными возможностями переустройства окружающей среды.

Второй биогеохимический принцип сформулирован Вернадским следующим образом: *эволюция видов в ходе геологического времени, приводящая к созданию форм жизни, устойчивых в биосфере, идет в направлении, увеличивающем биогенную миграцию атомов биосферы.*

Из анализа данного принципа следует:

- 1) эволюция видов обладает направленностью, в смысле увеличения биогенной миграции атомов, усиливающей при этом давление на биотоп;
- 2) механизм отбора видов, очевидно, связан с их устойчивостью существования в биосфере, а именно – адаптацией;
- 3) адаптация сопровождается усложнением форм жизни.

Данные обстоятельства позволяют рассматривать эволюцию как процесс последовательного образования и отбора видов с более сложной структурной организацией. Такой процесс схематично изображен на рис. 3 в виде изменения структур «живого вещества» – S_0, S_1, \dots, S_k , наблюдаемых в его геологической истории.

Если ввести некоторую меру структурной сложности для S_i , например, число переменных состояний θ , тогда имеем $\theta(S_i) > \theta(S_{i-1})$, $i = \overline{0, k}$, причем S_k – конечное состояние эволюционного процесса.

Тип структуры, образующейся в процессе эволюции биологических видов, зависит от состава случайных факторов ε , к которым относятся климатические изменения, антропогенные воздействия, межвидовая и внутривидовая конкуренции. Поэтому трансформация структуры S_i в структуру S_{i+1} является случайным событием, реализуемым с вероятностью P_i .

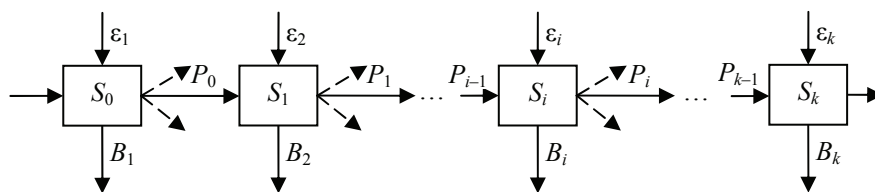


Рис. 3. Эволюционный процесс:

B_i – продуктивность; ε_i – случайные факторы; P_i – вероятность смены i -й структуры

Используя свойство «направленности» в поведении биоценоза (на что указывает второй принцип), адаптивные действия биологических видов покажем на примере процесса поиска варианта ресурсов, при котором рост биомасс будет наивысшим.

Пусть M и \mathcal{E} означают доступные количества материальных и энергетических ресурсов, необходимых для жизнедеятельности биоценоза. Можно предположить существование некоторых «наилучших» сочетаний M и \mathcal{E} , при которых рост биомассы $B(M, \mathcal{E})$ максимален. Представим гипотетическое поле ресурсных возможностей биоценоза в координатах M – \mathcal{E} , где контурными линиями обозначены равные значения $B(M, \mathcal{E})$ (рис. 4).

Оптимальные сочетания M и \mathcal{E} соответствуют максимальным значениям $B(M, \mathcal{E})$, условно показанным штриховкой на рис. 4. Способы достижения зоны оптимальности прикрепленными и мобильными организмами биоценоза существенно различны. Их понятийным аналогом в теории математического программирования можно считать адаптивные процедуры поиска локальных и глобальных экстремумов функции многих переменных [4]. Работа данных процедур позволяет более наглядно представить эволюционный процесс в биосистемах.

На рисунке 4 отображена работа простейшего детерминированного алгоритма покоординатного движения к оптимуму. Траектория a, b, c, \dots является иллюстрацией последовательного приближения к заштрихованной зоне. Достижение ее возможно лишь при отсутствии каких-либо препятствий (ограничений) на пути движения к ней. В данном примере ограничения существуют в виде условий $\varphi_1(M) = 0$ и $\varphi_2(\mathcal{E}) = 0$, а поэтому оптимальное значение $B(M, \mathcal{E})$ находится не в действительной точке максимума, а на линии ограничений.

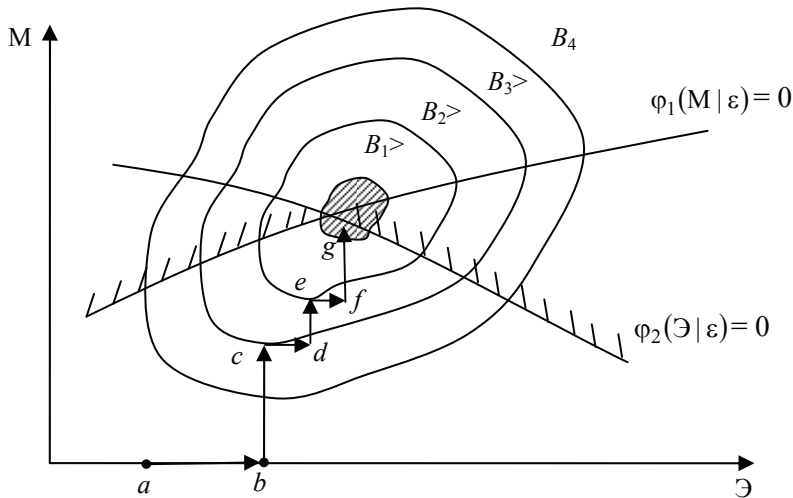


Рис. 4. Процесс «ресурсной» адаптации биоценоза:
 $\varphi_1(M | \varepsilon)$ и $\varphi_2(\mathcal{E} | \varepsilon)$ – ограничения на M и \mathcal{E} , при условии ε

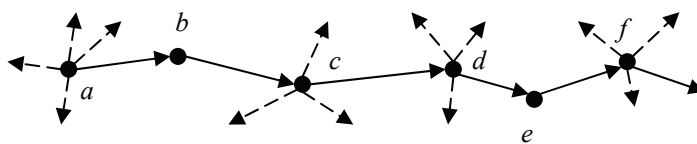


Рис. 5. Типичная траектория при случайном поиске

В естественных природных условиях поиск наилучших вариантов M и \mathcal{E} осуществляется, по всей видимости, случайным образом. Его смысл в организации движения к экстремуму в обстановке неопределенности [5], подобно траектории «рыскания» на рис. 5 (пунктиром показаны пробные направления поиска, а сплошной линией – шаги в направлении экстремума).

Именно в процессе поиска наилучших условий для выживания биоценоза и преодоления ограничений проявляет себя дарвиновская триада: изменчивость – наследственность – отбор.

Для биологических видов «изменчивость» означает «поле возможностей» для появления новых форм жизни. Действие случайных факторов ϵ порождает структурную изменчивость на различных уровнях – геном, клеточном, морфологическом и т.д. В поисковых алгоритмах изменчивость отождествляется с выбором начальных приближений, таких как точка « a » на рис. 4, выбираемых иногда не произвольно, но чаще – случайным способом. Это делается в тех случаях, когда требуется преодолеть препятствия (ограничения) на пути движения к оптимуму или проверить его на единственность. Таким способом «улучшается», эволюционирует конструкция алгоритма.

«Наследственность» означает зависимость будущих состояний биологического вида от прошлых. Уникальным свойством биологического мира является то, что, несмотря на изменчивость, присущую каждому индивиду, видовые свойства сохраняются. А содержащаяся в ДНК информация контролирует воспроизведение структур, причем во всех формах жизни это происходит одинаково. В поисковых алгоритмах «наследственность» присутствует в выбранном способе поиска (градиентном, наискорейшего спуска, симплексном и т.п.), что отражается на преемственности найденных смежных значений $B(M, \mathcal{E})$ в последовательности.

«Отбор» является движущей силой любого эволюционного процесса в живой и неживой природе. Его принципы часто базируются на возможности достижения экстремальных значений некоторым функционалом. В поисковых процедурах возможность нахождения экстремальных значений является самоцелью, что указывает на очевидное сходство кибернетических подходов с эволюционным изменением биоценозов.

Сравнение поведения «живого вещества» с целеустремленным поведением кибернетических систем позволяет лучше понять смысл второго принципа Вернадского – эволюция видов сопровождается возникновением организмов с более высоким уровнем сложности, устойчивости к внешним условиям и продуктивности.

Особую важность данный принцип имеет для стратегии устойчивого социально-экономического развития государства, если создание стабиль-

ных «форм жизни» отождествить со своевременным переходом на новый технологический уклад (базис), а увеличение «биогенной миграции атомов» – с ростом благосостояния граждан (надстройкой).

Третий биогеохимический принцип Вернадского сформулирован в следующем виде: *в течение всего геологического времени ... заселение планеты должно быть максимально возможным для всего живого вещества.*

К следствиям данного принципа можно отнести:

- 1) размножение живых организмов в геометрической прогрессии;
- 2) необходимость высокой скорости размножения как наиважнейшего условия в борьбе видов за существование.

Скорость «заселения планеты» напрямую связана со скоростью размножения «живого вещества», поэтому третий принцип представляет интерес для проблемы устойчивого развития в силу того, что именно рост численности населения Земли способствовал ее актуализации. Необходимо учитывать, что скорость размножения изменяется по мере того, как виды адаптируются к сезонам, физическим факторам природной среды, другим видам, находящимся «по соседству». В стабильных условиях окружающей среды быстро растущие экосистемы, обладающие большим разнообразием, успешно конкурируют с менее разнообразными и замещают их. Известные варианты взаимодействий популяций описаны в табл. 1.

Таблица 1

Механизмы взаимодействий популяций двух видов [6]

Тип взаимодействий	Виды		Общий характер взаимодействия
	№ 1	№ 2	
Нейтрализм	0		Ни одна популяция не влияет друг на друга
Конкуренция, непосредственное взаимодействие	–		Прямое взаимное подавление обоих видов
Конкуренция, борьба за ресурсы			Непрямое подавление при дефиците общего ресурса
Аменсализм	–	0	Популяция № 2 подавляет популяцию № 1, но сама не испытывает отрицательного воздействия
Паразитизм	+	–	Популяция паразита № 1 состоит из меньших по величине особей, чем популяция хозяина № 2
Хищничество			Особи хищников № 1 крупнее особей жертв № 2
Комменсализм		0	Популяция № 1 (комменсал), получает пользу от объединения; популяции № 2 объединение безразлично
Протокооперация	+		Взаимодействие благоприятно для обоих видов, но не обязательно
Мутуализм			Взаимодействие благоприятно для обоих видов и обязательно

Для проблемы устойчивого развития исследование вопросов конкуренции крайне важно по той причине, что экономические, экологические и социальные цели проблемы противоречат друг другу и необходимо искать способы устранения данного противоречия. Из анализа типов взаимодействий (табл. 1) сделан весьма полезный вывод: «в процессе эволюции и развития экосистем обнаруживается тенденция к уменьшению роли отрицательных взаимодействий за счет положительных, повышающих выживание взаимодействующих видов» [6]. Для успешного решения проблемы устойчивого развития необходимо искать:

- компромиссные решения;
- возможности для ослабления негативных взаимодействий между экономическими, экологическими и социальными процессами и, тем самым, перейти от конкуренции к протокооперации или мутуализму.

Наиважнейшим вопросом стратегии устойчивого развития является вопрос о ресурсах, необходимых для реализации долгосрочных программ развития экономического сектора. Максимально возможное заселение планеты означает не только высокую скорость размножения «живого вещества», но и высокую скорость потребления ограниченных запасов природных ресурсов на Земле. Прогноз на будущее возможен с помощью довольно сложных математических моделей, учитывающих данные обстоятельства [7]. Однако и простейшие модели дают качественную картину изменений численности популяции в условиях возможного дефицита ресурсов.

К таким моделям относится и логистическое уравнение Ферхюльста

$$dN/dt = KN(1 - N/K), \quad (5)$$

где N – численность популяции; r – коэффициент прироста популяции; K – емкость среды.

Уравнение (5) справедливо для ограниченного периода времени. При малых N его решение имеет вид, близкий к экспоненте

$$N = N_0 e^{rt}, \quad (6)$$

где N_0 – численность популяции в момент времени $t = 0$. С возрастанием t численность N асимптотически приближается к предельному значению K , и ресурсы будут исчерпаны. Решение уравнения (5) имеет вид

$$N = K / (1 - e^{-at}), \quad (7)$$

где константа $a = r/K$.

В приложении к проблеме устойчивого развития диалектическую основу третьего принципа Вернадского полезно рассматривать как проявление закона соответствия «производительных сил» природы – «производственным отношениям» общества, поскольку повсеместное «заселение планеты» людьми и их потребительское отношение к природным ресурсам в настоящее время требует пересмотра исторически сложившейся парадигмы «природа – общество» и перехода к более разумным (ноосферным) вариантам взаимодействий. Например, сознавая потерю невозобновляемого природного капитала общество пытается своевременно заместить

его антропогенным капиталом, а ощущая губительность глобальных климатических перемен, идет на экономические самоограничения в рамках выполнения Киотского протокола. Таким образом, идея коэволюции природы и общества становится доминирующей для теории устойчивого развития.

Резюмируя все вышеизложенное, отметим, что в процессе развития биосферы возникают метастабильные состояния, в которых в результате действия случайных факторов происходят структурные изменения, то есть имеет место эволюция. Существуют два основных механизма эволюции: исторический (адаптационный) и скачкообразный (бифуркационный), и если первый позволяет предсказать возможные последствия развития цивилизации, то второй – недетерминированный, и для него не ясно, по какому сценарию пойдет дальнейших ход событий. Здесь все определяет случай в момент возникновения структурной неустойчивости. Как выразился французский биолог, лауреат Нобелевской премии, создатель теории переноса генетической информации Жак Моно: «чистый случай, исключительный случай, абсолютная, но слепая свобода – вот что лежит в корне чудесного здания эволюции».

Принимая во внимание «исключительную» важность случайности для выбора новой структуры типа «биотоп – биоценоз», эволюционный процесс (Evop) формализуем в форме

$$\text{Evop} \triangleq P\left\{\varepsilon^* \in \Xi \mid S_0(t, \varepsilon^*) \stackrel{\min H}{\Rightarrow} S_k \wedge \theta(S_k) > \theta(S_0)\right\}, \quad (8)$$

где \triangleq – символ «определится как»; \wedge – логический знак «И»; t – время.

Согласно (8) Evop определим как вероятность возникновения случайного события ε^* на множестве возможных событий Ξ , при котором в системе со структурой S_0 возникает процесс самоорганизации, направленный на минимизацию энтропии системы H и создание структуры S_k , и при этом оценка структурной сложности $\theta(S_k) > \theta(S_0)$. В процессе эволюции система максимизирует контакты с внешней средой, увеличивает устойчивость, улучшает понимание внешних условий и повышает управляемость.

В таком случае, что же представляет собой устойчивое развитие? Ответ следующий: это ноосферный эволюционный процесс, в основу которого положены биогеохимические функции «живого вещества», диалектические законы природы и общества, и эффективные, в смысле устойчивости процесса, управленческие решения, принимаемые человеком в условиях неопределенности.

Список литературы

1. Вернадский, В. И. Собрание сочинений: в 24 т. / В. И. Вернадский // Химическое строение биосферы Земли и ее окружение. Биосфера и ноосфера / под ред. Э. М. Галимова. – М. : Наука, 2013. – Т. 9. – 574 с.
2. Акофф, Р. О целеустремленных системах / Р. Акофф, Ф. Эмери. – М. : Сов. Радио, 1974. – 272 с.
3. Карери, Дж. Порядок и беспорядок в структуре материи / Дж. Карери. – М. : Мир, 1985. – 232 с.

4. Химмельблау, Д. Прикладное нелинейное программирование / Д. Химмельблау ; пер. с англ. И. Н. Быховской и Б. Т. Вавилова ; под ред. М. Л. Быховского. – М. : Мир, 1975. – 534 с.
5. Растрин, Л. А. Случайный поиск в процессах адаптации / Л. А. Растрин. – Рига : Зинатне, 1973. – 129 с.
6. Одум, Ю. Экология: в 2-х т. / Ю. Одум. – М. : Мир, 1986. – Т. 2. – 376 с.
7. Форрестер, Дж. Мировая динамика / Дж. Форрестер ; пер. с англ. А. Н. Ворощука, С. А. Пегова ; под ред., с предисл. и послесл. – М. : Наука, 1978. – 168 с.

References

1. Vernadskii V.I. [Collected Works], *Khimicheskoe stroenie biosfery Zemli i ee okruzhenie. Biosfera i noosfera* [The chemical structure of the Earth's biosphere and its environment. Biosphere and noosphere], Moscow: Nauka, 2013, vol. 9, 574 p. (In Russ.)
2. Akoff R., Emeri F. *O tseleustremlennykh sistemakh* [About purposeful systems], Moscow: Sov. Radio, 1974, 272 p. (In Russ.)
3. Kareri Dzh. *Poryadok i besporyadok v strukture materii* [Order and disorder in the structure of matter], Moscow: Mir, 1985, 232 p. (In Russ.)
4. Khimmel'blau D. *Prikladnoe nelineinoe programmirovaniye* [Order and disorder in the structure of matter], Moscow: Mir, 1975, 534 p. (In Russ.)
5. Rastrigin L.A. *Sluchainyi poisk v protsessakh adaptatsii* [Random search in adaptation processes], Riga: Zinatne, 1973, 129 p. (In Russ.)
6. Odum Yu. *Ekologiya* [Ecology], Moscow: Mir, 1986, vol. 2, 376 p. (In Russ.)
7. Forrester Dzh. *Mirovaya dinamika* [World Dynamics], Moscow: Nauka, 1978, 168 p. (In Russ.)

Vernadsky, Evolution and Sustainable Development

N. S. Popov, O. V. Peshcherova, A. A. Chuksin

*Tambov State Technical University, Tambov, Russia;
Derzhavin Tambov State University, Tambov*

Keywords: biogeochemical principles; cybernetics; evolution; Vernadsky; noosphere; purposeful systems; sustainable development.

Abstract: This study analyzes the problem of sustainable development that has arisen at the present stage of the biosphere evolution. Vernadsky's biogeochemical principles presented in the cybernetic version were used as the basis for the analysis. The actions of "living matter" in the biosphere were identified with the behavior of purposeful systems. A number of features peculiar to biological species were described in the language of mathematical programming. A number of conclusions on the implementation of the strategy of sustainable development were made.

© Н. С. Попов, О. В. Пещерова,
А. А. Чуksин, 2017