

О подходе к разработке комплексного показателя состояния экосистемы под воздействием факторов техногенной нагрузки

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Технологии гражданской безопасности, 2023

А.В. Авдеева, А.Ю. Сорокин, А.В. Гапоненко, А.В. Рыбаков

Аннотация

В статье приводится описание исследования в области комплексной оценки состояния экосистемы в рамках устойчивого природопользования и обеспечения экологической безопасности. Основу комплексного показателя состояния экосистемы составляет энергетический подход, который отражает динамику биомассы под действием поражающих факторов в настоящем и будущем. Сформулирована математическая постановка задачи разработки комплексного показателя состояния экосистемы под воздействием факторов техногенной нагрузки. Определены базовые закономерности экосистемы, связанные с биомассой. Полученный аналитический вид показателя может в дальнейшем применяться для прогнозирования развития возможной экологической обстановки.

Ключевые слова: комплексный показатель; экосистема; техногенное воздействие; чрезвычайная ситуация; устойчивое состояние.

On the Approach to the Development of Comprehensive Ecosystem State Indicator Under the Influence of Man-made Load Factors

ISSN 1996-8493

DOI: 10.54234/CST.19968493.2023.20.3.77

© Civil Security Technology, 2023

A. Avdeeva, A. Sorokin, A. Gaponenko, A. Rybakov

Abstract

The article describes study in the field of comprehensive assessment of the ecosystems state within the framework of sustainable nature management and environmental safety. Comprehensive indicator basis of the ecosystems state is the energy approach, which reflects biomass dynamics under the influence of damaging factors in the present and future. Mathematical task assignment for the development of comprehensive indicator of the ecosystem state under the influence of man-made load factors is formulated. Common ecosystem factors related to biomass are determined. Obtained analytical indicator form can be further used to predict development of possible environmental situation.

Key words: complex indicator; ecosystem; man-made impact; emergency; sustainable state.

11.07.2023

Введение

Согласно Федеральному закону «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера»¹ чрезвычайная ситуация (ЧС) — это обстановка на определенной территории, сложившаяся в результате аварии, опасного природного явления, катастрофы, распространения заболевания, представляющего опасность для окружающих, стихийного или иного бедствия, которые могут повлечь или повлекли за собой человеческие жертвы, ущерб здоровью людей или окружающей среде, значительные материальные потери и нарушение условий жизнедеятельности людей. Исходя из этого определения, следует, что в задачи обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях, помимо защиты людей, материальных активов и производственных процессов, входит также защита окружающей среды, поскольку по определению, приведенному в законе «Об охране окружающей среды»², окружающая среда — совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов, а также антропогенных объектов. При этом в рамках того же закона природная среда определяется как совокупность компонентов природной среды, природных и природно-антропогенных объектов. Другими словами, безопасность в чрезвычайных ситуациях включает в себя вопросы обеспечения экологической безопасности от факторов ЧС.

Исходя из практики, проблемы экологической безопасности, как правило, становятся актуальны при чрезвычайных ситуациях техногенного характера. Примерами таких ситуаций могут послужить аварии на опасных производственных объектах, а также на объектах атомной энергетики и гидротехнических сооружениях [1]. Согласно закону¹, обеспечение защиты от чрезвычайных ситуаций реализуется за счет их предупреждения и ликвидации последствий. Исходя из определений предупреждения и ликвидации последствий ЧС в отношении окружающей среды следует, что эти действия реализуются в виде ряда актов, обеспечивающих недопустимость ЧС или снижение размера ущерба окружающей среде.

Анализ основных понятий в законе¹ показывает отсутствие в нем определения ущерба окружающей среде. Содержание такого понятия также не раскрывается и в законе об охране окружающей среды². Анализ научных источников по вопросу определения содержания понятия ущерба окружающей среде показал, что с правовой точки зрения ущерб окружающей среде декомпозируется на материальный и экологический ущерб [2]. При этом в законодательной базе понятие экологического ущерба также не раскрывается, хоть и используется в ряде документов [3]. Содержание понятия экологического ущерба раскрывается на уровне методической базы, например, во временной методике определения предотвращенного экологического ущерба [4], утвержденной Комитетом РФ по охране

окружающей среды в 1999 году, а также в ряде других методик оценки ущерба для каждого вида природных ресурсов.

Природные ресурсы подразделяются на водные ресурсы, атмосферный воздух, почву и земельные ресурсы, а также биологические ресурсы (растительный и животный мир). Оценка нанесенного вреда исходит из логики степени превышения предельно допустимой концентрации (ПДК) или предельно допустимого уровня (ПДУ) по каждому виду вещества или воздействия на заданной территории. Ущерб выражается в виде потерь природных ресурсов в народном хозяйстве, имеющих денежное выражение, или как затраты, связанные с мероприятиями по обеспечению доступности использования такого природного ресурса на территории, на которой произошло превышение ПДК или ПДУ [5].

Исходя из такого содержания понятия экологического ущерба, становится очевидно, что вопрос экологической безопасности рассматривается исключительно с точки зрения природопользования в настоящем времени и имеет экономические основания.

Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года устанавливают стратегическую цель государственной политики, которая состоит в решении социально-экономических задач, обеспечивающих экологически ориентированный рост экономики, сохранение благоприятной окружающей среды, биологического разнообразия и природных ресурсов для удовлетворения потребностей нынешнего и будущих поколений, реализации права каждого человека на благоприятную окружающую среду, укреплению правопорядка в области охраны окружающей среды и обеспечения экологической безопасности [6]. Поставленная цель в рамках приведенного документа должна реализовываться на основе ряда принципов, в том числе:

приоритетность сохранения естественных экологических систем (биогеоценозов), природных ландшафтов и природных комплексов;

презумпция экологической опасности, планируемой экономической и иной деятельности;

обязательность оценки намечаемого воздействия на окружающую среду при принятии решений об осуществлении экономической и иной деятельности;

запрещение осуществления экономической и иной деятельности, последствия воздействия которой непредсказуемы для окружающей среды, а также реализации проектов, которые могут привести к деградации естественных экологических систем, изменению и (или) уничтожению генетического фонда растений, животных и других организмов, истощению природных ресурсов и иным негативным изменениям окружающей среды.

Анализ этих принципов показывает, что в основе любой деятельности, затрагивающей вопрос экологической безопасности, должен лежать экосистемный подход, который определяет приоритетную задачу — сохранение природной среды, т. е. совокупности

¹ Федеральный закон от 21.12.1994 № 68-ФЗ «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (ред. от 14.04.2023).

² Федеральный закон от 10.01.2002 № 7-ФЗ (ред. от 14.07.2022) «Об охране окружающей среды» (с изм. и доп., вступ. в силу с 01.03.2023).

экосистем и их связей. Влияние состояния экосистем и ресурсного потенциала в настоящем на жизнедеятельность будущих поколений прослеживается в учении о биосфере В. И. Вернадского [7]. Им было показано и обосновано, что природные ресурсы, потребляемые человеком, в значительной степени являются продуктами деятельности биоты, воздуха, воды, почвы. Ключевые стратегические энергетические ресурсы, такие как газ, нефть, уголь, являются неотъемлемой частью деятельности живых организмов [8]. Живые организмы участвуют в концентрации ряда химических элементов, что привело, например, к образованию железных руд.

В законе об «Охране окружающей среды» и Основах государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года в отношении вопроса о защите природной среды от чрезвычайных ситуаций техногенного характера существует определенное методологическое противоречие. С одной стороны, мероприятия по защите природной среды должны быть направлены на исключение или минимизацию финансовых потерь, обусловленных утратой возможности пользования водными ресурсами, атмосферным воздухом, почвой и земельными ресурсами, биологическими ресурсами (растительным и животным миром). С другой — мероприятия по защите природной среды должны быть направлены на защиту экосистем от потенциального воздействия факторов ЧС техногенного характера или на их восстановление в результате такого воздействия, так как используемые человеком ресурсы являются продуктами экосистемы.

Из данного противоречия вытекает, что природная среда может определяться как совокупность природных ресурсов, имеющих прежде всего экономические атрибуты, а также как совокупность экосистем, имеющая биологические и геохимические атрибуты. Это приводит к тому, что при постановке задачи защиты природной среды возникают качественно отличные друг от друга объекты защиты, а также качественно различные критерии решения самой задачи защиты природной среды.

К настоящему времени по вопросу защиты природной среды как объекта природопользования от воздействия ЧС техногенного характера уже разработана научно-методическая база, однако если этот вопрос поставить в отношении природной среды как совокупности экосистем, то разработка такой научно-методической базы только предстоит.

Исходя из анализа экологической повестки в мире, а также в Российской Федерации, следует, что природоохранное законодательство в перспективе будет эволюционировать прежде всего в сторону практической реализации концепции устойчивого развития. Именно этим и определяется актуальность научной задачи по разработке научно-методической базы по защите экосистемы от воздействия факторов ЧС техногенного характера. Решение этой задачи предполагается реализовать в несколько этапов, одним из которых является разработка модели оценки состояния экосистемы под воздействием техногенной нагрузки, в основе которой лежит комплексный показатель состояния такой экосистемы, в чем и заключается цель настоящей работы.

1. Постановка задачи разработки комплексного показателя состояния экосистемы под воздействием факторов техногенной нагрузки

В настоящее время в нормативной базе природоохранной деятельности РФ существует множество частных показателей, которые отражают состояние различных аспектов природной среды с точки зрения доступности ее ресурсов, а также состояние отдельных компонентов экосистемы. Идеология оценки состояния природных ресурсов под воздействием техногенных факторов базируется на понятии устойчивости экосистемы к воздействию этих факторов. На основании сформулированного во введении противоречия вытекает, что под «устойчивостью объектов природопользования» понимают такую меру техногенного воздействия, при которой ресурсы не теряют свои качества и остаются доступными. Так как в рассматриваемой работе поднимается вопрос не доступности природного ресурса, а состояния экосистемы, которое и обуславливает наличие такого ресурса в настоящем и будущем, предлагается оттолкнуться от понятия экологической устойчивости. Экологическая устойчивость понимается как способность экосистемы сохранять свою структуру и функциональные особенности при воздействии внешних и внутренних факторов [9].

В работе [10] было обосновано наличие взаимосвязи между энергетическим состоянием экосистемы, состоянием трофической цепи и биомассой экосистемы. Исходя из практики наблюдения техногенных чрезвычайных ситуаций, воздействие техногенной нагрузки прежде всего приходится на трофические цепи. Страдают отдельные виды или целые группы видов, входящие в цепи питания, целостность которых обуславливает цикл преобразования энергии и вещества на этой территории. В качестве простого и понятного примера можно привести разлив нефти в акватории. Помимо токсичности, нефть создает непроницаемую для света и воздуха пленку, от которой прежде всего начинает страдать фитопланктон — основные продуценты, а за ними и консументы первого порядка — фитофаги. Помимо этого, консументы второго порядка, питающиеся водной фауной (чайки и т.д.), при контакте с пленкой из нефти попадают в смертельную ловушку [11]. Их численность сокращается. Следствием снижения численности популяции отдельных видов или групп видов, является уменьшение общей биомассы и энергии экосистемы. Примечательно то, что такое снижение биомассы и энергии системы, обусловленное воздействием техногенных факторов, может иметь продолжительный во времени характер.

Так как энергия и биомасса системы являются взаимосвязанными показателями, которые определяются совокупностью множества биотических и множества абиотических факторов окружающей среды, то в качестве комплексного показателя состояния экосистемы предлагается использовать отношение биомассы системы текущего момента времени к биомассе системы будущего момента времени с учетом действия в течение

некоторого времени факторов техногенной нагрузки. Математически это можно представить следующим образом:

$$q(F, t, t_F) = \frac{m_{i_0}}{m_{t_1}(m_{i_0}, F, t, t_F)}, \quad (1)$$

при этом:

$$m_{эсi_0} = f(t); \quad (2)$$

$$m_{эсt_1} = f(m_{i_0}, F, t, t_{чс}), \quad (3)$$

где:

q — показатель комплексного состояния экосистемы, $q \in (0; +\infty)$;

$m_{эсi_0}$ — биомасса экосистемы на рассматриваемой территории в текущий момент времени;

$m_{эсt_1}$ — биомасса экосистемы на рассматриваемой территории будущего момента времени с учетом действия в течение некоторого времени факторов техногенной нагрузки;

t — время между текущим и будущим моментом рассмотрения состояния экосистемы на рассматриваемой территории;

F — совокупность факторов окружающей среды, воздействующих на экосистему;

$t_{чс}$ — время, в течение которого факторы ЧС оказывали воздействие на экосистему на рассматриваемой территории.

Сущность предлагаемого показателя и его комплексность определяются его способностью охарактеризовать результирующий параметр экосистемы — биомассу. Интерпретация значений показателя предполагается следующим образом.

При $q = 1$, за период времени t экосистема полностью восстановилась от последствий техногенной нагрузки и имеет прежнее состояние.

При $q > 1$, за период времени t экосистема не восстановилась от последствий техногенной нагрузки и находится в угнетенном состоянии.

При $q < 1$, за период времени t экосистема полностью восстановилась от последствий техногенной нагрузки и находится в состоянии развития (т.е. происходит приращение биомассы).

Из представленного следует, что задача разработки комплексного показателя состояния экосистемы сводится к обоснованию функций (2) и (3) в аналитическом виде.

2. Определение базовых закономерностей экосистемы, связанных с биомассой

Экосистема представляет собой взаимосвязанную совокупность различных видов живых организмов, существующих на конкретной территории (суши или водной среды) и в прилегающей к ней атмосфере [12]. Структура биогеоценоза приведена на рис. 1 [12].

Исходя из схемы, представленной на рис. 1, видно, что компоненты экосистемы делятся на две группы: абиотическую и биотическую. Абиотическую группу

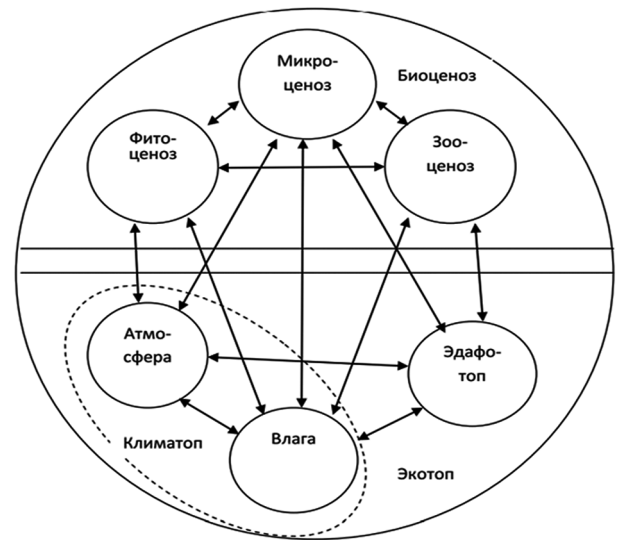


Рис. 1. Структура экосистемы по В. Н. Сукачеву

составляет совокупность факторов неживой (неорганической) природы: атмосферный воздух, гидрологический режим, литогенная основа, почвенный покров, температура, осадки, давление и т.д. В биотическую группу входят совокупность живых организмов, их воздействие друг на друга, а также производные их жизнедеятельности, т.е. продукты, имеющие органическую природу. Все живые организмы можно разделить на три класса: продуценты (фитоценоз), консументы (зооценоз) и редуценты (микробоценоз, микоценоз).

Так как биомасса — это масса живого вещества, то биомасса экосистемы ($m_{эс}$) будет складываться из суммы биомасс продуцентов ($m_{п}$), консументов ($m_{к}$) и редуцентов ($m_{р}$):

$$m_{эс} = m_{п} + m_{р} + m_{к}. \quad (4)$$

Живая органика каждого класса на рассматриваемой территории представлена разнообразием видов, каждый из которых имеет свою популяцию. Исходя из фундаментальных основ биологии, известно, что на жизнедеятельность любого вида оказывают влияние экологические факторы (F), которые можно подразделить на условия и ресурсы. Ресурсы обуславливают наличие питания для конкретного вида на рассматриваемой территории и будут определяться значениями совокупности биотических факторов (F_b). Условия включают совокупность параметров среды и будут определяться совокупностью значений абиотических факторов (F_a).

Между экологическими факторами и состоянием популяции вида существует зависимость, которая выражается законом оптимума, а также законами минимума и толерантности Либиха-Шелфорда [13]. Из них следует, что динамика популяции вида определяется совокупностью значений биотических и абиотических факторов. Также известно, что динамика популяции вида определяется такими двумя показателями, как плодовитость (p) и смертность (d) вида [14]. При значениях факторов, входящих в зону оптимума, показатель

плодовитости будет стремиться к некоторому максимуму, а показатель смертности к минимуму. Следовательно, динамика популяции вида определяется через показатели плодовитости и смертности, которые, в свою очередь, зависят от изменяющихся во времени значений факторов с учетом изначальной численности организмов, т. е.:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = f(p(F(t)), d(F(t)), N_0) = \frac{N_0 p(F(t)) - N_0 d(F(t))}{N_0}, \tag{5}$$

где:

- N — численность популяции вида;
- N_0 — начальная численность популяции вида;
- t — интервал времени рассмотрения динамики популяции вида.

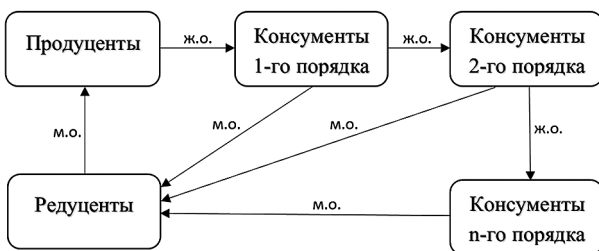
Вместе с этим между биомассой вида и численностью популяции вида также существует конкретная взаимосвязь, которую можно выразить через среднюю биомассу особи вида:

$$m_i = m_{i0} N_i, \tag{6}$$

где:

- m_i — биомасса популяции i -го вида;
- m_{i0} — средняя биомасса особи i -го вида;
- N_i — количество особей i -го вида.

Известно, что популяции видов продуцентов, консументов и редуцентов связаны между собой трофической сетью (цепью питания) [15]. В этой цепи продуценты составляют кормовую базу для консументов, а мертвая органика продуцентов и консументов (останки и органические отходы жизнедеятельности) составляют кормовую базу для редуцентов. Редуценты, в свою очередь, производят продукты питания для продуцентов (гуминовые, фульвокислоты и т. д.). Принципиальная схема трофической цепи приведена на рис. 2.



ж.о. – живая органика (биомасса, реализующая жизнедеятельность); м.о. – мертвая органика (биомасса, прекратившая жизнедеятельность или отходы жизнедеятельности).

Рис. 2. Принципиальная схема трофической цепи

Пищевая ценность любого продукта потребления может быть оценена в калориях, которые представляют собой единицы измерения энергии [16]. В соответствии с этим можно выразить показатель удельной энергии для любой органики, который характеризовал бы, какое количество энергии приходится на единицу массы того или иного вещества. Теоретически показатель удельной энергии можно усредненно определить для биомассы

любого вида или группы видов, что позволит связать биомассу продуцентов, консументов и редуцентов с накопленной в них энергией. Общую формулу, отражающую эту взаимосвязь, можно представить так:

$$E = mE_u, \tag{7}$$

где:

- E — полная энергия массы конкретного вещества, Дж;
- m — масса конкретного вещества, кг;
- E_u — удельная энергия конкретного вещества, Дж/кг.

Переход энергии в трофической цепи очень точно характеризует правило Линдемана, согласно которому с одного трофического уровня переходит на другой всего 10% энергии. В математическом виде это можно выразить следующим образом:

$$E_{жмэ} = E_{жмп} + E_{жмк} + E_{ммр} = E_{жмп} + E_{жмп} + 0,1E_{жмп} + 0,1(E_{ммп} + E_{ммк}), \tag{8}$$

где:

- $E_{жмэ}$ — энергия живой массы экосистемы или биомассы всех живых организмов;
- $E_{жмп}$ — энергия живой массы продуцентов;
- $E_{жмк}$ — энергия живой массы консументов;
- $E_{ммр}$ — энергия живой массы редуцентов;
- $E_{ммп}$ — энергия мертвой массы продуцентов;
- $E_{ммк}$ — энергия мертвой массы консументов.

Так как при визуальном осмотре территории видовое разнообразие растений всегда доступно, биомассу продуцентов ($m_{п}$) на рассматриваемой территории можно принять как известную исходную величину, которая будет определять возможную биомассу консументов ($m_{к}$). Количество мертвой органической массы консументов и продуцентов, которое может определять возможную биомассу редуцентов, ограничено количеством живой органической массы. Тогда, если мертвую органическую массу продуцентов и консументов выразить через коэффициент (k_m), то правило Линдемана, отраженное в выражении (8), в купе с выражением (7), позволяет выразить выражение (4) следующим образом:

$$m_{эс} = m_{п} + 0,1 \frac{m_{п} E_{ижмп}}{E_{ижмк}} + 0,1 \left(\frac{m_{п} k_{мп} E_{иммп}}{E_{ижмр}} + \frac{0,1 m_{п} E_{ижмп} k_{мк} E_{иммп}}{E_{ижмк} E_{ижмр}} \right), \tag{9}$$

где:

- $k_{мп}$ — коэффициент мертвой органической массы продуцентов;
- $k_{мк}$ — коэффициент мертвой органической массы консументов;
- $E_{ижмп}$ — удельная энергия живой массы продуцентов, Дж/кг;
- $E_{иммп}$ — удельная энергия мертвой массы продуцентов, Дж/кг;
- $E_{ижмк}$ — удельная энергия живой массы консументов, Дж/кг;

$E_{\text{иммк}}$ — удельная энергия мертвой массы консументов, Дж/кг;

$E_{\text{ижмр}}$ — удельная энергия живой массы редуцентов, Дж/кг.

Выражение (9) отражает распределение биомассы консументов и редуцентов, исходя из биомассы продуцентов на заданной территории в конкретный момент времени. Для решения задачи оценки состояния экосистемы во времени на фоне экологических факторов, а также факторов ЧС техногенного характера необходимо определить правую часть выражения (5), которое, в свою очередь, через выражение (6) связано с выражением (9).

3. Определение функции зависимости биомассы вида от значений экологических факторов

В работе [14] приведен ряд существующих моделей, описывающих динамику численности популяции при различных условиях. К таким условиям относятся:

- отсутствие ограничений для роста популяции;
- условие размножения половым путем;
- условие зависимости плодовитости от численности;
- условие ограничения внешними ресурсами.

Наиболее близкой к реальным условиям является модель роста популяции в условиях ограничения внешними ресурсами. Она также называется логистическим уравнением Ферхюльста-Пирла:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = aN \left(1 - \frac{N}{K} \right), \quad (10)$$

где:

- N — численность популяции;
- a — скорость прироста численности популяции;
- K — популяционная емкость экосистемы или максимальный размер популяции.

Выражение (10) представляет собой дифференциальное уравнение. Его аналитическое решение относительно (N) имеет следующий вид [19]:

$$N(t) = \frac{N_0 K e^{at}}{K - N_0 + N_0 e^{at}}, \quad (11)$$

где: N_0 — начальная численность популяции.

На графике функция, представленная в выражении (11), имеет следующий вид:

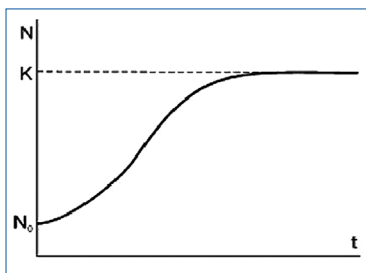


Рис. 3. График функции динамики численности популяции в условиях ограниченных внешних ресурсов

Как было оговорено ранее, изменение численности популяции вида на заданной территории обусловлено такими двумя показателями, как плодовитость (p) и смертность (d) вида [14]. Исходя из графика, представленного на рис. 3, а также с учетом связи динамики популяции, ее показателей плодовитости (p) и смертности (d) за интервал времени (t), представленной в выражении (5), логично следует, что при:

$$N(t) = K; \quad (12)$$

$$N(t)' = \frac{N_0 p(F(t)) - N_0 d(F(t))}{N_0} = 0. \quad (13)$$

Исходя из выражения (13), вытекает, что при любой начальной численности популяции нулевая динамика возможна только в случае одинаковых значений плодовитости и смертности вида. Это указывает на тот факт, что популяционная емкость экосистемы обусловлена влиянием аналогичных показателей плодовитости и смертности факторов, т. е.:

$$K = f(F(t)). \quad (14)$$

Исходя из выражения (14), наглядно видно, что популяционная емкость экосистемы является непостоянной величиной, которая постоянно изменяется под действием экологических факторов. При этом выражение (11) оказывается невозможным использовать для задачи определения численности популяции во времени с учетом непостоянства экологических факторов, поскольку оно предполагает, что (K) является константой.

Поскольку (p) и (d) являются показателями жизнедеятельности системы, то распределение их значений на фоне множества экологических факторов будет подчиняться закону лимитирующего фактора Ф. Блэкмана [18]. Это значит, что определяющим будет являться тот фактор, который наиболее негативно влияет на жизнедеятельность вида. Для показателей (p) и (d) это означает, что из множества значений плодовитости на фоне множества факторов действительным будет наименьшее, а из множества значений смертности на фоне множества факторов действительным будет значение наибольшее. Основываясь на этом, введем новую переменную (a), которая будет характеризовать скорость и направление изменения численности популяции вида, тогда для i -го вида по отношению к множеству j -ых экологических факторов, включающему в себя множества (F_a) и (F_b), значение (a) через значения показателей (p) и (d) в конкретный момент времени (t) можно выразить так:

$$a_i = \frac{\min_j p_i(F_j)}{\max_j d_i(F_j)}, \quad (15)$$

где:

a_i — скорость изменения численности популяции вида в единицу времени при конкретных значениях экологических факторов;

F_j — множество экологических факторов, включающее множества (F_a) и (F_b).

В соответствии с законом толерантности Шелфорда значения показателей (p) и (d), как показателей жизнедеятельности, будут иметь некоторое распределение значений на ограниченном интервале значений экологических факторов. Законы такого распределения, как и прочие параметры функции для каждого вида в отношении каждого фактора, являются отличными и требуют отдельного определения. В настоящий момент в целях упрощения примем в качестве допущения, что значения показателей (p) и (d) на фоне значений экологических факторов имеют нормальное распределение, тогда выражение (16) приобретает следующий вид:

$$a_i = \frac{\min_j \left(a_1 \frac{1}{\sigma_F \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_j - F_{mj})^2}{2\sigma_F^2}} + a_2 \right)}{\max_j \left(-a_3 \frac{1}{\sigma_F \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_j - F_{mj})^2}{2\sigma_F^2}} + a_4 \right)}, \quad (16)$$

где:

- F_j — текущее значение j -го фактора;
- σ_F — среднеквадратичное отклонение значений j -го фактора, определяемое, исходя из зоны толерантности по отношению к i -му виду;
- F_{mj} — оптимальное значение j -го фактора в зоне толерантности по отношению к i -му виду;
- a_{1-4} — параметры функции распределения значений показателей (p) и (d), определяемые для каждого j -ого фактора по отношению к i -му виду.

Выражение (16) в купе с выражением (6) позволяют определить биомассу вида для одного интервала времени при известных значениях экологических факторов. В математическом виде это выглядит так:

$$m_i = m_{0i} N_i a_i. \quad (17)$$

Значения экологических факторов во времени при нормальных условиях имеют, как правило, плавные и предсказуемые изменения, определяемые прежде всего сезонностью. Поражающие факторы чрезвычайных ситуаций техногенного характера прежде всего выражаются в изменении значений окружающей среды, а, значит, могут рассматриваться как значения экологических факторов в период действия ЧС на заданной территории. Это позволяет выстроить систему временного отсчета для определения биомассы экосистемы с учетом факторов ЧС в будущие периоды.

Предположим, что прогноз биомассы осуществляется с момента возникновения ЧС на период времени в 1 год. Как правило, сценарии развития чрезвычайных ситуаций, равно как и мероприятия по ликвидации

последствий, заранее известны. Это говорит о том, что для каждого сценария ЧС техногенного характера известны значения поражающих факторов и период времени их действия. Пусть поражающие факторы ЧС будут иметь время действия 1 неделю, тогда этот интервал времени предлагается использовать как единичный отрезок оси времени (t), на котором рассматривается состояние биомассы экосистемы. Тогда для периода времени в 1 год получится 52 интервала, на которых биомасса будет изменяться; при этом для первого интервала в экологических факторах учитываются факторы ЧС, а для остальных интервалов подставляются статистически прогнозируемые значения экологических факторов для нормального периода. То есть (t) будет определяться как номер интервала из общего количества интервалов ($t_{об}$) в периоде времени ($t_{п}$):

$$t_{об}(t_{чс}) = \frac{t_{п}}{t_{чс}}, \quad (18)$$

где:

- $t_{п}$ — период времени рассмотрения состояния биомассы, в днях;
- $t_{чс}$ — время действия поражающих факторов ЧС, в днях;
- $t_{об}$ — общее количество интервалов времени, на которых будут учитываться изменения значений экологических факторов.

Исходя из этого, оценка биомассы вида на основе выражений (17) и (16) может выглядеть следующим образом:

$$m_i(F_j, t, t_{чс}) = m_{i0} N_{0i} \prod_{t=1}^{t_{об}} \frac{\min_j \left(a_1 \frac{1}{\sigma_F \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_{jt} - F_{mj})^2}{2\sigma_F^2}} + a_2 \right)}{\max_j \left(-a_3 \frac{1}{\sigma_F \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(F_{jt} - F_{mj})^2}{2\sigma_F^2}} + a_4 \right)} \quad (19)$$

или в сокращенном виде:

$$m_i(F_j, t, t_{чс}) = m_{i0} N_{0i} a_i(F_j, t, t_{чс}), \quad (20)$$

где: $a_i(F_j, t, t_{чс})$ — скорость изменения численности популяции во времени на фоне значений экологических факторов.

Выражение (20) является функцией зависимости биомассы вида от изменяющихся во времени значений экологических факторов, в которых учитываются и поражающие факторы ЧС техногенного характера, и время их действия. Получение такой функции позволяет перейти непосредственно к задаче определения аналитического вида комплексного показателя состояния экосистемы под воздействием факторов техногенной нагрузки.

4. Аналитический вид комплексного показателя состояния экосистемы под воздействием факторов техногенной нагрузки

Выражение (9) описывает определение биомассы экосистемы в заданный момент времени на основе связи энергии и массы при условии известной биомассы продуцентов. Это выражение может послужить основой для определения функции ($m_{эц0}$) в аналитическом виде. Для этого необходимо в выражении (9) учесть видовое разнообразие экосистемы.

Исходя из анализа структуры трофических цепей больших экосистем, следует, что на этом этапе учет видового разнообразия для продуцентов, консументов и редуцентов одинаково реализовать нельзя. По видам могут быть рассмотрены только продуценты, поскольку они являются точкой отсчета. Консументы могут быть рассмотрены только по порядку в трофической цепи, поскольку один и тот же вид в реальных условиях может быть участником нескольких пищевых цепочек и занимать в них различный порядок. Редуценты, как совокупность микроорганизмов, представляют собой чрезвычайно сложную систему и требуют отдельного рассмотрения для определения подхода к учету их видового разнообразия. В связи с этим в отношении консументов предлагается допустить, что их известное видовое разнообразие на уровне исходных данных уже разделено на порядки в пищевых цепях, то есть известно, кто для кого является пищей. В отношении редуцентов предлагается рассматривать их как единую массу, поскольку все они зависимы, прежде всего — от мертвой органики.

С учетом видового разнообразия биомасса продуцентов определяется как:

$$m_{п} = \sum_{iп=1}^M m_{0iп} N_{0i}, \quad (21)$$

где:

M — количество видов продуцентов на рассматриваемой территории;

$iп$ — вид продуцента;

$m_{0iп}$ — средняя биомасса для особи $iп$ -го вида;

$N_{0iп}$ — численность популяции $iп$ -го вида в текущий момент времени.

С учетом видового разнообразия определение биомассы консументов по порядкам можно реализовать только в два этапа. Сначала определить биомассу консументов первого порядка, а затем всех остальных порядков:

$$m_{к1} = \sum_{iк=1}^{n1} \frac{m_{пiк} E_{ижмпiк}}{10 E_{ижмкiк}}, \quad (22)$$

где:

$m_{к1}$ — биомасса консументов первого порядка, кг;

n_1 — количество видов консументов, входящих в первый порядок;

$iк$ — вид консумента;

$m_{пiк}$ — биомасса продуцентов, составляющих пищу для консументов $iк$ -го вида, кг;

$E_{ижмпiк}$ — удельная энергия живой органической массы продуцентов, составляющих пищу для консументов $iк$ -го вида, Дж/кг;

$E_{ижмкiк}$ — удельная энергия живой органической массы консументов $iк$ -го вида, Дж/кг.

$$m_{к} = m_{к1} + \sum_{k=2}^X 10^{-k} \left(\sum_{iк=n1+1}^n \frac{m_{пiк-1iк} E_{ижмiкiк-1}}{E_{ижмiкiк}} \right), \quad (23)$$

где:

X — количество порядков консументов в трофической цепи экосистемы;

k — порядок консументов в трофической цепи;

$m_{пiк-1iк}$ — биомасса консументов порядка $k-1$, являющихся пищей для консументов k -го порядка $iк$ -го вида, кг;

$E_{ижмiкiк-1}$ — удельная энергия живой органической массы консументов порядка $k-1$, являющихся пищей для консументов k -го порядка $iк$ -го вида, Дж/кг;

$E_{ижмiкiк}$ — удельная энергия живой органической массы консументов k -го порядка $iк$ -го вида, Дж/кг.

Биомасса редуцентов, как совокупность микроорганизмов и грибов, определяется через коэффициенты мертвой органической массы для биомасс продуцентов и редуцентов:

$$m_{р} = 0,1 \left(\frac{m_{п} k_{мп} E_{иммп}}{E_{ижмр}} + \frac{m_{к} k_{мк} E_{иммк}}{E_{ижмр}} \right). \quad (24)$$

Выражения (21), (23) и (24) представляют порядок определения значений слагаемых выражения (4), которое является числителем функции комплексного показателя ($q(F, t, t_{ч})$). Для определения аналитического вида знаменателя этой функции необходимо учесть в выражениях (21), (22), (23) и (24) время, экологические факторы и время их воздействия, что может быть достигнуто при объединении этих выражений с выражением (20). Тогда функция биомассы продуцентов от времени и значений экологических факторов будет иметь вид:

$$m_{п} (F_j, t, t_{ч}) = \sum_{iп=1}^M m_{0iп} N_{0iп} a_{iп} (F_j, t, t_{ч}), \quad (25)$$

где $a_{iп} (F, t, t_{ч})$ — скорость изменения численности популяции $iп$ -го вида продуцентов.

Соответственно, функция зависимости биомассы консументов от времени и значений экологических факторов будет выглядеть как:

$$m_{к1} (F_j, t, t_{ч}) = \sum_{iк=1}^{n1} \frac{m_{пiк} E_{ижмпiк}}{10 E_{ижмкiк}} a_{iк} (F_j, t, t_{ч}), \quad (26)$$

$$m_{к} (F_j, t, t_{ч}) = m_{к1} (F_j, t, t_{ч}) + \sum_{k=2}^X 10^{-k} \left(\sum_{iк=n1+1}^n \frac{m_{пiк-1iк} E_{ижмiкiк-1} a_{iк} (F_j, t, t_{ч})}{E_{ижмiкiк}} \right), \quad (27)$$

где:

$a_{iк} (F, t, t_{ч})$ — скорость изменения численности популяции $iк$ -го вида консументов;

$m_{0iк}$ — средняя масса особи $iк$ -го вида консументов.

Соответственно, функции зависимости биомассы редуцентов от времени и значений экологических факторов будут иметь следующий вид:

$$m_p(F_j, t, t_{\text{чс}}) = 0,1 \left(\frac{m_{\text{п}}(F_j, t, t_{\text{чс}}) k_{\text{мп}} E_{\text{иммп}}}{E_{\text{ижкмр}}} + \frac{m_{\text{к}}(F_j, t, t_{\text{чс}}) k_{\text{мк}} E_{\text{иммк}}}{E_{\text{ижкмр}}} \right) \quad (28)$$

Таким образом, конечный вид показателя в сокращенном виде выглядит так:

$$q(F, t, t_{\text{чс}}) = \frac{m_{\text{п}} + m_{\text{р}} + m_{\text{к}}}{m_{\text{п}}(F_j, t, t_{\text{чс}}) + m_{\text{р}}(F_j, t, t_{\text{чс}}) + m_{\text{к}}(F_j, t, t_{\text{чс}})} \quad (29)$$

Слагаемые числителя выражения (29) определяются в соответствии с выражениями (21)–(24), а слагаемые знаменателя определяются в соответствии с выражениями (25)–(28).

Заключение

В рамках настоящей статьи был приведен математический аппарат, который позволяет рассматривать динамику биомассы экосистемы под действием поражающих факторов ЧС техногенного характера и после такого воздействия в отдаленном времени. Полученный математический аппарат, разумеется, имеет к настоящему моменту ряд недостатков, к ним относятся:

отсутствие учета питательной базы для продуцентов, которая в значительной степени определяется особенностями трансформации мертвой органической массы редуцентами;

отсутствие учета специфики трофических связей в водных и наземных экосистемах;

отсутствие учета видового разнообразия консументов внутри порядков трофической цепи;

отсутствие учета видового разнообразия редуцентов во всей нише.

Приведенные недостатки составляют дальнейшее направление исследований и требуют отдельного рассмотрения. Главным достоинством полученной модели является то, что она опирается на закон сохранения массы и энергии в биогеохимическом цикле, а также позволяет учесть совокупность живых организмов, взаимосвязь между ними и факторы окружающей среды, что по сути, и обуславливает комплексный охват процессов, происходящих в экосистеме.

Экосистему можно рассматривать с двух сторон: с одной стороны, это сообщество живых организмов, имеющих свою динамику во времени на фоне действия различных факторов, а с другой стороны, это сложная система, обеспечивающая круговорот вещества на планете, компоненты которой также являются динамическими во времени. Положенная в основу модели биомасса, которую возможно декомпозировать на конкретные виды, одинаково может характеризовать как сообщество живых организмов под действием факторов, так и протекание биогеохимических процессов под действием тех же факторов, поскольку каждый вид и каждое звено трофической цепи обеспечивает обмен и преобразование конкретных веществ и элементов. Осуществление перехода от значений факторов техногенной нагрузки к протеканию биогеохимических процессов и является конечной целью оценки состояния экосистем. Именно биогеохимические процессы способны характеризовать количество и состав веществ, находящихся в экосистеме, а также количество и состав веществ в виде накопленного запаса, что по сути характеризует количество доступных для изымания человеком ресурсов без нанесения вреда природе.

Литература

1. Зейнетдинова О. Г., Данилов П. В. Методы оценки экологического ущерба при авариях на потенциально-опасных объектах // Современные проблемы гражданской защиты. 2021. № 4 (41).
2. Ивановская Н. В. Понятие и состав экологического вреда по праву Российской Федерации // Вестник РУДН. Серия: Юридические науки. 2006. № 1.
3. Костылева Н. В., Микишева В. И., Сорокина Т. В. Экологический ущерб: вопросы, вопросы... // Географический вестник. 2010. № 1.
4. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба» (утв. Госкомэкологией РФ 09.03.1999).
5. Тулупов А. С. Методологические вопросы оценки ущерба от загрязнения окружающей среды // РППЭ. 2014. № 9 (47).
6. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30 апреля 2012 г.).
7. Вернадский В. И. Биосфера и ноосфера. М.: Рольф. 2002. 576 с.
8. Поляков В. И. Роль биогенеза в формировании месторождений полезных ископаемых // Современные наукоемкие технологии. 2005. № 2. С. 19–22.
9. Смолькин В. П. Устойчивое экологическое развитие: основные подходы и понятия // Вестник Северного (Арктического) федерального университета. Серия: Гуманитарные и социальные науки. 2014. № 5.
10. Авдеева А. В., Жандармова Е. А., Сорокин А. Ю. Обоснование энергетического подхода в решении задачи комплексной оценки воздействия антропогенных и техногенных факторов при воздействии на экосистемы // Образование и право. 2022. № 4.
11. Владимиров В. А. Разливы нефти: причины, масштабы, последствия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2014. № 1.
12. Лабутова Н. М., Банкина Т. А. Основы биогеохимии: учеб. пособие. СПб.: Изд-во С.-Петербурга. ун-та, 2013. 240 с.
13. Общая и прикладная экология / Г. С. Розенберг, Ф. Н. Рянский, Н. В. Лазарева и др. Самара-Тольятти: Изд-во Самарского гос. экон. ун-та, 2016. 452 с.
14. Комаров М. А., Осипов Г. В., Петров В. С. Конкурентная динамика живых систем: Учеб.-метод. пособие. Н. Новгород: Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского, 2010. 63 с.
15. Юницкий А. Э., Синчук О. В. Трофические цепи и биологические ритмы как основа создания биосферы ЭкоКосмоДома // Сб. материалов II Международной научно-технической конференции «Безракетная индустриализация ближнего космоса: проблемы, идеи, проекты». 2019.
16. Алексанян И. Ю., Нугманов А. Х., Золина Н. П. Анализ системных связей между энергетической ценностью продукта и пищевой энергией, потребляемой человеком, с учетом влияния варьируемых факторов // Вестник АГТУ. Серия: Управление, вычислительная техника и информатика. 2009. № 2.
17. Белянин И. А. Демэкология рыба Vimba vimba vimba (Cyprinidae) — вселенца в Волгоградское водохранилище: дисс. ... кандидата биологических наук: 03.02.08 / Место защиты: ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Нижегородский государственный университет им. Н. И. Лобачевского», 2017. 175 с.
18. Бегжанова Г. Т. Некоторые аспекты изучения равновесия в экосистемах // Форум молодых ученых. 2017. № 6 (10).

Сведения об авторах

Авдеева Анастасия Васильевна: магистр, Российский государственный социальный университет (РГСУ), студент каф. охраны природы. Москва, Россия. SPIN-код: 3080-8966.

Сорокин Алексей Юрьевич: к.т.н., АГЗ МЧС России, преподаватель каф. информатики и вычислительной техники. Химки, Россия. SPIN-код: 8853-6469.

Гапоненко Альбина Вячеславовна: д.п.н., проф., Российский государственный социальный университет (РГСУ), доцент каф. охраны природы. Москва, Россия. SPIN-код: 1770-4826.

Рыбаков Анатолий Валерьевич: д.т.н., проф., АГЗ МЧС России, нач. науч.-исслед. центра. Химки, Россия. SPIN-код: 8654-3788.

Information about authors

Avdeeva Anastasia V.: Master's Degree, Russian State Social University, Student of the Department of Nature Protection. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 3080-8966.

Sorokin Alexey Y.: PhD (Technical Sc.), Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Lecturer of the Department of Computer Science and Computer Engineering. Khimki, Russia. SPIN-scientific: 8853-6469.

Gaponenko Albina V.: ScD (Pedagogical Sc.), Professor, Russian State Social University, Associate Professor of the Department of Nature Conservation. Moscow, Russia. SPIN-scientific: 1770-4826.

Rybakov Anatoly V.: ScD (Technical Sc.), Professor, Academy of Civil Defense of the Ministry of Emergency Situations of Russia, Head of Research Center. Khimki, Russia. SPIN-scientific: 8654-3788.

Издания ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ)

Авторы, название	URL
Акимов В.А. и др. Глобальные и национальные приоритеты снижения риска бедствий и катастроф. Монография.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27562706
Аюбов Э.Н. и др. МЧС России в борьбе с чрезвычайными ситуациями.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613062
Аюбов Э.Н. и др. Природные угрозы.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613013
Аюбов Э.Н. и др. Техногенные угрозы. Гидродинамические и транспортные аварии.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27612998
Аюбов Э.Н. и др. Техногенные угрозы. Радиационные и химические аварии.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27612987
Аюбов Э.Н. и др. Социальные угрозы.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613407
Аюбов Э.Н. и др. Терроризм и криминогенные угрозы.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613403
Аюбов Э.Н. и др. Пожары и взрывы.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613397
Аюбов Э.Н. и др. Опасности в горах.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613393
Аюбов Э.Н. и др. Первая помощь.	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613377
Аюбов Э.Н. и др. Действия в экстремальных ситуациях (самозащита).	http://elibrary.ru/item.asp?id=27613376
Фалеев М.И. и др. Управление рисками техногенных катастроф и стихийных бедствий (пособие для руководителей организаций).	http://elibrary.ru/item.asp?id=28413973
Акимов В.А. и др. Пожарные риски России.	http://elibrary.ru/item.asp?id=29013245
Белов С.В. и др. Справочник о приемах и способах защиты в чрезвычайных ситуациях.	http://elibrary.ru/item.asp?id=26363714
Афанасьева Е.В. и др. Основные направления совершенствования деятельности МЧС России в области ликвидации последствий дорожно-транспортных происшествий на современном этапе. Научно-методический труд.	http://elibrary.ru/item.asp?id=23508042
Фалеев М.И. и др. Раннее предупреждение о чрезвычайных ситуациях. Монография.	http://elibrary.ru/item.asp?id=23355898
Настольная книга руководителя гражданской обороны. Изд. 6-е, актуализ. и дополн.	https://elibrary.ru/item.asp?id=35027110