

УДК 624.131

И.А. Красовская

Устойчивость эколого-геологических систем: содержание и определение

Междисциплинарный характер проблем взаимодействия общества и природы predetermined широкий спектр экологических исследований, их многоаспектность. Устойчивость является одним из фундаментальных понятий, используемых при исследовании и оценке развития эколого-геологических систем. Под эколого-геологическими системами понимают определенный объем литосферы как геологический компонент природной среды, с находя-

щейся в ней и на ней биотой. Каждая эколого-геологическая система включает в себя три подсистемных блока – литосферный (абиотический), биоту (биотический) и источники воздействия техногенного и природного происхождения [1]. В настоящее время проблема оценки устойчивости эколого-геологических систем к техногенному воздействию является весьма актуальной, активно разрабатываемой в направлениях терминологии, принципов и методов оценки, критериев типизации, методики картографирования типов и других [1-5].

Само понятие «устойчивость» относится к терминам свободного пользования и в разных науках применяется неоднозначно [5]. Наиболее полно понятие устойчивости было разработано в механике, математике, кибернетике, затем понятийная база была перенесена в биологию, а в 70-х годах – в географические науки и в инженерную геологию. Заимствовав термин «устойчивость» из области механики и кибернетики, специалисты в области наук о Земле развивают его применительно к эколого-геологическим системам или геологической среде. Анализ этого понятия дается в работах А.Д. Арманд, А.С. Герасимовой, Г.А. Голодковской, М.Д. Гродзинского, В.Ф. Котлова, В.Т. Трофимова, В.А. Королева, А.П. Камышева, Т.П. Куприяновой и др. [2, 5-7].

Так, М.Д. Гродзинский [7] рассматривает устойчивость в трех формах – инертность, восстанавливаемость и пластичность и дает следующее ее определение: «устойчивость геосистемы состоит в ее способности при воздействии внешнего фактора пребывать в одном из своих состояний и возвращаться в него за счет инертности и восстанавливаемости, а также переходить из одного состояния в другое за счет пластичности, не выходя при этом за рамки инварианта в течение заданного интервала времени». Предложенные формы устойчивости являются справедливыми для воздействующего фактора, временного интервала, вида геосистемы, ее состояния и инвариантов, а также для любого числа и набора переменных, по которым строится фазовое пространство геосистемы. Поскольку устойчивость в геосистемах реализуется в различных формах, очевидно, что один показатель, характеризующий устойчивость, оказывается мало информативным. Более эффективен, по мнению М.Д. Гродзинского, подход к разработке комплексных показателей, характеризующих отдельные ее формы и более частные свойства. При выборе количественных показателей устойчивости геосистем он предлагает использовать аппарат теории надежности, опирающийся на методы теории вероятности, математической статистики, теории графов. Важнейшим понятием этой теории является понятие «отказа», которое в общем виде определяется как событие выхода системы из области допустимых значений ее переменных. М.Д. Гродзинский предлагает различать отказы природных и природно-технических систем. Для природных геосистем отказом может считаться выход ее из заданного состояния Z_0 , определяющего область «качественного своеобразия» геосистемы; для природно-технической геосистемы отказом является выход ее из области Z_0 , «находясь в которой она может выполнять свою функцию не ниже некоторой критической (допустимой) величины».

Зависимость устойчивости от интенсивности воздействующего фактора, по мнению М.Д. Гродзинского, определяет дифференцированное обоснование норм антропогенной нагрузки для поддержания различных форм устойчивости, так как при незначительной нагрузке устойчивость геосистемы обеспечивается ее инертностью, при усилении на нее воздействия – восстанавливаемостью, а далее – пластичностью. При превышении нагрузки выше критической наступает отказ системы. Знание вероятностей отказов системы и вероятностей ее восстановления позволяет обосновывать нормы и частоту техногенного воздействия на нее [7].

Наиболее полно обобщил понятия устойчивости А.Д. Арманд [6]. В его трудах устойчивость – это способность системы сохранять данный объект в течение некоторого времени; способность восстановить прежнее состояние после возмущения; способность адаптироваться к изменившимся условиям, переход в новое состояние равновесия; способность сохранять некоторые жизненно важные параметры на определенном уровне за счет других параметров; гомеостазис; способность гасить внешний сигнал, многократно передавая его от одного элемента к другому; способность к длительному (но не бесконечному) накоплению вредных воздействий без видимого вреда системе; способность сохранять производственную функцию в социально-экономической системе и др. Автор определяет устойчивость как способность геосистемы вернуться в исходное состояние после возмущения. Часто им использовался термин «гомеостазис», который понимался как способность возвращаться к начальному состоянию после внешнего или внутреннего воздействия.

А.Д. Арманд предлагает различать два вида: «устойчивость 1» – неизменность во времени или в пространстве безотносительно к причине (внешней или внутренней), инертность, стабильность. Этот вид не предполагает активной реакции системы на воздействие, что отвечает ее стабильности. «Устойчивость 2» – способность систем противостоять внешним и внутренним возмущениям, сохраняя равновесное или гомеостатическое состояние, а также структуру, характер функционирования и траекторию движения в течение относительно продолжительного времени, сравнимого с характерным временем изменяющих систему процессов. Устойчивость этого типа в большинстве случаев возникает в результате способности к саморегулированию под действием обратных связей.

Т.И. Аверкина, А.С. Герасимова [2] устойчивость (инвариантность) системы «геологическая среда – внешнее воздействие», определяют на основе выбора тех характеристик системы, которые классифицируют ее как качественно своеобразную типологическую единицу; установления комплекса существенных для оценки устойчивости критериев; выделения существенных элементов, связей и отношений системы. По мнению авторов, предложенный подход открывает возможность определения диапазона состояний системы, в пределах которых она остается устойчивой, а также установлению для нее предельно допустимых нагрузок.

Е.С. Дзекцер выделяет два вида устойчивости – структурно-функциональную, связанную с инертностью структуры и реакцией среды на одни и те же воздействия, и вещественно-энергетическую, связанную с постоянством вещественного состава и энергетического баланса. С последней он связывает возникновение и активизацию природных и антропогенных геологических процессов. Эти виды устойчивости характеризуют способность экосистем выдерживать изменения, создаваемые внешними природными и техногенными воздействиями, восстанавливаться или самовосстанавливаться [8].

Г.А. Голодковская и Ю.Б. Елисеев [9] предлагают применять понятие «устойчивость», исходя из семантической его корректности по отношению к таким синонимам, как чувствительность к техногенным нагрузкам, упругость, восстанавливаемость, инертность или лабильность природных систем, и выделяют три возможных подхода, различающихся по принципу конкретизации объекта. В первом случае устойчивость системы трактуется лишь относительно определенного вида воздействия на эту систему: например, механическая устойчивость массива по отношению к механическому воздействию и т.п. По мнению авторов, главным недостатком такого подхода следует считать многовариантность понятия «устойчивость», так как любая конкретная природная система обладает столькими видами устойчивости, сколько видов

нагрузок на нее воздействует. Во втором случае предполагается, что свойство устойчивости геологической среды является изначальным и не зависит от внешнего воздействия. Например, тип геологического строения территории, особенности взаимосвязи водоносных комплексов, наличие буферных зон и термодинамических геохимических барьеров определяют устойчивость данного типа территории к ее химическому загрязнению. При таком подходе определение устойчивости не выходит за рамки самых общих категорий, когда реакция среды на техногенное воздействие проявляется в изменениях формы, состава и состояния твердого и жидкого компонентов среды или обоих совместно. В третьем случае устойчивость геологической среды определяется на компонентной основе, т.е. выясняется подверженность отдельных компонентов геологической среды техногенным изменениям. Этот подход удобен для решения задач, связанных с конкретным видом техногенного воздействия, особенно если оно ограничено одним-двумя компонентами среды. При региональных оценках, когда изменение одного компонента приводит в действие всю сложную природно-техногенную систему, такой упрощенный подход чреват серьезными ошибками, так как пока еще не найдены пути комплексной оценки отдельных прогнозируемых изменений. При региональной оценке устойчивости геологической среды крупных территорий следует учитывать сложность структуры ее техносферы с учетом взаимопогашения и взаимоусиления влияния отдельных источников техногенеза. Однако эта задача пока еще не нашла удовлетворительного решения. В цитируемой статье [9] рассматривается и вопрос устойчивости природной системы с учетом ее положительного экологического потенциала, определяемого через характер и интенсивность реакции среды на техногенное воздействие. Суть последних раскрывается через развитие или активизацию геологических, инженерно-геологических и гидрогеологических процессов и явлений, включая загрязнение органическими и химическими веществами. Это открывает возможность использовать их в качестве критериев региональной оценки устойчивости среды отдельных территорий.

В результате обобщения и анализа основных понятийных категорий проблемы Ю.А. Мамаев и М.Б. Куринов предложили определение термина «устойчивость» применительно к природно-техническим системам. Под устойчивостью ПТС авторы понимают ее способность при воздействии природных, техногенных и природных, активизированных техногенезом факторов сохранять равновесие и единство своих структурных и функциональных связей. Авторы утверждают, что «устойчивость» как результат взаимодействия геосистемы и внешних техногенных воздействий нельзя оценивать вообще, а только к конкретному воздействию, т.к. одна и та же система может быть устойчива к одним воздействиям и неустойчива к другим. Иными словами, любая геосистема обладает свойством избирательной реакции на разные внешние воздействия: физические, энергетические (геодинамические), механические, геохимические и др. Таким образом, любая конкретная природная (геологическая) среда может характеризоваться множеством устойчивостей (геодинамической, геохимической, экологической, устойчивостью рельефа и др.), из которых, как правило, выделяется, характеризуется и оценивается тот вид устойчивости геосистемы (геологической среды), показатели которой при внешнем воздействии определенного типа и характера изменяются в наибольшей, подавляющей степени.

Оценка устойчивости геологической среды может быть проведена по самым разным показателям в зависимости от ее типа, цели освоения и вида воздействия [2]. Обычно анализируется тот или иной расчетный количественный показатель состояния геологической среды, либо приводится качественная характеристика сре-

ды в виде экспертной оценки в баллах на данный момент времени. Во всех этих случаях отсутствуют четкие объективные критерии оценки предельной техногенной нагрузки, нет обоснованного прогноза развития процессов, вызываемых воздействием, не определяется возможность возврата системы в исходное состояние и не указывается время достижения ею финального состояния. Поэтому используемые показатели устойчивости геологической среды могут рассматриваться лишь как показатели качества среды в данный момент времени [2].

Не менее важен вопрос о механизмах устойчивости геологической среды и отдельных ее компонентов. Вопросы эти пока также плохо изучены, однако некоторые механизмы устойчивости уже известны. Согласно А.Д. Арманд [6] все механизмы устойчивости делятся на четыре группы: механизмы, сохраняющие (стабилизирующие): 1) состояние систем; 2) тип функционирования; 3) структуру; 4) направленность (траекторию) движения систем.

Среди механизмов, сохраняющих состояние геологической среды и ее компонентов, выделяются: инерционность системы, закрытость (замкнутость) системы, проточность системы и отрицательная обратная связь. Хорошо известно, что с увеличением массы тела (массива) уменьшается его реакция на одиночный импульс (возмущение) и увеличивается время реакции на длительное воздействие одной и той же силы. Подобно инерционному телу реагирует на химическое воздействие стоячий водоем или замкнутый водоносный горизонт, на термическое воздействие – массив мерзлых пород и т.д.; во всех этих случаях амплитуда и скорость отклика системы на возмущение зависят от массы воды и мерзлых пород.

Инерционность систем может быть обусловлена наличием у них «резервной емкости». Во всех случаях, когда устойчивость состояния определяется инерцией, происходит необратимое расходование некоторого «запаса», определенного качества системы, при этом эффект прямо пропорционален «запасу» массы системы или ее «емкости». Так, в течение определенного времени может происходить накопление загрязняющих веществ в почве без видимых последствий для ее структуры, состояния, плодородия. При этом в барьерных зонах или во всей почвенной толще может происходить нейтрализация загрязнений, сопровождающаяся необратимым расходованием определенных элементов.

Стабилизации состояния элементов геологической среды служит и изоляция (или замкнутость) ее отдельных элементов. С точки зрения термодинамики геологическая среда представляет собой открытую изолированную систему, т.е. систему, обменивающуюся веществом и энергией с окружающей средой и другими системами. Однако отдельные ее компоненты могут находиться в квазизакрытом или квазиизолированном состоянии. Изоляции элементов геологической среды служат непроницаемые слои горных пород (водоупоры), слои пород с низкой теплопроводностью или в общем – породы с очень низкими коэффициентами тепло-, массо- и энергопереноса. Изоляции также способствует наличие так называемых переходных слоев на границах раздела фаз в горных породах, переходных зон между элементами геологической и окружающей среды. В качестве последней, например, выступает слой выветрелых пород на границе с дневной поверхностью, предохраняющий нижележащие породы от разрушения. С термодинамической точки зрения возникновение слоя выветрелых пород обусловлено наличием градиентов обобщенных потенциалов (химических, термических, механических и других потенциалов) на границе двух сред – породы и атмосферы. Условия для возникновения этих градиентов могут быть созданы как естественным, так и техногенным путем.

Другой пассивный механизм устойчивости состояния систем связан с так называемой проточностью, когда компоненты воздействия или его субстанции не «задерживаются» в системе, а выносятся из нее без существенных последствий для самой системы. Примером этого может служить вынос из системы загрязняющих веществ, например, при промывке или инфильтрации. Проточности и стабилизации систем способствует также циклическая организация движения вещества в них (круговорот воды, химических элементов, превращения горных пород и т.д.).

Кроме рассмотренных механизмов стабилизации состояния геологической среды и ее элементов в ряде случаев действует механизм отрицательной обратной связи, когда поступивший на вход системы импульс, пройдя по цепи обратной связи, складывается с обратным знаком со следующим импульсом и начальное состояние системы в результате этого полностью или частично восстанавливается. Для абиотических систем этот механизм близок к хорошо известному в физике и теории систем термодинамическому принципу Ле Шателье, согласно которому в системе в ответ на внешнее воздействие, выводящее ее из равновесия, стимулируются процессы, стремящиеся ослабить результаты этого воздействия. Если по мере возрастания силы воздействия процессы противодействия начинают ослабевать, налицо признаки потери устойчивости и деградации системы.

Среди механизмов устойчивости функционирования абиотических систем на первое место ставится дублирование элементов, выполняющих одни и те же функции: выход из строя одного из элементов дублируется другим, и система продолжает функционировать, как и прежде. В тех случаях, когда инвариантом оказывается структура системы, на ее сохранение продолжают работать все рассмотренные выше механизмы стабилизации состояния. Наименее изучены и наиболее сложны механизмы сохранения направления развития геологической среды и ее элементов, в основе которых лежат фундаментальные геологические закономерности развития литосферы [5].

В природных экосистемах взаимодействие биотического и абиотического компонентов обеспечивает замкнутость биогеохимических циклов. При включении в систему технического компонента неизбежно происходит их разрыв. Природа, реагируя на вмешательство, «включает» компенсационные процессы, действие которых направлено на ликвидацию указанного разрыва. Поиски компромисса между необходимостью устойчивого существования искусственных антропогенных экосистем (городов) и сохранением устойчивости естественных экосистем также должны базироваться на принципе Ле Шателье.

В заключение следует отметить, что на современном историческом этапе в пределах Беларуси выполнен целый ряд работ, касающихся оценки устойчивости природной среды к техногенным воздействиям. При этом работы белорусских исследователей посвящены, в основном, изучению и оценке современного состояния техногенно измененных ландшафтов (Губин, Коркин, Денисова, 1997; Капельщиков, Михунов, Новиков, 1997), эколого-геохимической обстановки (Лукашев, Вадковская, 1989), гидрогеологических условий (Калинин, 1998) отдельных регионов с целью их устойчивого развития, а также отражают проявление техногенно обусловленных инженерно-геологических процессов (Колпашников, 2001) и т.д. Тем не менее, результаты работ показывают отсутствие комплексного подхода в оценке устойчивости территорий с точки зрения экологических функций литосферы.

Таким образом, приведенный анализ публикаций позволяет сделать следующие выводы:

1. Многочисленные подходы к формулировке термина «устойчивость» приводят к неоднозначной его трактовке, не позволяя, тем самым, прийти к единому пониманию понятия устойчивости эколого-геологических систем.

2. В большинстве публикаций, говоря об изменениях геологической среды (эколого-геологических систем), авторы подразумевают только техногенные изменения, не учитывая при этом изменения, происходящие в результате природной эволюции экосистем.

3. В связи с недостаточной разработкой понятийной базы, актуальной остается разработка принципов и методики районирования территорий по степени устойчивости эколого-геологических систем (геологической среды) к техногенным воздействиям.

Анализ исследований по данному вопросу позволяет определить свою позицию по отношению к определению устойчивости как основному синтезирующему показателю в определении состояния эколого-геологической системы. Можно предложить следующее развернутое определение: *устойчивость эколого-геологической системы (геологической среды, территории) – это ее способность при техногенном воздействии определенного типа и интенсивности сохранять равновесие и единство связей и параметров состава, структуры, состояния и свойств отдельных компонентов, или изменять их в пределах, не нарушающих нормального системного функционирования.* При количественной оценке устойчивости эколого-геологической системы необходим обязательный комплексный учет всех природных и техногенных факторов (выраженный интегральным показателем), определяющий прямой и обратный переходы системы из устойчивого состояния в неустойчивое.

ЛИТЕРАТУРА

1. Трофимов В.Т., Герасимова А.С., Красилов Н.С. Устойчивость геологической среды и факторы ее определяющие // Геозкология, 1995, № 5. С. 96-107.
2. Аверкина Т.И., Герасимова А.С., Ершова С.Б. и др. Устойчивость геологической среды: теория, проблемы картографирования // Инженерная геология: теория, практика, проблемы. М., 1993. С. 12-26.
3. Герасимова А.С., Королев В.А. Проблемы устойчивости геологической среды к техногенным воздействиям // Гидрогеология и инженерная геология. Обзор. М., 1994. – 47 с.
4. Емельянова Т.Я., Строкова Л.А. О принципах и методике районирования территории по устойчивости геологической среды к техногенному воздействию (на примере Томского Приобья) // Геозкология, 1999, № 2. С. 164-171.
5. Королев В.А. Мониторинг геологической среды: Учебник / Под ред. В.Т. Трофимова. М., 1995. – 272 с.
6. Арманд А.Д. Устойчивость (гомеостатичность) географических систем к различным типам внешних воздействий // Устойчивость геосистем. М., 1983. С. 4-31.
7. Гродзинский М.Д. Устойчивость геосистем. Теоретический подход к анализу и методы количественной оценки // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1987, № 6. С. 5-15.
8. Дзекцер Е.С. Геологическая опасность и риск (методология исследования) // Инж. геология, 1992, № 6. С. 3-10.
9. Голодковская Г.А., Елисеев Ю.Б. Геологическая среда промышленных регионов. М., 1989. – 220 с.

S U M M A R Y

The article deals with the analysis of the essence and the definition of the notion «stability». Contemporary ideas of the stability mechanism of the ecological and geological systems are considered.

Поступила в редакцию 18.11.2003