

ОБЩАЯ ЭКОЛОГИЯ

А. А. Коновалов

ОБЩИЕ ЧЕРТЫ РАЗВИТИЯ ЭКОГЕОСИСТЕМ

Анализируются закономерности развития гео-, био- и социосистем разного ранга (экогеосистем), затронутых (связанных с жизнедеятельностью человека). Определены общие черты их развития: цикличность, иерархичность циклов, соответствие форм существования (структур) определенным циклам, развитие каждой структуры за счет предшествующих, трехстадийность развития (становление — зрелость — упадок). Приведены примеры развития и энтропии различных экогеосистем.

Экогеосистемы — это расположенные в биосфере, в пределах нескольких тысяч метров выше и ниже поверхности Земли, гео-, био- и социосистемы разного ранга, связанные с деятельностью человека.

Экогеосистемы представляют собой иерархию подсистем различной природы и возраста. Каждый последующий член иерархии, более молодой, подвижный и сложноорганизованный, появился и развивается за счет вещества и энергии предыдущих. Обладая определенной автономностью, подсистемы несут в себе (наследуют) и общие с системой черты, подобны ей. Для экогеосистем общим является цикличность (пульсация) внешних условий, процессов и состояний, круговороты вещества, энергии и других субстанций, обусловленные в первую очередь астрономическими причинами: периодическим вращением Земли вокруг Солнца и своей оси; колебаниями оси, активности Солнца и др. Кроме того, системы претерпевают собственные колебания, вызванные взаимнообратимыми отношениями их частей, подсистем друг с другом, типа толчок-отталкивание, хищник-жертва и др., обычно носящие характер случайностей, флуктуаций. Эти факторы, накладываясь друг на друга, нарушают симметрию циклов, усложняют характер и предсказуемость развития.

Циклы делятся на простые (двоичные) и сложные. Простые включают два участка с разным направлением развития — подъема (становления) и спада. Сложные состоят из простых, составленных так, что среднее положение колеблющейся в простом цикле величины само перемещается в цикле колебаний с большим периодом. Это вызывает смещение начала и конца циклов, развитие по спирали, а не просто замыкание кругов.

Любая существующая система — воплощение определенного порядка, установленного и поддерживаемого внешними условиями. Если ее изолировать, порядок начнет нарушаться. Т. е. естественной тенденцией развития изолированных систем является увеличение беспорядка (износа, разрушений, единообразия).

Мерой беспорядка служит энтропия S . Смысл этого понятия сложен, неоднозначен даже для закрытой системы. На выходе из системы энтропия меняет знак на отрицательный, становится негэнтропией. При низких температурах T энтропия S уменьшается (принцип Нернста), а ее прирост ΔS , производство из равных порций тепла, увеличивается (формула Клаузиуса) — рост единообразия частей (разупорядочение) сопровождается убылью многообразия, упрощением структуры целого.

Неоднозначность зависимости ΔS и S от T обуславливает иерархизацию ее бытия по ступеням развития с примерно постоянной структурой (порядком): по фазам (пар, жидкость, твердое тело), режимам течения (турбулентное, ламинарное), эпохам (климатическим, геологическим, общественно-историческим) — так, что вместе с уменьшением порядка (увеличением ΔS) идет и упрощение структуры (уменьшение S), причем переход от структуры к структуре осуществляется скачком. Скачок (фазовый переход, разлом) и постоянство структуры — понятия относительные. На скачок также затрачивается время, хотя и существенно меньшее длительности ступени, а постоянство структуры — это квазиравновесие, характеризующееся медленным (незаметным) накоплением внутренних разрушений (под действием своего веса, химических реакций и т. д.).

По И. Пригожину [1986], в открытых системах любое малое приращение энтропии dS складывается из двух частей. Одна часть, $d_i S$ — прирост внутреннего беспорядка, как и в закрытых системах, всегда положительна. Другая, $d_e S$ зависит от граничных условий и может быть и положительной и отрицательной (негэнтропией). Последняя противостоит деградации. Система не разрушается, если $| -d_e S | \geq d_i S$ и соответственно $dS \leq 0$. Рост негэнтропии в системе означает ее убыль в окружающей среде. Поэтому при прогрессивном развитии ($dS < 0$) и стационарном состоянии системы ($dS = 0$) деградирует внешняя среда. При $dS > 0$ деградирует система, но это еще не

равносильно прогрессу окружающей среды. Энтропия системы превращается в неэнтропию окружения при условии утилизации продуктов деградации (отходов), вовлечения их в круговорот веществ и энергии как ресурсов жизнеобеспечения других систем или создания новых.

Общепринятое деление систем на изолированные (закрытые), которые могут только деградировать, и открытые, способные к прогрессивному развитию, условно. Все реальные системы сначала зарождаются и прогрессируют, а затем деградируют. Система открыта для энергии, массы, информации до заполнения соответствующих емкостей, после чего закрывается (как сосуд в водоеме). Переток субстанций из внешней среды и прогресс открытой системы так же естественны, как износ и рассеяние закрытой. В этом смысле все природные системы самоорганизующиеся. Несамоорганизующимися, изначально деградирующими, являются только технические системы.

Траектория развития (эволюции) реальной системы, начиная с микроуровня, представляет собой ломаную линию. Это означает, что система производит не только энтропию (на участках спада), но и неэнтропию (на участках подъема). Вектор развития (результатирующая энтропия — глобальный тренд) определяется разницей между суммами энтропии и неэнтропии на этих участках, ее знаком. Конечное время жизни всех систем свидетельствует о фундаментальном превалировании энтропии над неэнтропией, разрушения над созиданием.

По мере уменьшения масштаба или удаления от места наблюдения траектория развития сглаживается, принимая форму двоичного цикла. Жизнь любой системы можно представить как сглаженный двоичный цикл.

Величина dS в экосистемах в многолетнем выражении положительна. Но в пределах распространения каждого цикла, в “теплое” его время, она может быть отрицательной. Т. е. имеют место как энтропийные, так и неэнтропийные участки развития. Наиболее подвижен и оборачиваем приповерхностный слой литосферы — почва. Это основание пищевой пирамиды и место замыкания экологических цепей.

Элементарный цикл физической системы — одно колебание атома — происходит за период $\tau_0 = 10^{-13}$ с (“мгновенно”), независимо от внешних условий, — период цикла настолько мал, что они просто не успевают измениться. В любой иерархии можно выделить такой элементарный (неделимый) цикл, в течение которого изменением внешних условий можно пренебречь, и принять его за единичный акт (масштаб, строительный модуль) развития с минимальным изменением энтропии. Например, в плановых и отчетных документах о работе предприятия за квартал фигурируют месячные показатели, за год — квартальные, за пятилетку — годовые и т. д. Такая форма отчетности, апробированная многолетней практикой, отражает объективный факт подобия производственных процессов на разных промежутках времени.

Жизненные циклы больших систем приблизительно кратны меньшим, и любой из них можно принять за элементарный акт бытия системы с большим жизненным циклом. Ход событий в системах одной природы, но с разным элементарным циклом, их локализация и влияние на другие системы приблизительно подобны. Деятельность ручья и реки состоит из одних и тех же актов, идущих в одинаковой последовательности и формирующих подобные формы; структуры управления государством и сельской общиной идентичны; для бабочки-однодневки ночное похолодание так же значимо, как для нас начало ледниковой эпохи.

Онтогенез (развитие индивида) есть сжатое повторение филогенеза (истории вида). Зародыши проходят в сокращенном виде эволюцию своих предков. Развитие человечества повторяет развитие ребенка: ползание — прямохождение — речь — письмо [Голубев, 1990]. Подобие (масштабная инвариантность, фрактальность) присуще всем формам функционирования экосистем. Но это подобие неполное. В каждом последующем цикле большее развитие получают поздние образования, а ранние угнетаются (забываются).

Если бы сложный цикл с периодом τ_d представлял собой цепь элементарных с одинаковым периодом τ_0 , то при постоянных температуре T и давлении P энтропия определялась как произведение Wb , где $W = \tau_d/\tau_0 = V/V_0$ — число элементарных циклов в сложном цикле или элементарных объемов (в физической системе $V_0 = 10^{-23}$ см³ — объем атома) в его пространственной локализации V ; b — энтропия за элементарный цикл. Но система одновременно колеблется в циклах с разным периодом и каждый меньший цикл может служить для большего элементарным, т. е. делитель в W изменяется от τ_0 до τ_d (или от V_0 до V). Поэтому энтропия пульсирующей системы определяется из интегрального выражения, сводящегося к формуле Больцмана: $S = b \ln W$, где $W > 1$ — термодинамическая вероятность.

В экогеосистемах в качестве элементарных частей выступают макросистемы, объем и время жизни которых (V_3 и τ_3) на много порядков больше, чем у атома (V_0 и τ_0). Формула Больцмана получена для закрытых систем, т. е. для реальных систем на спаде развития, когда $\tau_d > \tau_3$ и $W > 1$. Но она справедлива и для предшествующего этапа становления, временной интервал которого $\tau_3 > \tau_d > \tau_0$. Тогда $W < 1$, энтропия переходит в негэнтропию. Рост негэнтропии при $W < 1$ (на подъеме) соответствует увеличению внутренней энергии, рост энтропии при $W > 1$ — растрате. Из равенства $W = \tau_d/\tau_0 = V/V_0$ следует, что существует минимальная скорость износа системы, независящая от внешних условий, — $v_0 = V/\tau_d = V_0/\tau_0 = 10^{-10}$ см³/с.

Многие общие закономерности развития (эволюции) наглядно проявляются в поведении нагруженных твердых тел.

На рис. 1 дан схематический график деформации δ во времени τ при постоянных P и T . Полный цикл включает три стадии: 1) вязко-упругую, 2) линейной (стационарной) ползучести и 3) прогрессирующего течения. На 1-й стадии (этап становления) тело упрочняется, на 2-й и 3-й разупрочняется (этап спада).

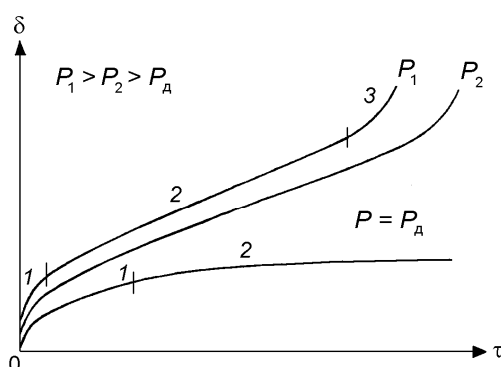


Рис. 1. Ход деформации δ во времени τ при разных давлениях P .
1, 2, 3 — стадии вязко-упругой, линейной и прогрессирующей ползучести;
 P_d — прочность.

Деформация складывается из упругой (обратимой) и остаточной (необратимой). На 1-й стадии развивается в основном упругая деформация, что соответствует накоплению потенциальной энергии (и негэнтропии) и уплотнению. На 2-й стадии прирост упругой деформации прекращается. Увеличение деформации идет только за счет ее остаточной части. Разрушительной работе внешних сил противостоит запасенная упругая энергия, растрачиваемая по мере разрыва образованных на 1-й стадии упругих связей. К началу 3-й стадии упругая энергия исчерпана, начинается необратимое разрушение.

На 1-й и 3-й стадиях скорость развития v непостоянна. Они значительно меньше 2-й, а вероятность гибели системы на них больше. На 2-й стадии v постоянна и минимальна за весь период жизни. Поэтому 2-ю стадию (стационарной ползучести) можно назвать стадией устойчивого, а 1-ю и 3-ю — неустойчивого развития (кризисными).

Неустойчивость на 1-й стадии позитивна — это рождение, накопление сил; на 3-й негативна — деградация, ведущая к гибели. На 1-й стадии система может только брать. Ее проблема — не взять больше, чем она способна «переварить». На 3-й стадии кризис обусловлен исчерпанием жизненных сил. Здесь система не в состоянии что-либо брать, а может только отдавать.

Деформирование и разрушение единый процесс, включающий механическую работу и плавление. В первом случае действующей силой служит внешнее давление P , во втором — температура T . Полная энергия разрушения тела примерно равна теплоте сублимации, энергия деформации на 2-й стадии (энергия устойчивого развития) — теплоте плавления [Коновалов, 1999]. Последнюю можно трактовать как полную энергоемкость системы E . Больше, чем E , количество энергии (пищи, информации) система не в состоянии воспринять позитивно — она начинает разрушаться.

При высоких температурах и близких к нулю давлениях разрывы накапливаются в течение длительного времени при относительном постоянстве формы, которая сохраняется благодаря

защитной оболочке и жесткому скелету и после полной деградации внутреннего содержания. Такое постоянство очень неустойчиво и нарушается, часто с катастрофическими последствиями (но без выделения тепла) — обвалами, оползнями, лавинами, — даже при незначительных флуктуациях. Примером такой “холодной” общественной катастрофы может служить внезапный развал СССР. Огромное государство удалось обрушить нескольким политикам практически при полном безразличии национального большинства. Сколько-нибудь значительного выброса общественной энергии не произошло, потому что ее попросту не было, она растрочена на революции, войны, борьбу с природой и окружающим миром.

Сильные флуктуации в неполностью деградировавших системах вызывают их скачкообразное разрушение с одновременным выделением тепла и образованием новых подсистем. Так при разрушительных природных катастрофах (землетрясениях, извержениях вулканов) рождаются новые геологические структуры и формы рельефа. Поэтому 1-я и 3-я стадии часто носят взрывной характер, совмещены во времени и трудно определить (как и в общественных катаклизмах), что это — разрушение или созидание, рывок вперед или назад?

Системы развиваются под давлением внешних условий и времени.

Время — универсальное выражение необратимости развития. Его эквивалентом является энтропия, выражающаяся деградацией конкретной субстанции при неизменных внешних условиях. Например, деформация тела — это структурная энтропия и пространственный эквивалент времени. Нагрев, усыхание, обесцвечивание, рост банковского долга, изменение моды (вкуса), все это соответствующие виды энтропии и эквиваленты времени — тепловой, вещественный, цветовой, финансовый, вкусовой и т. п.

У каждой системы свое, внутреннее время, ощущаемое как последовательность элементарных актов развития. “Главное” время, по которому живут экогеосистемы, — планетарное, с единицами, кратными обороту Земли вокруг оси. На стадии устойчивого развития внутреннее время у всех экогеосистем синхронизировано, равномерно с планетарным. Искривления пути развития на 2-й и 3-й стадиях можно объяснить воздействием синхронизирующей силы планетарного времени. Это воздействие вполне материально, оно ощущается по состоянию дискомфорта, возникающему при быстром перемещении в другой часовой пояс. На 1-й стадии эта сила подавляет естественное развитие и v уменьшается (темпы развития в “детском” возрасте постепенно убывают). На 3-й стадии внутреннее время “сильнее” планетарного и v увеличивается, время сгущается, разрушение ускоряется.

Учитывая качественно идентичный характер деформирования при внешнем воздействии и во времени, эти факторы можно объединить понятием обобщенной силы $P_{об}$. Введем величину $\beta = dP_{об} / d\delta$ — плотность распределения обобщенной силы в интервале деформаций, показывающую, какое нужно приложить “усилие” для единичной деформации. Графики зависимости от $P_{об}$, перестроенные из графиков на рис. 1, приведены на рис. 2. На них выделяются три участка с характерным поведением системы при изменении какой-либо обобщенной силы, включая время, соответствующие трем стадиям развития (см. рис. 1). На кризисных участках экогеосистемы угнетены, находятся в состоянии стресса. Средний участок, совпадающий со стадией устойчивого развития, — область оптимальных условий существования, где для единичной деформации требуется максимальное усилие. Из графиков следует, что любое “нагружение” системы сначала (и при малых нагрузках) оказывает позитивное воздействие на систему, а затем (и при больших нагрузках) — негативное.

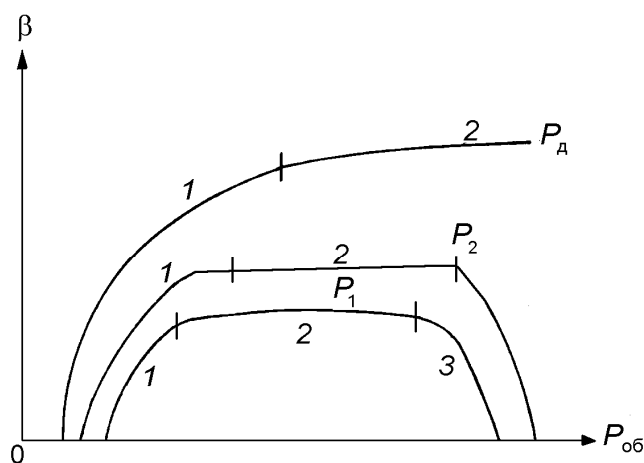


Рис. 2. Зависимость плотности распределения β от обобщенной силы $P_{об}$.
1, 2, 3 — номера стадий.

Процессы развития локализуются в пространстве: устойчивые последовательности — районами с однородными свойствами (ландшафты, биоценозы, климатические зоны, нации, государства), неустойчивые — разделяющими их пограничными (маргинальными) участками — фронтиром.

Биосистемы на 70–90 % состоят из жидкой фазы воды. Минимум ее теплоемкости, а следовательно, минимум энтропийной и максимум свободной энергии приурочен к $T = 310 \text{ K}$ (37°C). Часть проходящего через систему тепла при определенных T и P идет на фазовое превращение вещества, образование новой формы бытия. В мелких системах это происходит скачком, в крупных — растягивается во времени, но при сохранении внутри системы условий фазового скачка. Так кристаллизуются жидкости и, видимо, так появились наиболее современные, теплокровные, животные (в том числе гоминиды) в период, когда Земля и ее верхний слой (биосфера), постепенно остывая, достигли температуры $35\text{--}40^\circ\text{C}$, и начался своеобразный фазовый переход — форма существования теплокровных, типа кристаллизации жидкости, при T на границе фаз около 37°C .

Разное направление эволюции неживой и живой природы, первой — к простоте и единообразию, второй — к усложнению форм и многообразию, можно объяснить более поздним появлением биосферы и использованием ею земной оболочки как питательной среды. Неживая природа уже прошла стадию становления, а живая — еще нет. Причем многие подсистемы самой молодой системы биосферы — антропогенной еще не прошли скрытый (дородовой) этап, когда развитие идет с ускорением.

Внутреннее развитие экосистем идет в направлении повышения способности потреблять (добывать пищу и наращивать массу). У растений эта способность ограничена невозможностью самостоятельно передвигаться и конкуренцией; у животных — только конкуренцией, собственных ограничителей нет. У человечества, создавшего изощренные технологии извлечения ресурсов из окружающей среды, возможности потребления почти безграничны. Но люди, в отличие от предшествующих форм существования, наделены разумом — инструментом, в принципе позволяющим целенаправленно, руководствуясь долгосрочной выгодой и моральными принципами (осознанными запретами), регулировать потребности, не вызывая возмущений (катаклизмов) окружающей среды.

В биологических системах 1-ю стадию деформирования, вязко-упругую (стадию становления) можно отождествить с детством или юностью, когда деформации позитивны (биологическая особь накапливает массу и информацию); вторую — со зрелостью, когда жизненная энергия, физическая и духовная, берется в основном из запасов накопленной в детстве энергии и непрерывно потребляемых питательных веществ; третью — со старостью, когда ускоренно идет необратимая деформация. Если оценивать развитие биологических особей по внешним признакам — увеличению объема и массы, то ход его выражается равновесными кривыми, типа изображенной на рис. 1 при $P = P_d$. Но это равновесие защитной оболочки (кожи) и скелета, износ внутренних органов, не сводящийся к изменению объема или формы, продолжается. Конечный результат развития тот же, что и у объектов неживой природы, — распад на элементы и их рассеяние.

По такой же схеме: становление (расцвет) — стабильное существование — упадок — развиваются и антропогенные системы: цивилизации, этносы, государственные и производственные структуры, наука, культура и др. Глобальный тренд общественного развития определяется кругооборотами (спиралями) многих составляющих: духовных, культурных и материальных ценностей, политических ситуаций и, не в последнюю очередь, природных условий.

Общественные системы по сравнению с биологическими, а тем более геологическими молоды. Некоторые протекающие в них процессы, такие как увеличение численности населения, информации, капитала, технический прогресс и др., еще не вышли из стадии становления. В то же время они более подвижны, скорость их развития, оборачиваемость, выше. Например, искусство за историческое время прошло полный цикл развития, включающий негэнтропийный и энтропийный этапы: от примитивных фигур и знаков, ритмичных телодвижений под барабан или

речитатив до великолепия и гармонии Ренессанса и, по крайней мере в авангардистских направлениях и “легком” жанре,— обратно (к абстракционистам, “металлистам”, рэпу и т. п.).

Стабильные (прошедшие стадию становления) общественные системы эволюционируют в сторону роста энтропии. Теряют популярность традиционные отношения, парадигмы, нормы поведения, вкусы. Рушатся сословные барьеры, стираются классовые, культурные, расовые и даже половые различия. Основным элементом общества становится “средний” человек с его компромиссной идеологией и моралью.

Энтропию общественных систем можно оценить только качественно через моральное старение (износ). Мораль (этика) развивается в пространстве между идеалами (потенциалами) добра (справедливости, честности, совести и т. п.) и зла. Фундаментальная граница между ними определена еще на заре человечества и закреплена религиозными канонами, незыблемость (фундаментализм) которых подтверждается многовековой историей. Назначение религиозных догм — защита добра от зла — подразумевает наступательный характер последнего, самопроизвольное развитие в направлении понижения нравственного уровня. Энтропия выразилась в постепенном ослаблении зависимости поведения людей от религиозных догм, смещении его на “территорию зла” (слева направо) и создании еще одной линии обороны, поддерживаемой юридическими нормами. Эти нормы снисходительней к природе человека, но жестче санкционированы. Тем не менее они более подвижны и неустойчивы, поскольку отражают общественные отношения, подчиняясь их динамике, и имеют тенденцию к смягчению и дальнейшему перемещению вправо. “Вступив в юридическую эру и заменив совесть законом, мир снизился в духовном уровне”, — пишет А. И. Солженицын [1998, с. 140]. Это верно. Но именно в срединной области между совестью (фундаменталистской моралью) и законом живет законопослушное большинство. Здесь в постоянном борении разума и инстинктов, необходимости и свободы, коллектива и личности формируются уровни общественной морали и правосознания; в разумных пределах морализуются (обуздываются) “злые” силы — зависть, властолюбие, тщеславие, корысть и т. п., несовместимые с религиозными догмами, но побуждающие такие активные, двигающие прогресс, формы деятельности, как политика, бизнес, финансы, торговля и др.

Тенденции в области морали очевидны: уровень нравственности, определяющий обязанности индивида в коллективном поведении, падает, а осознание своих прав растет. Общество “атомизируется”, растет его энтропия, неустойчивость, непредсказуемость.

Определить энтропию сложных систем трудно, но ее часто удается оценить через стоимость заменителей износа и утилизации отходов. Например, затраты на природоохранные и восстановительные работы при освоении территории — денежное выражение техногенной энтропии. Полностью исключить энтропию взаимодействующих друг с другом подсистем невозможно, так как энергия и ресурсы, затрачиваемые на компенсацию ущерба, извлекаются из самой системы, что и отражается ненулевой стоимостью любого объема восстановительных работ.

Мотивацией современного производства товаров и услуг является получение прибыли, напрямую зависящее от оборачиваемости капитала и требующее вовлечения в процесс расширенного потребления новых групп, регионов и стран. Но этому препятствует увеличивающийся разрыв между бедными и богатыми, сокращающий покупательский спрос. Для его возбуждения используется оболванивающая реклама и привлекательная упаковка, отвлекающие значительные ресурсы и силы. Потери в реальном производстве и товарообмене восполняются суррогатами — эмиссией ценных бумаг и спекуляциями с ними, позволяя финансовой элите извлекать прибыль буквально из воздуха. В результате значительная часть ценных бумаг и денег, циркулирующих в мире, ничем не обеспечена и разница между этим кажущимся, виртуальным и материальным богатством (финансовая энтропия) растет.

Развитие цивилизации, судя по экологическому кризису, подошло к точке бифуркации, в которой начнется его стабилизация, уравнивание с окружающей средой, либо экологический кризис перерастет в гуманитарную катастрофу. Источником и содержанием нынешнего экологического кризиса является противоречие между безграничной потребительской способностью человечества и ограниченными ресурсами планеты. Хотя люди, их сообщества — страны в отличие от других биосистем, могут сознательно ограничивать свои потребности, анализ показывает, что как раньше, так и теперь сильные страны, предпочитают идти по пути увеличения потребления за счет ресурсов слабых. Навязываемые миру западные стандарты обеспечивают нормальное

существование только шестой части населения мира, так называемому “золотому миллиарду”. Похоже, что основное правило естественного отбора “выживает сильнейший” выполняется во всех системах, включая общественные. Учение о ноосфере, как новой оболочке Земли, создаваемой на научной основе, с учетом рационального регулирования круговоротов энергии и вещества для достижения гармоничного, взаимоувязанного, устойчивого развития природы и общества, пока остается утопией.

Угроза экологической катастрофы — хороший стимул и шанс попытаться превратить эту утопию в реальность.

ЛИТЕРАТУРА

Голубев В. С. Модель эволюции геосфер. М.: Наука, 1990. 95 с.

Коновалов А. А. К методологическим аспектам устойчивости экогеосистем // Наука Тюмени на рубеже веков. Новосибирск: Наука, 1999. С.156–174.

Пригожин И., Стенгерс И. Порядок из хаоса. М.: Прогресс, 1986. 432 с.

Солженицын А. И. Угодило зернышко промеж двух жерновов // Новый мир. 1998. №11. С. 93–153.

ИПОС СО РАН, г. Тюмень

A. A. Kononov

COMMON FEATURES IN DEVELOPMENT OF ECOGEOSYSTEMS

The article is devoted to the analysis of the regularities regarding development of geo-, bio-, and sociosystems of different ranks (ecogeosystems) affected by (associated with) human activities. Common features of their development have been identified: cyclic character, hierarchic organization of cycles, correspondence of existence forms (structures) to particular cycles, development of each structure at the cost of the previous ones, three staged graduation of development (growth — maturity — decay). Illustrated with examples of development and entropy of different ecogeosystems.