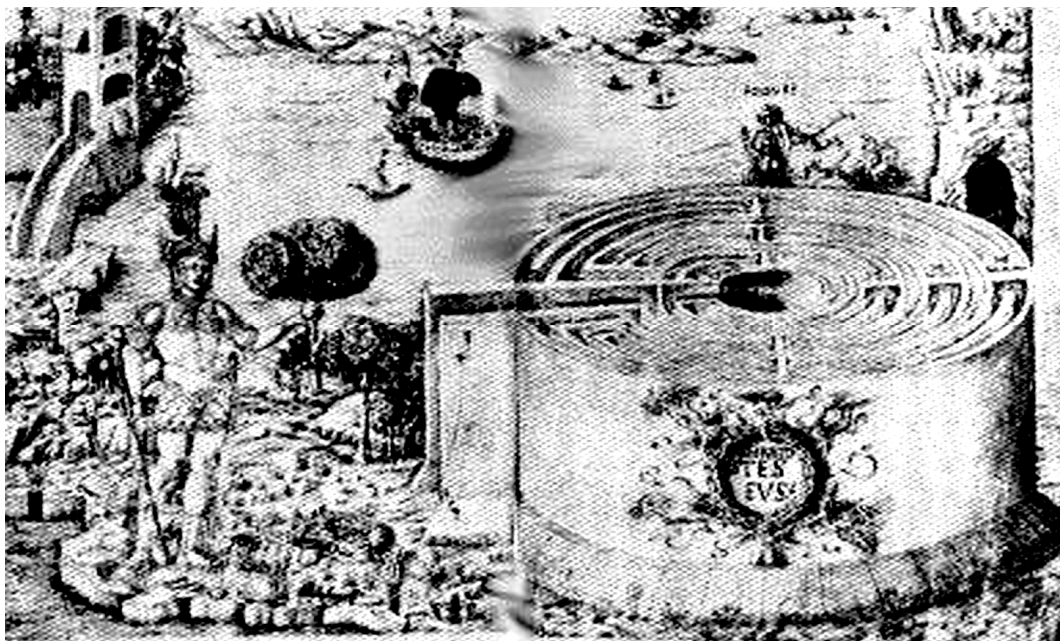
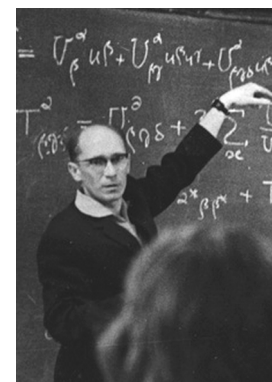


КАТЕГОРИЯ СМЫСЛА



Тесей у Критского лабиринта. Гравюра из «Иллюстрированной флорентийской хроники». Художник Томмазо Финигуэрра. Ок. 1460.

УДК 115:551.7:573.22:575.8:51-7



Время и эволюция

Молчанов Альберт Макарьевич (1928–2011), выдающийся советский российский математик. Ученик И.М. Гельфанда, М.В. Келдыша и Н.В. Тимофеева-Ресовского. Заведующий математической лабораторией Института биофизики АН СССР (1967–1972). Организатор Научно-исследовательского вычислительного центра АН СССР в г. Пущино (с 1992 г. – Институт математических проблем биологии РАН) и его директор (1972–1998). С 1998 по 2011 – главный научный сотрудник ИМПБ РАН. Организатор 12-ти Всесоюзных школ-семинаров по математической биологии (1972–1989). Преподавал в Московском физико-техническом институте (1968–1972) и Пущинском государственном университете (1994–2005). Автор более 100 научных работ в области функционального анализа, газодинамики, нелинейных колебаний и математического моделирования в биологии. Автор гипотезы резонансной структуры Солнечной системы и гипотезы о роли колебательных процессов в эволюции.

В работе рассматривается проблема временных масштабов. Вводится логарифмическая шкала времени. Обсуждаются вопросы дискретности и иерархии времени в контексте эволюции.

Ключевые слова: время, масштаб, иерархия, эволюция, устойчивость, колебания.

ОТ РЕДАКТОРА СТАТЬИ

В 1960-е гг. в естествознании сложилось понимание того, что в природе спектр пространственных и временных масштабов дискретен, а определение интервалов этого спектра – основа концептуализации любой науки, так как на разных пространственных и временных уровнях доминируют различные физические



А.М. Молчанов и Н.В. Тимофеев–Ресовский (справа) на 1-ой Всесоюзной школе по математическому моделированию в биологии в Можжинке (1973 г.). Фото с сайта <http://www.msu.psn.ru/any3.html>

разрешения Д.А. Молчановой. Текст статьи публикуется без изменений, за исключением уточненных цитат. Авторские ссылки и сноски приведены в соответствие с правилами журнала. Мною подготовлены биографическая справка, аннотация, комментарии и выверка цитат. Я признателен Г.Р. Смирновой (ИМПБ РАН) за техническую помощь.

законы и процессы¹.

Биологический и эволюционный контекст этой проблемы обсуждался на встрече-дискуссии «Системный подход в современной биологии», проходившей 11–12 декабря 1968 г. в Москве в Институте истории естествознания и техники АН СССР. В работе встречи принимали участие Л.А. Блюменфельд, Ю.М. Свирижев, Н.В. Тимофеев-Ресовский и другие известные ученые.

Предлагаемая читателю работа представляет собой расширенную стенограмму выступления А.М. Молчанова на этой встрече. Статья была впервые опубликована 40 лет назад² и оказалась практически забыта: сказались специфика издания. Вместе с тем, идеи, изложенные в этой работе, не утратили своей научной значимости и могут представлять интерес для широкого круга читателей (не только биологов и эволюционистов). Отдельный интерес представляет стиль работы, который прекрасно передает высочайший уровень эрудиции и концентрации мысли автора, его живой язык с неожиданными ассоциациями и чувство юмора.

Настоящая редакция статьи публикуется с любезного разрешения редакция статьи публикуется без изменений, за исключением уточненных цитат. Авторские ссылки и сноски приведены в соответствие с правилами журнала. Мною подготовлены биографическая справка, аннотация, комментарии и выверка цитат. Я признателен Г.Р. Смирновой (ИМПБ РАН) за техническую помощь.

Флоринский Игорь Васильевич,
доктор технических наук, ведущий научный сотрудник
Института математических проблем биологии РАН,
e-mail: iflor@mail.ru

Кто-то (англичанин, судя по стилю) сказал: «Когда Бог создал время, он создал его достаточно»³. Другой умный англичанин, Чарлз Дарвин, тоже достаточно качественно, но весьма эмоционально описывает ощущения, вызываемые у него геологическими масштабами времени: «...the mind is stupefied in thinking over the long, absolutely necessary, lapse of years»⁴. Не менее выразительно другое место: «...yet we must confess that it makes the head almost giddy to reflect on the number of years, century after century...»⁵.

Поучительно представить себе количественно масштаб времени, вызвавший у Дарвина столь сильные душевные движения. Оба отрывка касаются сроков формирования долины реки Санта-Крус в Патагонии. Сам Дарвин пишет, что это случилось «значительно позже образования подстилающих слоев с третичными раковинами»⁶. По современной оценке речь идет, таким образом, о промежутке времени в несколько десятков миллионов лет. Срок довольно скромный по сравнению с возрастом Земли, который по крайней мере во сто раз больше.

Что же так взволновало Дарвина? И почему мы, по прошествии всего лишь одного из дарвиновской чреды веков, спокойно рассуждаем о значительно больших временах? И что лучше – волнение Дарвина или наше спокойствие?

Ввиду очевидной риторичности последнего вопроса отвечать на него не надо. А вот первые два стоит обсудить.

Катастрофы или эволюция?

Во всей книге Дарвина пламенеет еще не остывший накал борьбы с катастрофизмом⁷. С теорией катастроф в нынешних популярных (да и не только популярных) книгах разделяются очень легко, попросту объявляя

¹ См., напр., обсуждение этих вопросов в географии и геоморфологии: Haggett P., Chorley R.J., Stoddart D.R. Scale standards in geographical research: A new measure of areal magnitude // *Nature*. 1965. Vol. 205. № 4974. P. 844–847; Schumm S.A., Lichty R.W. Time, space, and causality in geomorphology // *American Journal of Science*. 1965. Vol. 263. № 2. P. 110–119; Sugden D., Hamilton P. Scale, systems and regional geography // *Area*. 1971. Vol. 3. № 3. P. 139–144.

² Молчанов А.М. Время и эволюция // Системные исследования: Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 69–79. Статья воспроизведена в книге: Молчанов А.М. Нелинейности в биологии. Пушино: ПИЦ РАН, 1992. С. 205–215.

³ Ирландская поговорка «When God made time, he made plenty of it». Позднее автор приводил ее русский вариант «У Бога дней много» (см.: Молчанов А.М. Нелинейности в биологии. Пушино: ПИЦ РАН, 1992. С. 205). – *Прим. И.Ф.*

⁴ Darwin C.R. *The Voyage of the Beagle*. New York: P.F. Collier & Son, 1909. P. 185. Перевод: «...поражаешься при мысли о бесконечно долгом и неумолимом течении времени» (Дарвин Ч. Путешествие натуралиста вокруг света на корабле «Бигль» / Пер. с англ. С.Л. Соболя. М.: Географгиз, 1953. С. 210.) – *Прим. И.Ф.*

⁵ Darwin C.R. *Loc. cit.* P. 196. Перевод: «... но, нужно сознаться, голова идет кругом, когда подумаешь, сколько лет, столетие за столетием» (Дарвин Ч. Указ. соч. С. 221). – *Прим. И.Ф.*

⁶ Дарвин Ч. Указ. соч. С. 210. – *Прим. И.Ф.*

⁷ Катастрофизм, теория катастроф – геологическая концепция 19-го века, разработанная Ж. Кювье, в соответствии с которой в истории Земли периодически повторяются внезапные события, изменяющие лик планеты и уничтожающие все живое. (Cuvier G. *Discours sur les révolutions de la surface du globe, et sur les changements qu'elles ont produits dans le règne animal*. 5th ed. Paris: Dufour et D'Osagne, 1828. 400 p.; Кювье Ж. Рассуждение о переворотах на поверхности Земного шара / Пер. с фр. А.Е. Жуковского. М.–Л.: Биомедгиз, 1937. 370 с.) – *Прим. И.Ф.*

ее антинаучной. Однако реальному Дарвину, а особенно его другу и предшественнику Лайелю¹ приходилось намного трудней. И главная трудность состояла в том, что науке того времени возраст Земли был неизвестен.

Характерно, что Дарвин, точный, почти педантичный во всем, что касается размеров, количества и даже цен (на одной только страничке 383 приведено более десятка разнообразных чисел²), становится описательным, качественным и эмоциональным, как только речь заходит об оценке времени.

Едва ли не единственное количественное высказывание – «like unto a geologist who had lived his ten thousand years...»³ – является лишь метафорой, но метафорой, заставляющей призадумываться. Неужели даже для Дарвина количественным ориентиром были библейские семь тысяч лет?⁴

Если это так, то многое становится понятным. Понятно, например, почему Ньютон, живший полутора столетиями ранее, вынужден⁵ был считать доказательством божественного творения Солнечной системы высокую симметрию ее строения⁶. На естественное происхождение попросту не хватало времени⁷. Именно отсюда возник ньютоновский «первотолчок»⁸, за который ему впоследствии так досталось от Энгельса⁹.

Катастрофы Кювье проистекают, по-видимому, из того же источника. Не удавалось «уложить» в сроки, которыми естествоиспытатели сознательно или бессознательно ограничивали естественную историю.

Логически равноправны были два выхода – или серия катастроф (которую к тому же подсказывала библейская штурмовщина шести дней творения), или радикальный пересмотр вопроса о времени. Историю Земли необходимо было, как мы теперь знаем, удлинить в миллион раз.

Деятельность Прокруста¹⁰ – жалкий дилетантизм по сравнению с тем, что предстояло науке¹¹. Вполне по-

¹ Чарлз Лайель – основоположник актуализма в геологии, развил учение о медленном изменении земной поверхности под действием геологических факторов. (Lyell C. Principles of Geology, Being an Attempt to Explain the Former Changes of the Earth's Surface, by Reference to Causes Now in Operation. London: Murray. Vol. 1. 1830. 510 p.; Vol. 2. 1832. 330 p.; Vol. 3. 1833. 83 p.; Лайель Ч. Основные начала геологии или новейшие изменения Земли и ее обитателей / Пер. с англ. А. Мина. М.: Издание А.И. Глазунова, 1866. Т. 1. 399 с.; Т. 2. 562 с.) – *Прим. И.Ф.*

² Дарвин Ч. Указ. соч. С. 393. – *Прим. И.Ф.*

³ Darwin C.R. Loc. cit. P. 508. Перевод: «Подобно геологу, который прожил десять тысяч лет...» (Дарвин Ч. Указ. соч. С. 511). – *Прим. И.Ф.*

⁴ Вероятно, это справедливо для периода кругосветного путешествия Дарвина: «Whilst on board the Beagle I was quite orthodox, and I remember being heartily laughed at by several of the officers (though themselves orthodox) for quoting the Bible as an unanswerable authority on some point of morality». (Barlow N. (Ed.). The autobiography of Charles Darwin 1809–1882. With the original omissions restored. London: Collins, 1958. P. 85). Перевод: «Во время плавания на «Бигле» я был вполне ортодоксален; вспоминаю, как некоторые офицеры (хотя и сами они были людьми ортодоксальными) от души смеялись надо мной, когда по какому-то вопросу морали я сослался на Библию как на непреложный авторитет.» (Дарвин Ч. Воспоминания о развитии моего ума и характера // Дарвин Ч. Сочинения. Т. 9 / Пер. с англ. С.Л. Соболя. М.: Изд. АН СССР, Москва, 1959. С. 214). – *Прим. И.Ф.*

⁵ Со словом «вынужден» согласиться нельзя: Ньютон был глубоко религиозным человеком и автором ряда богословских сочинений, см.: Вавилов С.И. Исаак Ньютон. 2-е доп. изд. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1945. С. 202–210. – *Прим. И.Ф.*

⁶ Имеется в виду текст Ньютона «Scholium generale» («Общее поучение», приложение ко 2-му и 3-му изданиям «Начал»), где, в частности, говорится: «Elegantissima haecce Solis Planetarum & Cometarum compages, non nisi consilio & dominio Entis intelligentis & potentis origi potuit». (Newton I. Philosophiae Naturalis Principia Mathematica. 2nd enl. ed. Cantabrigiae, 1713. P. 482). Перевод: «Такое изящнейшее соединение Солнца, планет и комет не могло произойти иначе, как по намерению и по власти могущественного и премудрого Существа». (Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. А.Н. Крылова // Собр. трудов академика А.Н. Крылова. Т. 7. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1936. С. 659). – *Прим. И.Ф.*

⁷ В этой связи интересно сочинение: Newton I. The Chronology of Ancient Kingdoms Amended. London: Tonson, Osborn and Longman. 1728. 376 p. Отмечено, что «основная цель, которую преследовал Ньютон в «Хронологии», была несомненно чисто религиозная. Многие хронологические данные не совпадали с утверждениями Библии, потрясали ее авторитет. Ньютон хотел поддержать этот авторитет, устраняя хронологические противоречия в истории... Колоссальная протяженность древней истории..., по его мнению, должна быть чрезвычайно сжата». (Вавилов С.И. Указ. соч. С. 204–206). – *Прим. И.Ф.*

⁸ Ньютон использует выражение «первое творение» в «Оптике», напр.: «...All material Things seem to have been composed of the hard and solid Particles abovemention'd, variously associated in the first Creation by the Counsel of an intelligent Agent. For it became him who created them to set them in order. And if he did so, it's unphilosophical to seek for any other Origin of the World, or to pretend that it might arise out of a Chaos by the mere Laws of Nature; though being once form'd, it may continue by those Laws for many Ages» (Newton I. Opticks: or, A Treatise of the Reflections, Refractions, Inflections and Colours of Light. 3rd corr. ed. London: William and John Innys, 1721. P. 377–378). Перевод: «...Составлены, по-видимому, все вещи из жестких, твердых частиц, указанных выше, различным образом сочетавшихся при первом творении по замыслу разумного агента. Ибо тот, кто создал их, расположил их в порядке. И если он сделал так, то не должно философии искать другое происхождение мира или полагать, что мир мог возникнуть из хаоса только по законам природы; но, будучи раз созданным, мир может существовать по этим законам многие века» (Ньютон И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. 2-е изд. / Пер. с англ. С.И. Вавилова. М.: Гостехиздат, 1954. С. 304–305). – *Прим. И.Ф.*

⁹ Имеются в виду следующие высказывания Энгельса: «Ньютон завершает этот период [развития естествознания – И.Ф.] постулатом Божественного первого толчка» (Энгельс Ф. Диалектика природы / Пер. с нем. М.: Госполитиздат, 1953. С. 7); «Но чего только не пришлось вытерпеть Богу от своих защитников! ...Ньютон оставил ему еще «первый толчок», но запретил всякое дальнейшее вмешательство в свою Солнечную систему» (Там же. С. 158); «индуктивный осел Ньютон» (Там же. С. 161.) – *Прим. И.Ф.*

¹⁰ В античной мифологии Прокруст предлагал путникам ночлег: низкорослых он укладывал на большое ложе и молотом разбивал их кости, чтобы растянуть тела, а высоких – на маленькое ложе и отрубал те части тела, которые не помещались. – *Прим. И.Ф.*

¹¹ Особенно негативную роль в этом плане сыграл великий физик У. Томсон, лорд Кельвин. В 1860-е, на основе имевшихся в те годы представлений об источнике солнечного тепла, скорости остывания Земли и приливном трении в теле Земли, Кельвин провел расчеты и «буквально вколотил в геологов веру в то, что возраст Земли насыщивает ... вероятнее всего около 100 млн. лет». «Большинство геологов теряли присутствие духа перед горячностью физика и пытались подогнать свою теорию под авторитет Кельвина», причем это продолжалось вплоть до начала XX века. Ошибка в расчетах Кельвина была связана с тем, что в тот период еще не было известно о явлении радиоактивного распада как источнике энергии в недрах Земли. Кельвин не признал свою ошибку даже после открытия этого явления. (Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. История догм в науках о Земле / Пер. с англ. Б.А. Борисова, Н.И. Кутузовой и М.П. Антипова. М.: Мир, 1991. С. 92–98). – *Прим. И.Ф.*

нятно поэтому, что Чарлз Лайель и Чарлз Дарвин – люди, больше других сделавшие для утверждения идеи эволюции – меньше всего рисковали количественными высказываниями. Собранные и осмысленные ими богатейшие данные, прежде всего геологические, прямо-таки вынуждали идею огромности прошедшего времени. Однако количественные методы могли возникнуть только после и в результате того психологического перелома, который они создавали.

Большие числа

«Почему атомы такие маленькие?» – спрашивает Эрвин Шрёдингер¹ и отвечает: «Это потому, что мы такие большие»².

Сложная система (человек) неминуемо содержит громадное число простых атомов – вот главный смысл высказывания Шрёдингера. Однако есть и вторая сторона сопоставления «человек – атом». Нельзя безотносительно говорить «много», «мало». Всякое количественное высказывание есть высказывание об однотипном. На математическом жаргоне – параметры должны быть безразмерными. Шрёдингер, следовательно, подчеркивает, что всякий малый параметр есть оборотная сторона большого параметра (более точно – обратная величина). Однако психологически небезразлична форма вопроса. Более того, она имеет немалое методологическое значение. «Почему мы большие?» – более глубокий вопрос, так как сразу возникает другой. А не могли ли мы быть меньше? И насколько? И выясняется, что безобидная, казалось бы, перифраза кардинально меняет проблему. Из простого любопытства вырастает глубокая задача – каковы минимальные, критические значения объема, массы, энергии, времени и т.д., при которых может возникнуть жизнь.

Дарвин, в сущности, всего лишь элегичен, говоря о чреде веков. Это слегка завуалированный вздох о краткости жизни человеческой и почтительное удивление возрастом даже такой геологически обыденной вещи, как долина реки. Но при чем здесь человек с его веком? Грустно, конечно, что век такой маленький (по сравнению с чем?). Но ведь человек только стоит, смотрит и старается понять. Создал же долину не он, а ежедневные приливы и отливы морского рукава, ставшего потом рекой Санта-Крус. Или, в нашей стороне, ежегодные «разливы рек ее, подобные морям»³. Человеческие масштабы здесь категория внешняя, да и астрономическое измерение времени существенно лишь в той мере, в какой оно связано с «единичным актом творения».

Поучительно оставить наедине главные действующие лица – базальтовый массив и приливную волну. Массиву этому добрый десяток миллионов лет, и каждый день каждого года из этих миллионов лет «о скалы грозные дробятся с ревом волны и, с белой пеною крутясь, бегут назад»⁴. Итого миллиард раз⁵.

Все-таки очень легко стали мы произносить «десять в девятой степени». Писать, конечно, проще, а вот удивляться и, для пользы дела, ужасаться – разучились. Дарвин еще умел, и у него это неплохо получалось.

«В одном мгновеньи видеть вечность»⁶

Самый большой отрезок времени, сколько-нибудь поддающийся сегодня количественной оценке – возраст нашей Галактики – составляет 10^{13} лет⁷. Ошибка на пару порядков здесь и далее особого значения не имеет.

Самый малый «кусочек» времени, о котором имеет смысл говорить при современном уровне знаний, составляет 10^{-23} сек. Это время, за которое свет прошел бы «от одного края электрона до другого», если бы написанная фраза имела смысл. К счастью, для наших целей достаточно, чтобы была разумной оценка времени, получающаяся в результате деления классического радиуса электрона⁸, составляющего 10^{-13} см, на скорость света – $3 \cdot 10^{10}$ см/сек. Какое именно истолкование этот «квант времени» получит в будущей теории элементарных частиц, в данный момент несущественно.

Единственная твердая опора посреди этих двух зыбких чисел, промежутков, соединяющий эти две пучины времени – число секунд в году. Да и то надежность его весьма сомнительна – весьма и весьма вероятно, что длина суток, да и года меняется⁹. Все же, по данным на 1969 г., его можно вычислить по крайней мере с двумя знаками: $365 \cdot 24 \cdot 60 \cdot 60 = 3,2 \cdot 10^7$, а не с точностью до порядка, как «обрамляющие» числа.

Эти трудно сопоставимые величины следует сравнивать в логарифмической шкале¹⁰. И дело не только в удобстве – такая шкала, как мы увидим, имеет, по-видимому, глубокий структурный смысл.

Вся «Вечность» оказывается не очень большой – всего лишь сорок четыре порядка. Из них на долю космоса (от возраста Галактики до года) приходится тринадцать порядков, восемь порядков (от года до секунды) «отпущены» на человеческий, организменный уровень, а остальные двадцать три порядка – больше половины

¹ «Почему атомы так малы?», – вопрос, задаваемый в книге: Шрёдингер Э. Что такое жизнь? С точки зрения физика. 2-е изд. / Пер. с англ. А.А. Малиновского и Г.Г. Порошенко. М.: Атомиздат, 1972. С. 16. – *Прим. И.Ф.*

² Эта фраза представляет собой афористический пересказ автором статьи двух страниц текста в книге: Шрёдингер Э. Указ. соч. С. 16–17. – *Прим. И.Ф.*

³ Лермонтов М.Ю. Родина. – *Прим. И.Ф.*

⁴ Римский-Корсаков Н.А. Песня Варяжского гостя из оперы «Садко». – *Прим. И.Ф.*

⁵ Точнее – около семи миллиардов раз (с учетом двух приливов в сутки). – *Прим. И.Ф.*

⁶ Блейк У. Прорицания невинности / Пер. с англ. С.Я. Маршака. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://www.lib.ru/POEZIQ/BLAKE/stihi_marsh.txt; Blake W. Auguries of Innocence. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.online-literature.com/blake/612/> – *Прим. И.Ф.*

⁷ Согласно последним оценкам, возраст Галактики составляет около $1,45 \cdot 10^{10}$ лет. (См.: Dauphas N. The U/Th production ratio and the age of the Milky Way from meteorites and Galactic halo stars // Nature. 2005. Vol. 435. № 7046. P. 1203–1205). – *Прим. И.Ф.*

⁸ Фундаментальная константа размерности длины, $2,81794 \cdot 10^{-13}$ см. – *Прим. И.Ф.*

⁹ Известны как сезонные, так и вековые изменения длины суток и года: <http://en.wikipedia.org/wiki/Year> – *Прим. И.Ф.*

¹⁰ В эти же годы аналогичный подход (логарифмическая шкала времени с единицей измерения «год» для периода 10^{-3} – 10^7 лет) использовался для изучения особенностей функционирования географических систем (см.: Sugden D., Hamilton P. Loc. cit. P. 142.) – *Прим. И.Ф.*

– царство микромира¹.

Поэт W. Blake, цитата из которого (в переводе Маршака) вынесена в заголовок, призывает «to see ... eternity in an hour». Но час содержит львиную долю Вечности (28 порядков из 44), и поэтическая интуиция оказывается, следовательно, инструментом довольно грубым.

Естествоиспытатель Ч. Дарвин угадывает Вечность значительно раньше (уже в девяти порядках²) и чувствует ее намного тоньше – не в простом течении, длительности, а в созидающей ритмике приливов. Если же кто-нибудь склонен видеть в приливах более разрушительное начало, нежели созидательное (созидание, впрочем, всегда происходит за счет разрушения), тому можно посоветовать прочитать дарвиновскую теорию происхождения атоллов³ – там уж созидательный характер микроритмики не подлежит сомнению.

Конечно, в приведенной форме «исчисления Вечности» имеет несколько юмористический характер, однако оно дает представление о современной шкале времени. Эта шкала может и будет, конечно, меняться, особенно на «краях» – на космологическом «верху» и квантовом «низу». Но вся биологическая эволюция должна заключаться «между» указанными границами. На всю сложность жизни «отведено» около сорока порядков – хватит ли их? Или опять потребуются катастрофы? Таков совсем не юмористический смысл этих выкладок.

Забавно, что вечность Маршака – и здесь перевод весьма удачно не сохраняет «рабской верности оригиналу»⁴ – близка к половине Вечности. Мгновенье, то есть миг, миганье века (глаза), продолжается несколько сотых секунды. За время жизни нашей Галактики протекло столько человеческих «мгновений», сколько в одном мгновении содержится элементарных «квантов» времени⁵.

Человек – макрокосм, «мера всех вещей» – и количественно оказывается посредине между микромиром и космосом.

Математическое интермеццо

В математике, в нелинейной теории колебаний, есть задача, очень близкая по духу к разбираемой⁶. Предположим, что задана система уравнений

$$\left. \begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= \varepsilon g(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

содержащая малый параметр ε . Каков смысл этого параметра? Его можно интерпретировать (очень существенно, что эта интерпретация неединственная) как отношение масштабов времени системы «иксов» и системы «игреков».

В самом деле, изменение x можно приближенно записать в виде

$$\Delta x \approx f \Delta t \quad (2)$$

Из этого соотношения можно получить оценку времени

$$\Delta t \approx \frac{|\Delta x|}{|f|} \quad (3)$$

необходимого для того, чтобы система x -ов испытала изменение масштаба Δx . Следовательно, время существенных изменений, т.е. $\Delta x \sim 1$, имеет порядок единицы. Мы предполагаем, разумеется, что масштабы x , y и t выбраны разумно, т.е. так, чтобы величины $f(x, y)$ и $g(x, y)$ были порядка единицы. Аналогичная выкладка для y приводит к результату:

$$\Delta t \approx \frac{1}{\varepsilon} \frac{|\Delta y|}{|g|} \quad (4)$$

из которого вытекает, что для существенного изменения необходимо огромное время

$$T \sim \frac{1}{\varepsilon} \quad (5)$$

которое тем больше, чем меньше ε . Уже это обстоятельство наталкивает на мысль, что ε характеризует (и это еще одна интерпретация) малость взаимодействия между системами x и y .

Проведенный элементарный анализ выясняет главное. Система, описываемая вектором x , изменяется почти независимо от системы, описываемой вектором y . Обычно x называют «быстрыми», а y – «медленными» пере-

¹ Здесь автор перешел к логарифмической шкале времени. – Прим. И.Ф.

² Несколько миллиардов приливов, см. выше. – Прим. И.Ф.

³ Дарвин Ч. Строение и распределение коралловых рифов // Дарвин Ч. Собр. соч. Т. 2 / Пер. с англ. Л.Ш. Давиташвили и Н.М. Калевич. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1936. С. 285–448. – Прим. И.Ф.

⁴ «Рабская верность [оригиналу] есть порок» – квинтэссенция обоснования вольных переводов (см.: Жуковский В.А. Предисловие // Дон Кишот Ла Манхский. Сочинение Серванта. Т. 1 / Пер. с фр. Флорианова перевода В.А. Жуковского. М.: Университетская тип., 1815. С. 6). – Прим. И.Ф.

⁵ За время жизни Галактики (10^{20} сек) протекло 10^{22} мгновений (10^{-2} сек); в одном мгновении содержится 10^{21} элементарных «квантов» времени (10^{-23} сек). – Прим. И.Ф.

⁶ Задача разделения движений. См.: Молчанов А.М. Об устойчивости нелинейных систем. Дис. ... д.ф.-м.н. М.: Институт прикладной математики АН СССР, 1962. С. 11–12. – Прим. И.Ф.

менными.

Удобный формальный прием состоит в том, чтобы перейти к пределу, положив $\varepsilon = 0$.

Невозможно удержаться от замечания, что самая сущность математики состоит именно в изучении асимптотических, идеализированных, предельных, вырожденных, крайних ситуаций. Ситуаций достаточно простых, чтобы быть подвергнутыми логическому анализу, но достаточно сложных, чтобы сохранить главные черты явления, иначе анализ бессодержателен. Метод математики – графика, если угодно, карикатура на явление; гротеск, позволяющий заострить и выделить определяющее в явлении. Акварельные полутона противопоставлены математическому подходу, во всяком случае, на стадии постановки вопроса.

Возвращаясь к нашей задаче, получаем систему:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dy}{dt} &= 0 \\ \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

откуда вытекает, что

$$y = y_0 = \text{const} \quad (7)$$

и остается только уравнение для x :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, y_0) \quad (8)$$

Система для x даже формально зависит только от нынешнего «уровня» y и не зависит от динамики этого уровня. Движение быстрых переменных происходит на постоянном уровне медленных. Мы не задумываясь говорим о высоте горы над уровнем моря, даже если находим на ее вершине раковины, свидетельствующие о том, что она была (и, может быть, будет) когда-то морским дном.

Вряд ли кто-нибудь из читателей заметил (это нечасто замечают даже профессионалы-математики), что все рассмотрение совершенно неравноправно по отношению к медленным и быстрым переменным.

Мы были явно пристрастны. Это находит формальное выражение в том, что время измеряется масштабом, характерным именно для быстрых переменных. Собственное время быстрых переменных – период колебаний в случае периодических движений, время полураспада в случае движений релаксационных и т.д. – вот что выбрано за единицу измерения времени.

Попробуем восстановить справедливость. Перейдем к «медленному» времени:

$$\tau = \varepsilon t \quad (9)$$

В этом новом времени система приобретает вид:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon \frac{dx}{dt} &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= g(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

и предельный переход (полный анализ которого представляет трудную, до сих пор до конца не решенную математическую задачу) приводит к выводу:

$$\left. \begin{aligned} 0 &= f(x, y) \\ \frac{dy}{dt} &= g(x, y) \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

Снова выделяется только одна система, на этот раз, конечно, медленных переменных. Быстрые переменные, как раньше медленные, выпадают из системы.

Угадывается любопытный общий вывод. Фиксирование определенного масштаба времени как бы «выключает», «замораживает» иные масштабы. Интересно, что «замирают» не только более медленные процессы, что вполне понятно, но и более быстрые, что кажется на первый взгляд парадоксальным.

Однако это так, и наглядно можно пояснить следующим примером. Допустим, что мы видим одновременно вращающийся винт самолета и обычные часы. Движение секундной стрелки на часах ясно видно – это основное переменное. Минутная и тем более часовая стрелки «стоят» на месте – это медленное движение. Но движение винта (быстрое переменное) мы тоже не видим. Вместо винта виден сверкающий, но неподвижный круг. Математик в этом случае говорит об «осреднении по траектории быстрого движения».

И дело здесь вовсе не в оптических эффектах, не в психологии. Атом, например, «прозрачен» для быстрых α -частиц и непроницаем для других атомов. Хорошую классическую модель этого явления можно получить, хорошенько раскрутив велосипедное колесо. Палец в него совать не рекомендуется, но камешки, бросаемые раз за разом, почти все будут свободно пролетать сквозь «непрозрачное» для более медленных движений колесо.

Специфична ли квантованность для микромира?

Конечно, «замирание» быстрых процессов, при всем сходстве этого явления с «замиранием» процессов медленных, часто имеет качественно иной характер.

Главное различие состоит вот в чем.

Медленные процессы мы можем «застать» в любой стадии их развития, а процессы быстрые всегда успевают проэволюционировать и стабилизироваться в устойчивом состоянии.

Формальное выражение это различие находит в том, что медленные переменные y_0 в системе (6) могут принимать произвольное значение, и мы субъективно воспринимаем это как непрерывность. Быстрые же переменные x должны удовлетворять первому из уравнений системы (11), т.е. выходить на квазиравновесный уровень быстрого движения. Словечко «квази» приписано для того, чтобы подчеркнуть зависимость этого уровня от медленного переменного y и особенно подчеркнуть возможность исчезновения устойчивости этого равновесия при дальнейшей эволюции y . Возникает дискретность возможных состояний быстрых переменных x .

С этой точки зрения закономерен тот исторический факт, что дискретность особенно отчетливо и принудительно была понята впервые именно в микромире в форме квантованности физических величин. Однако это всего лишь частное проявление значительно более общей закономерности¹.

«Финальные» состояния (квазиравновесные, метастабильные, устойчивые), очевидно, дискретны. Именно поэтому эволюционно зрелые системы обнаруживают всегда тенденции к дискретному, иерархическому строению. Биологические системы не представляют собой исключения из этого правила. Им «кисельность» (по терминологии Н.В. Тимофеева-Ресовского)² противопоказана не в меньшей мере, чем квантовым объектам, и, в принципиальном отношении, по той же причине – по причине эволюционной зрелости.

Роль диссипации

Когда Фауст спрашивает Мефистофеля, кто он такой, тот отвечает весьма уклончиво: «Ein Teil von jener Kraft, Die stets das Böse will und stets das Gute schafft»³.

Лукавому верить нельзя, конечно, ни в одном слове. Он и соврет, недорого возьмет, и обмануть честного христианина всегда рад. Однако на этот раз он сказал правду, хотя и не всю.

Современный научный вариант (и очередное перевоплощение Мефистофеля) – это диссипативные факторы: трение, неупругое столкновение, возрастная усталость материалов, побегание атмосферы, накопление мутаций и несть им числа. Все они заняты как будто самым дьявольским делом – повышают энтропию. И в самом деле, если эти факторы достаточно сильны, они сделают свое черное дело полной дегградации системы. Если бы, например, Земля испытывала при движении по орбите достаточно сильное трение, то она упала бы в конце концов на Солнце и сгорела бы там вместе со своей биосферой.

Однако, если эти факторы держать в узде, вместо злобного дьявола возникает легион полезных озорных чертенят, делающих действительно полезное дело.

Можно показать – и весь предыдущий импрессионизм является попыткой заменить, хотя бы на эмоциональном уровне, несколькими строчками десятки утомительных страниц чисто математического текста – что диссипативные факторы при определенных условиях (необходимо, в частности, их «израсходование», убывание в процессе эволюции) имеют тенденцию стабилизировать сложные резонансные колебательные структуры.

Если диссипация велика, дискретных резонансных уровней мало (тем меньше, чем больше диссипация), структура оказывается бедной и неинтересной. Это, конечно, верно. Однако совсем без диссипации обойтись тоже нельзя – возникает «кисельность», стабилизирующее начало исчезает и система воспринимается как чисто стохастическая, становясь эквивалентной ей в определенном (статистическом) смысле этого слова.

Иерархия времен

Ранее бегло было разобрано взаимодействие всего лишь двух систем с резко различными масштабами времени. В реальных ситуациях цепочка «вложенных» друг в друга масштабов времени намного длиннее.

Так, например, в качестве исходного масштаба времени при изучении биологической системы (скажем млекопитающего) можно взять время единичного акта катализа. Для наиболее быстрых ферментов эта величина порядка 10^{-4} и даже 10^{-6} сек. Результатом длинной последовательности таких актов может явиться, например, элементарный этап мышечного сокращения, продолжающийся около 10^{-2} сек. За следующий масштаб примем одно биение сердца – одна секунда. Достаточно сложный акт условно-рефлекторной деятельности продолжается время, измеряемое минутами. Пищевой рефлекс характеризуется суточным ритмом. Достаточно ясно, как продолжать эту цепочку или «вставлять» в нее пропущенные звенья.

Однако проведенный выше анализ показывает, что нет надобности рассматривать (по крайней мере в пер-

¹ Некоторые соображения по этому поводу содержатся в статье автора: Molchanov A.M. The resonant structure of the Solar system. The law of planetary distances // Icarus. 1968. Vol. 8. № 1–3. P. 203–215. Развитие этих идей см.: Molchanov A.M. Resonances in complex systems: A reply to critiques // Icarus. 1969. Vol. 11. № 1. P. 95–103; Molchanov A.M. The reality of resonances in the Solar system // Ibid. P. 104–110. (На русском языке см. также: Молчанов А.М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы. Препринт. Пушино: ИЦБИ АН СССР, 1974. 19 с. Препринт воспроизведен в книге: Молчанов А.М. Нелинейности в биологии. Пушино: ПИЦ РАН, 1992. С. 186–205. – Прим. И.Ф.)

² Тимофеев-Ресовский Н.В. Структурные уровни биологических систем // Системные исследования: Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 84. – Прим. И.Ф.

³ Goethe J.W. Faust. URL: http://de.wikisource.org/wiki/Faust_I. Перевод: «Часть вечной силы я, Всегда желавшей зла, творявшей лишь благое» (Гёте И.В. Фауст / Пер. Н. Холодковского. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://lib.ru/POEZIQ/GETE/faust_holod.txt) – Прим. И.Ф.

вом приближении) сразу всю иерархию масштабов и соответствующих им систем. Факт «замирания», «выключения» и высших, и низших масштабов времени имеет первостепенное методологическое значение. Он позволяет сводить вопрос к изучению только одной ступеньки, содержащей два «соседних» масштаба времени. Это весьма принципиальный шаг – выделение «кванта» эволюции, ее структурного элемента.

Задача распадается тем самым на две совершенно разные по характеру и стилю задачи.

Изучение взаимодействия двух соседних по масштабам систем неминуемо предполагает полное и последовательное кинетическое рассмотрение и классификацию возможных типов поведения. Даже при беглом взгляде ясно, что процесс на каждом уровне может быть по крайней мере трех типов – стабилизирующийся, колебательный и нарастающий. Так как уровней два, то минимальное число возможностей – девять. Реально их значительно больше, так как, например, колебательные режимы могут быть периодическим (одночастотными) и многочастотными – каждый со своими качественными особенностями.

Совсем другой, если можно так выразиться, кибернетический, системный, классификационный характер имеет задача описания всей цепочки в целом. Здесь достаточно составления «списка» типов связей соседних звеньев. Кинетические же вопросы следует считать включенными в характеристику типа связи.

Очень важно подчеркнуть, что система, приходящая в равновесие на некотором уровне, вполне может оказаться колебательной и даже неустойчивой на больших масштабах времени. Никакой связи между типами поведения на разных уровнях, вообще говоря, нет. Так, например, газ, уравнившийся и удовлетворяющий второму началу термодинамики, вполне может быть рабочим телом в паровой машине, совершающей механическую работу. Никакого противоречия здесь нет, так как время релаксации для газа измеряется ничтожными долями миллисекунды, а механические движения разыгрываются в масштабах секунд.

Кинетика и структура

Вопрос о поведении систем во времени, изучение кинетики имеет большое методологическое значение. Это значение определяется самим существом эволюционного учения. Если сущее не было создано актом творения в готовом виде, если оно возникало постепенно, то кинетика любой системы необходимо должна предшествовать ее структуре¹. Это несомненно так в плане эволюционном. Куда более интересно и важно, что воссоздание уже раз созданной структуры идет по тем же этапам, что и ее эволюционное возникновение.

В этом общий смысл известного тезиса о повторении в индивидуальном развитии развития эволюционного.

Однако это повторение не может быть только повторением. Нельзя, чтобы рождение каждого человека снова требовало полных трех миллиардов лет эволюции. Происходит головокружительное, в миллиарды раз, сокращение этапов, упрощение и укорочение извилистого эволюционного пути.

Одной из важнейших теоретических задач и является осознание на всех уровнях, с точки зрения любых подходов (в том числе и математического) общих принципов такого убыстрения, при котором не теряется достигнутый структурный уровень.

Можно думать, что понимание этих принципов является не только теоретической, но, вероятно, и практической, едва ли даже не технологической задачей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Вавилов С.И. Исаак Ньютон. 2-е доп. изд. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1945. 230 с.
Vavilov S.I. (1945). Isaak N'yuton. 2-e dop. izd. Izd. AN SSSR. Moskva – Leningrad. 230 p.
2. Дарвин Ч. Воспоминания о развитии моего ума и характера // Дарвин Ч. Сочинения. Т. 9 / Пер. с англ. С.Л. Соболя. М.: Изд. АН СССР, 1959. С. 166–242.
Darvin Ch. (1959). Vospominaniya o razvitii moego uma i kharaktera. Darvin Ch. Sochineniya. T. 9. Per. s angl. S.L. Sobolya. Izd. AN SSSR. Pp. 166–242.
3. Дарвин Ч. Путешествие натуралиста вокруг света на корабле «Бигль» / Пер. с англ. С.Л. Соболя. М.: Географгиз, 1953. 581 с.
Darvin Ch. (1953). Puteshestvie naturalista vokrug sveta na korable "Bigl". Per. s angl. S/L. Sobolya. Geografiz. Moskva. 581 p.
4. Дарвин Ч. Строение и распределение коралловых рифов // Дарвин Ч. Собр. соч. Т. 2 / Пер. с англ. Л.Ш. Давиташвили и Н.М. Калевич. М.-Л.: Изд. АН СССР, 1936. С. 285–448.
Darvin Ch. (1936). Stroenie i raspredelenie korallovykh rifov. Darvin Ch. Sobr. soch. T. 2. Per. s angl. L.Sh. Davitashvili i N.M. Kalevich. Izd. AN SSSR. Moskva – Leningrad. Pp. 285–448.
5. Кэри У. В поисках закономерностей развития Земли и Вселенной. История догм в науках о Земле / Пер. с англ. Б.А. Борисова, Н.И. Кутузовой и М.П. Антипова. М.: Мир, 1991. 447 с.
Keri U. (1991). V poiskakh zakonovnostei razvitiya Zemli i Vselennoi. Istoriya dogm v nauках o Zemle. Per. s angl. B.A. Borisova, N.I. Kutuzovoi i M.P. Antipova. Mir. Moskva. 447 p.
6. Кювье Ж. Рассуждение о переворотах на поверхности Земного шара / Пер. с фр. А.Е. Жуковского. М.-Л.: Биомедгиз, 1937. 370 с.
Kyuv'e Zh. (1937). Rassuzhdeniya o perevorotach na poverkhnosti Zemnogo shara. Per. s fr. A.E. Zhukovskogo. Biomedgiz. Moskva – Leningrad.
7. Лайель Ч. Основные начала геологии или новейшие изменения Земли и ее обитателей / Пер. с англ. А. Мина. М.: Издание А.И. Глазунова, 1866. Т. 1. 399 с.; Т. 2. 562 с.
Laiel' Ch. (1866). Osnovnye nachala geologii ili noveishie izmeneniya Zemli i ee obitatelei. Per. s angl. A. Mina. Izdanie A.I.

¹ См. также статью автора: Молчанов А.М. Возможная роль колебательных процессов в эволюции // Колебательные процессы в биологических и химических системах. М.: Наука, 1967. С. 287. (Воспроизведено в книге: Молчанов А.М. Нелинейности в биологии. Пушино: ПНЦ РАН, 1992. С. 20. – *Прим. И.Ф.*)

- Glazunova. T. 1. 399 p.; T. 2 562 p.
8. Молчанов А.М. Возможная роль колебательных процессов в эволюции // Колебательные процессы в биологических и химических системах. М.: Наука, 1967. С. 274–288.
Molchanov A.M. (1967). *Vozmozhnaya rol' kolebatel'nykh processov v evolutsii. Kolebatel'nye process v biologicheskikh i khimicheskikh sistemakh.* Nauka. Moskva. Pp. 274–288.
 9. Молчанов А.М. Время и эволюция // Системные исследования: Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 69–79.
Molchanov A.M. (1970). *Vremya i evolutsiya. Sistemnye issledovaniya.* Ezhegodnik. Nauka. Moskva. Pp. 69–79.
 10. Молчанов А.М. Гипотеза резонансной структуры Солнечной системы. Препринт. Пушино: НЦБИ АН СССР, 1974. 19 с.
Molchanov A.M. (1974). *Gipoteza rezonansnoi struktury Solnechnoi sistemy.* Preprint. NTsBI AN SSSR. Pushchino. 19 p.
 11. Молчанов А.М. Нелинейности в биологии. Пушино: ПНЦ РАН, 1992. 222 с.
Molchanov A.M. (1992). *Nelineinosti v biologii.* PNTs RAN. Pushchino. 222 p.
 12. Молчанов А.М. Об устойчивости нелинейных систем. Дис. ... д.ф.-м.н. М.: Институт прикладной математики АН СССР, 1962. 115 с.
Molchanov A.M. (1962). *Ob ustoychivosti nelineinykh sistem.* Dis. ... d.f.-m.n. Institut prikladnoi matematiki AN SSSR.
 13. Ньютон И. Математические начала натуральной философии / Пер. с лат. А.Н. Крылова // Собрание трудов академика А.Н. Крылова. Т. 7. М.–Л.: Изд. АН СССР, 1936. 688 с.
N'yuton I. (1936). *Matematicheskie nachala natural'noi filosofii.* Per. s lat. A.N. Krylova. *Sobranie trudov akademika A.N. Krylova.* T. 7. Izd. AN SSSR. Moskva – Leningrad. 688 p.
 14. Ньютон И. Оптика или трактат об отражениях, преломлениях, изгибаниях и цветах света. 2-е изд. / Пер. с англ. С.И. Вавилова. М.: Гостехиздат, 1954. 367 с.
N'yuton I. (1954). *Optika ili traktat ob otrazheniyakh, prelomkeniyakh, izgibaniyakh i tsvetakh sveta.* 2-e izd. Per. s angl. S.I. Vavilova. Gostekhizdat. Moskva. 367 p.
 15. Тимофеев-Ресовский Н.В. Структурные уровни биологических систем // Системные исследования: Ежегодник. 1970. М.: Наука, 1970. С. 80–91.
Timofeev-Resovskii N.V. (1970). *Strukturnye urovni biologicheskikh sistem.* Sistemnye issledovaniya: Ezhegodnik. 1970. Nauka. Moskva. Pp. 80–91.
 16. Шрёдингер Э. Что такое жизнь с точки зрения физика. 2-е изд. / Пер. с англ. А.А. Малиновского и Г.Г. Порошенко. М.: Атомиздат, 1972. 88 с.
Shredinger E. (1972). *Chto takoe zhizn' s tochki zreniya fizika.* 2-e izd. Per. s angl. A.A. Malinovskogo i G.G. Poroshenko. Atomizdat. Moskva. 88 p.
 17. Энгельс Ф. Диалектика природы / Пер. с нем. М.: Госполитиздат, 1953. 328 с.
Engel's F. (1953). *Dialektika prirody.* Per. s nem. Gospolitizdat. Moskva. 328 p.
 18. Barlow N. (Ed.). *The autobiography of Charles Darwin 1809–1882. With the original omissions restored.* London: Collins, 1958. 253 p.
 19. Cuvier G. *Discours sur les révolutions de la surface du globe, et sur les changemens qu'elles ont produits dans le règne animal.* 5th ed. Paris: Dufour et D'Ocagne, 1828. 400 p.
 20. Darwin C.R. *The Voyage of the Beagle.* New York: Collier & Son, 1909. 547 p.
 21. Dauphas N. The U/Th production ratio and the age of the Milky Way from meteorites and Galactic halo stars // *Nature.* 2005. Vol. 435. № 7046. P. 1203–1205.
 22. Haggett P., Chorley R.J., Stoddart D.R. Scale standards in geographical research: a new measure of areal magnitude // *Nature.* 1965. Vol. 205. № 4974. P. 844–847.
 23. Lyell C. *Principles of geology, being an attempt to explain the former changes of the Earth's surface, by reference to causes now in operation.* London: Murray. Vol. 1 – 1830. 510 p.; Vol. 2 – 1832. 330 p.; Vol. 3 – 1833. 83 p.
 24. Molchanov A.M. Resonances in complex systems: A reply to critiques // *Icarus.* 1969. Vol. 11. № 1. P. 95–103
 25. Molchanov A.M. The reality of resonances in the Solar system // *ibid.* P. 104–110.
 26. Molchanov A.M. The resonant structure of the Solar system. The law of planetary distances // *Icarus.* 1968. Vol. 8. № 1–3. P. 203–215.
 27. Newton I. *Opticks: or, a treatise of the reflections, refractions, inflections and colours of light.* 3rd corr ed. London: William and John Innys, 1721. 382 p.
 28. Newton I. *Philosophiae naturalis principia mathematica.* 2nd enl ed. Cantabrigiae, 1713. 484 p.
 29. Newton I. *The chronology of ancient kingdoms amended. A short chronicle from the first memory of things in Europe, to the conquest of Persia by Alexander the Great.* London: Tonson, Osborn and Longman, 1728. 376 p.
 30. Schumm S.A., Lichty R.W. Time, space, and causality in geomorphology // *American Journal of Science.* 1965. Vol. 263. № 2. P. 110–119.
 31. Sugden D., Hamilton P. Scale, systems and regional geography // *Area.* 1971. Vol. 3. № 3. P. 139–144.