

— КЛИМАТОЛОГИЯ —

DOI 10.25587/SVFU.2019.13.27553

УДК 551.583.7

В. Б. Спектор¹, В. В. Спектор¹, Б. М. Кершенгольц², С. Х. Лифшиц³

¹ Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН, г. Якутск, Россия

² Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное научное учреждение в составе ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия

³ Институт проблем нефти и газа – обособленное научное учреждение в составе ФИЦ ЯНЦ СО РАН, г. Якутск, Россия

ФАЗЫ ПЛАНЕТАРНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ

Аннотация. Для климатических изменений, происходивших в течение последних 400 тысяч лет, характерна цикличность. На протяжении этого отрезка времени имело место 5 климатических циклов. В отличие от существующего представления, объясняющего климатические циклы изменениями солнечной активности, авторы объясняют цикличность автоколебаниями саморегулируемой климатической системы Земли. В эталонном полном предпоследнем (137-18 тысяч лет назад) климатическом цикле выделяется 4 фазы, соответствующие стадийности процесса самоорганизации, названные нами: «терминация» (в терминах нелинейной динамики соответствует состоянию «динамический хаос»), «редукция» (соответствует состоянию «бифуркации»), «модерация» (соответствует состоянию «диссипативная структура»), «кульминация» (соответствует состоянию «стационарное состояние»). Стадийность внутри циклов и цикличность обеспечивается за счет преобразования относительно стабильной солнечной энергии посредством перераспределения ее во внутренних энергетических резервуарах системы: тепловых, гравитационных, геохимических, биологических.

Ключевые слова: климатические циклы; саморегулируемая климатическая система; плейстоцен; палеоклимат.

¹ Спектор Владимир Борисович – д.г.-м.н., г.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

E-mail: vspektor@mail.ru

¹ SPEKTOR Vladimir Borisovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS.

E-mail: vspektor@mail.ru

¹ Спектор Валентин Владимирович – к.г.н., в.н.с., Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова СО РАН.

E-mail: valentin_spektor@mail.ru

¹ SPEKTOR Valentin Vladimirovich – Candidate of Geographical Sciences, Leading Researcher, Melnikov Permafrost Institute, SB RAS.

E-mail: valentin_spektor@mail.ru

² Кершенгольц Борис Моисеевич – д.б.н., академик АН РС(Я), проф., г.н.с., Институт биологических проблем криолитозоны – обособленное научное учреждение в составе ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

E-mail: kerschen@mail.ru

² KERSHENGOLTS Boris Moiseevich – Doctor of Biological Sciences, Academician AS RS(Y), prof., Chief Researcher, Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Yakut Scientific Center, SB RAS.

E-mail: kerschen@mail.ru

³ Лифшиц Сара Хаимовна – к.х.н., в.н.с., Институт проблем нефти и газа – обособленное научное учреждение в составе ФИЦ ЯНЦ СО РАН.

E-mail: s.h.lifshits@ipng.ysn.ru

³ LIFSHITS Sara Khaimovna – Candidate of Chemical Sciences, Leading Researcher, Institute of Oil and Gas Problems, Yakut Scientific Center, SB RAS.

E-mail: s.h.lifshits@ipng.ysn.ru

V. B. Spektor¹, V. V. Spektor¹, B. M. Kershengolts², S. Kh. Lifshits³

¹Melnikov Permafrost Institute, SB RAS, Yakutsk, Russia

²Institute of Biological Problems of Cryolithozone, Yakut Scientific Center, SB RAS, Yakutsk, Russia

³Institute of Oil and Gas Problems, Yakut Scientific Center, SB RAS, Yakutsk, Russia

PHASES OF PLANETARY CLIMATIC CYCLES

Abstract. Periodicity is peculiar to climatic changes that occurred for the last 400 kyr. During this period, 5 climatic cycles took place. In contrast to the present concept explaining the climatic cycles by changing solar activity, we consider the periodicity as a result of auto oscillations of self-regulating climatic system of the Earth. In the etalon, complete, penultimate (137-18 kyr B.P.) climatic cycle, 4 phases, corresponding to stadiality of self-organisation process, were separated. We named those as follows: ‘termination’ (in terms of nonlinear dynamics, corresponding to the state ‘dynamic chaos’), ‘reduction’ (corresponding to the state ‘bifurcation’), ‘moderation’ (corresponding to the state ‘dissipative structure’), and ‘culmination’ (corresponding to the state ‘stationary state’). Stadiality inside cycles and periodicity are provided by transformation of a relatively stable solar energy through its redistribution in internal energy reservoirs: heat, gravitational, geochemical, and biological.

Keywords: climatic cycles; self-regulating climatic system, Pleistocene, palaeoclimate.

Введение

Одной из наиболее сложных природных систем на Земле является климатическая система. Основная её особенность заключается в упорядоченности (закономерности и относительном постоянстве) основных климатических параметров на значительных площадях в течение длительных промежутков времени, которая формируется в результате преобразования и перераспределения лучистой солнечной энергии очень подвижными естественными носителями (водой и воздухом) и энергии нижних слоев литосферы, в условиях быстро меняющихся параметров этих носителей и приемников энергии. Поддержание высокоорганизованного климатического порядка при изменчивости, разнообразии и безграничном количестве взаимодействующих компонент, в условиях открытости во внешнее космическое пространство и в нижние слои литосферы, характеризует климатическую систему как сложную, открытую, сильно удаленную от термодинамического равновесия и потому самоорганизующуюся. Упорядоченность климатической системы во времени выражается в форме повторяющихся климатических циклов, а внутри циклов – в фазах, связанных с переходом системы из одного состояния в другое.

Попытки синергетического подхода к анализу климатической системы ранее были применены в нескольких работах [1-7 и др.]. Однако, с позиций самоорганизации климатической системы главные её свойства: цикличность во времени и смена состояний, а также природа негэнтропии, за счет которой система становится способной к организации диссипативных структур не получили соответствующего объяснения.

Цикличность климата и ее причины

Эволюция климатической системы в последние 400 тыс. лет характеризуется цикличностью (рис. 1). Большинство исследователей в качестве наиболее крупных таксонов климатической цикличности выделяют «100-тысячелетние» климатические циклы [8-12 и др.] и связывают их возникновение с изменением объемов инсоляции [17 и др.], возникающих при изменении орбитальных параметров Земли. Вариации инсоляции могут быть вызваны квазипериодическими изменениями трёх орбитальных элементов – эксцентриситета эллиптической орбиты Земли, угла наклона земной оси к плоскости эклиптики и прецессии земной оси [13]. Но, как замечает Дж. Кеннет: «Циклы вариаций эксцентриситета обуславливают в лучшем случае 0,1 % изменений приходящей на земную поверхность инсоляции.... Не ясно, каким образом вариации орбиты трансформируются в региональные климатические изменения. Не выяснен механизм перехода воды из океанов в ледниковые щиты. Остается нерешенной проблема быстрой дегляциации... Фактически нет единой теории, адекватно объясняющей все характеристики позднекайнозойской климатической истории» [13, с.136]. Результаты исследований А.С.Монина и Ю.А.Шишкова [3], указывают на то, что спутниковые измерения обнаружили лишь кратковременные вариации солнечного излучения, а вариации с периодами цикла около 11,5 лет, выделенные Миланковичем, «в спектрах климатических рядов колебания с периодами

солнечного цикла около 11,5 лет не проявляются» [3, с. 424]. Кроме того, отмечается несоответствие во времени климатических экстремумов диаграммы Миланковича максимумам и минимумам изотопно-кислородной кривой, полученной по кернам Антарктического льда [11, 14] и отсутствие на этой кривой ≈ 100 -тысячелетней периодичности. Об этом же свидетельствует и моделирование климата Земли [15], по результатам которого установлено, что изменений *солнечной радиации* в результате орбитальных колебаний Земли *недостаточно* само по себе, чтобы произвести наблюдаемые климатические изменения. Предполагается, что климат определяют многие факторы и, в первую очередь, атмосфера Земли и ее составляющие: углекислый газ, метан, аэрозоли [15].

Хотя колебания приходящей солнечной энергии характеризуются относительно небольшой амплитудой, составляющей доли (0,2 %) процента [16], климат на протяжении последних ≈ 400 тысяч лет испытывал значительные периодические и аperiodические, колебания, соответствующие увеличению внешнего источника тепла в десятки раз. Нет никаких оснований предполагать такое увеличение потока лучистой солнечной энергии на протяжении четвертичного периода. Таким образом, наблюдаемую климатическую цикличность невозможно объяснить традиционными детерминистическим подходом – особенностями орбитальных параметров или изменением интенсивности лучистой солнечной энергии.

Это позволяет предположить, что цикличность климатического процесса является отражением одного из его собственных основных свойств – самоорганизации во времени, возникновением автоколебаний. Короткопериодные колебания с аномальными периодами в месяцы и годы называются «долгосрочными изменениями погоды»; глобальные краткосрочные аномалии – «вибрации» климата; периоды 10^1 – 10^2 лет – «перемежаемостью» климата [3]. Более продолжительные, до $n \times 10^3$ лет колебания относятся к «короткопериодическим», а $n \times 10^4$ – $n \times 10^5$ – к «длиннопериодическим» климатическим циклам. Предметом нашего исследования являются длиннопериодические климатические циклы четвертичного периода. Они проявляется, в частности, в том, что количественные характеристики льдов Антарктического ледникового щита (содержание парниковых газов, тяжелых изотопов водорода и кислорода, пыли во льдах, объем ледникового щита, температура приземного слоя воздуха) закономерно изменяются в течение последних 400 тыс. лет вот уже пятый раз [11]. Это позволяет выделить пять длиннопериодных климатических циклов (табл. 1, рис. 1), которые несколько отличаются по продолжительности и структуре от общепринятых ледниковых циклов [7].

Таблица 1

Сопоставление климатических и ледниковых циклов последних 420 тыс. лет

Климатические циклы [7]		Ледниковые циклы [17]	
Индекс	Верхний и нижний временные рубежи в тыс. лет назад	Индекс	Верхний и нижний временные Рубежи
A_k	Современный незавершенный 18-0	A	Современный, незавершенный 11-0
B_k	137-18	B	120-11
C_k	242-137	C	240-120
D_k	334-242	D	330-240
E_k	Неполный, без начала, 420-334	E	400-330

Выделенные циклы начинаются с периода резкого роста температур и заканчиваются периодом минимальных (в течение цикла) температур.

До сих пор нет удовлетворительного ответа на вопрос: откуда берется приток энергии для процесса роста температур в течение цикла и куда отводится высвобождаемая энергия? «Ведь по законам термодинамики, если имеет место приток энергии извне, расходуемый на убывание энтропии в открытых сильно неравновесных системах (поток «негэнтропии»), то должно быть эквивалентное количество термодинамических систем, в которых энтропия должна возрастать» Общепринятый, но ничего не говорящий об источниках и механизмах, ответ на заданные вопросы таков: «В природе действует космический закон цикличности (или периодичности).

В бытии мира всё циклично (по кругооборотам) чередуются периоды созидания эволюционного порядка (полупериоды прогресса от простых к высокоорганизованным системам) и регресса, распада, возврата к исходной простоте (полупериоды регресса от высокоорганизованных систем к исходному состоянию)» [18]. С точки зрения синергетики цикличность является следствием свойства самоорганизации сложных эволюционирующих структур.

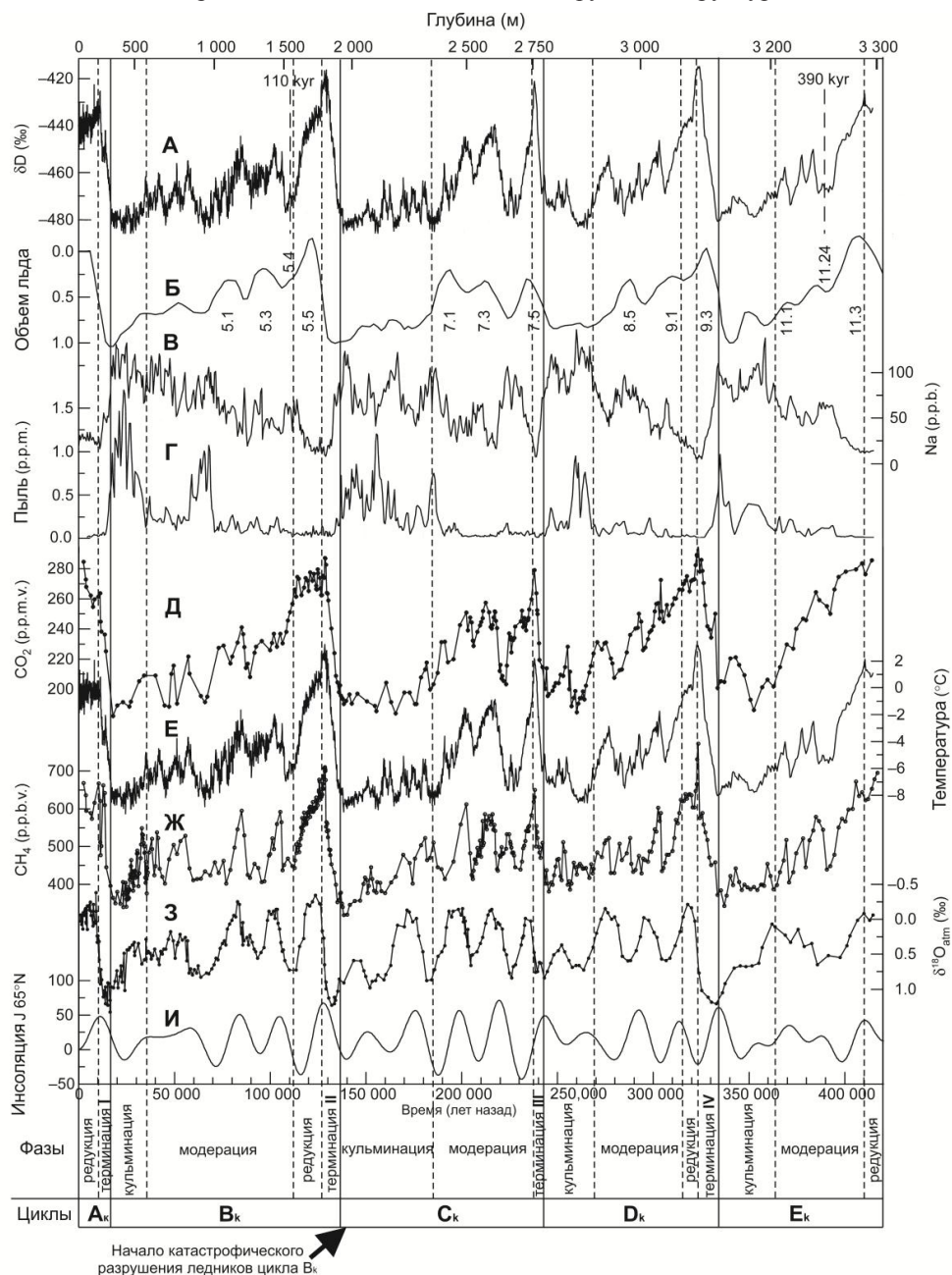


Рис. 1. Изменения по шкале времени переменных, характеризующих климат, по керну льда антарктической станции «Восток» за последние 420 тысяч лет [11] и границы климатических циклов и их фаз: А – содержание дейтерия во льдах; Б – объем ледников; В – содержание иона натрия во льдах; Г – содержание пылевых частиц во льдах; цифры – номера морских изотопных стадий; Д – содержание углекислого газа в пузырьках воздуха; Е – превышение температуры приземного слоя относительно современной; Ж – содержание метана в пузырьках воздуха; З – содержание тяжелого изотопа кислорода во льдах; И – средняя июньская инсоляция на 65°с.ш. ($Вт \times м^2$). Сплошными корреляционными линиями показаны границы климатических циклов; прерывистыми – климатических фаз

Сложная самоорганизованная система «чтобы поддерживать свою целостность, периодические преодолевать тенденцию к стохастическому распаду ... должна существовать в колебательном режиме, позволяющем замедлять процессы и устанавливать общий темп развития внутри сложной структуры» [4, с.13]. В нелинейных моделях определенного класса «установлено существование двух взаимодополнительных режимов эволюции сложных систем – LS-режима локализации и возрастания интенсивности процессов и HS-режима расплывания структур и охлаждения» [4, с.14].

Авторам представляется, что разнопорядковая периодичность климата является отражением сложной структуры климатической системы и сосуществования разнопорядковых автоколебаний, связанных с входящими в систему подсистемами. В первом приближении, можно принять, что «долгосрочные изменения погоды» связаны с атмосферной подсистемой (темпомиром), имеющей очень короткую энергетическую память. «Вибрации климата» связаны с короткопериодическими катастрофическими событиями, оставляющими память о себе в подсистемах океана, поверхности суши, включая криосферу. «Климатические циклы», вероятно, отражают работу темпомира всей климатической системы Земли. Большая продолжительность климатических циклов объясняется, скорее всего, большим объемом и инерционностью масс тектоносферы, частично вовлеченной в климатическую систему.

Изменения энергетического состояния климатической системы связаны с процессами депонирования свободной энергии в энергетических резервуарах (*потоками негэнтропии как между системой и окружающей средой, так и между подсистемами*) и периодическим освобождением этой энергии, сопровождаемым переходом ее из одной формы в другую.

Депонирование энергии климатической системы

Появление новых состояний самоорганизующихся систем «обусловлено рождением *коллективных мод* под действием флуктуаций, их конкуренций и отбором «наиболее приспособленной моды» или комбинации таких мод» [19, с.41]. В процессе рождения коллективных мод вклад перераспределения оперативных и депонированных энергетических ресурсов в каждой из подсистем (атмосфера, гидросфера, литосфера, криосфера, биосфера) и между ними может быть весьма значительным или решающим. Непредсказуемое во времени высвобождение накопленной энергии и обеспечивает флуктуацию системы. Вместе с тем, входящие в систему подсистемы могут иметь собственные флуктуации, более значительные из которых порождают «аддитивный шум», а случайные – «мультипликативный» шум [19].

Рассмотрим резервуары энергии, которые сосредоточены, в гидросфере, атмосфере, криосфере и тектоносфере. Наиболее крупным резервуаром тепла является океан. Масса океанической воды в 258 (по некоторым данным в 275) раз больше массы атмосферного газа. «Разовое содержание тепла в океане в 21 раз превышает ее поступление к земной поверхности в целом. Даже в 4-метровом слое океанической воды тепла в 4 раза больше, чем во всей атмосфере» [20, с.129]. Теплоемкость океана превышает теплоемкость суши и атмосферы и, благодаря этому, он является тепловым регулятором [21] и, следовательно, тепловым резервуаром планеты. Основная доля поглощенной солнечной радиации и основной теплообмен с атмосферой происходит в деятельном слое океана (ДСО), достигающем нескольких сот метров [21]. Средняя годовая температура поверхностных вод Мирового океана 17,4°C, что на 3°C выше средней годовой температуры воздуха [21, 22]. Это гигантский объем тепловых резервов, если учесть, что для нагрева атмосферы на 1° потери тепла океана составят 0,001° [23]. При современных темпах потепления (среднее 0,025 град/год по [24]) выравнивание температур океана и приземного слоя воздуха произойдет, примерно, через 100 тыс. лет (в течение климатического цикла!), если система океан-атмосфера будет изолированной. Значительный объем потенциальной энергии накапливается в океанах при эндотермическом образовании нерастворимых карбонатов, а при экзотермическом их превращении, с участием растворенного CO₂, в растворимые бикарбонаты энергия выделяется в виде тепла, что также приводит к повышению температуры соответствующих слоев гидросферы [25, 26]. Помимо накопителя ощутимого тепла и карбонатов, океан также является резервуаром основных парниковых газов, находящихся в нём в конденсированном (растворенном и/или твердофазном) виде: водяного пара, углекислого газа и метана.

Потенциальные запасы водяного пара в климатической системе безграничны. Содержание его в атмосфере около 0,3 %. Вклад водяного пара в парниковый эффект земной атмосферы составляет около 20,6°C [3] – около 78 % парникового эффекта. Известно, что при росте температуры увеличивается образование водяного пара, и на каждые 10°C возможное содержание водяного пара в воздухе почти удваивается [27].

Вклад углекислого газа в парниковый эффект земной атмосферы составляет около 7°C (около 16 % парникового эффекта) [27]. Его содержание в гидросфере (прежде всего океаны) сейчас составляет $4 \cdot 10^4$ Гт углерода (отсюда и далее приводятся данные по CO_2 в пересчете на углерод), включая глубинные слои [28]. В атмосфере в настоящее время содержится около $7,5 \cdot 10^2$ Гт углерода [29, 30]. При повышении температуры воды океанов от 5 до 10°C, коэффициент растворимости CO_2 в ней уменьшается приблизительно с 1,4 до 1,2 [30], что приводит к его эмиссии в атмосферу.

Основной объем депонированного метана (99 %) содержится в океанах в виде метангидратов (условия образования $t < 0-2^\circ\text{C}$ и давление ≥ 25 бар). При разложении 1 м³ метангидрата выделяется до 160 м³ метана, радиационная активность которого в создании парникового эффекта атмосферы в 21 раз выше, чем CO_2 . К 2000 году радиационный форсинг от повышения концентрации метана составил 0,5 Вт/м², т.е. треть от радиационного форсинга CO_2 (1,5 Вт/м²) или около 6 % парникового эффекта. Всего же в метангидратах сосредоточено около 10 тыс. Гт метана в пересчете на углерод [27, 30]. Как считает О.В.Ивашенко [27], для разрушения практически всех залежей океанических метангидратов, необходим прогрев глубинных вод и прилегающего слоя верхнего слоя донных пород не менее чем на 30°C. Но для разрушения нескольких процентов от этих запасов (что хватит для сильнейшего влияния на тепловой баланс Земли), достаточно всего лишь потепления на несколько градусов [27].

Роль атмосферы как резервуара энергии относительно невелика. Это связано с тем, что срок «энергетической памяти» атмосферы измеряется первыми десятками дней. В климатической системе Земли атмосфера играет роль преобразователя, транспортера и, благодаря парниковому эффекту, «защитника и сберегателя» энергии, циркулирующей в системе. В атмосфере тепловая энергия содержится постоянно в больших объемах в виде, в основном, скрытой теплоты испарения водяного пара. Его конденсация в тех или иных объемах в относительно короткий промежуток времени может привести к определенным климатическим изменениям.

В литосфере, по сравнению с океанами, депонировано значительно меньше тепловой энергии и парниковых газов. Весьма значительны здесь запасы углерода, который при попадании на границу литосферы и атмосферы может стать компонентом углекислого газа. В литосфере депонировано $6 \cdot 10^7$ Гт углерода [31]. Одними из функционирующих источников этого газа являются криогенные отложения. Небольшое количество радиационного энергетического бюджета, приходящееся на фотосинтез и почвообразование (≈ 1 % по [20]), превращается в климатообразующий фактор за десятки тысяч лет накопления в криолитосфере. Так, по нашим данным, в минеральной составляющей ледового комплекса криолитозоны (токодисперсные высокльдистые отложения северных территорий, занимающие до 5 % Арктики) содержится в среднем 5 % органической составляющей, что при таянии мерзлоты может существенно увеличить содержание парниковых газов в атмосфере.

В «вечной» мерзлоте содержатся метангидраты – менее 1 % общего запаса.

Значительные запасы гравитационной энергии могут быть сосредоточены в криосфере в форме ледников. Энергия, затраченная на испарение и подъем паров в верхние слои атмосферы, на определенных этапах эволюции климатической системы переходит в гравитационный потенциал ледников. Общие запасы льдов на Земле в наши дни достигают 25,8 млн. км³ (в водном эквиваленте), что составляет две трети пресных вод на планете [32]. Если учесть, что в ледниковые эпохи объем ледников мог быть в несколько раз больше современного, запасы льда могли достигать 62 млн. км³, и массы $6 \cdot 10^4$ Гт. Такие значительные нагрузки были сосредоточены на относительно небольшие участки литосферы и, несомненно, приводили к гляциоизостатическим движениям, потере устойчивости тектоносферы, разрушению ледников, гидрогенным катастрофам. Наибольшей интенсивности такие события достигали в периоды максимального похолодания, приуроченные к концу климатических циклов.

Вышеотмеченное позволяет сделать два вывода: (1) наиболее значительные запасы энергии (и запас неэнтропии) климатической системы Земли сосредоточены в тепловом и конденсированном (твердофазном и в виде растворенных бикарбонатов) резервуаре океанов и гравитационном резервуаре ледников; (2) поскольку приток внешней энергии (инсоляций) изменяется в небольших диапазонах, разделенных незначительными промежутками времени, значительные флуктуации переменных климатической системы в 100-тысячелетних циклах связаны с поступлением энергии из энергетических резервуаров.

Фазы климатического цикла

Рассмотрим эволюцию состояний (фаз) типового климатического цикла (V_k) на основе анализа температурной кривой приземного слоя воздуха, определенной по составу ледникового разреза Антарктиды (Рис. 1, кривая «Е» по [11]), в следующей последовательности: 1) динамическое стационарное состояние предшествующего климатического цикла, теряющее устойчивость в результате уменьшения амплитуды управляющих параметров и обострения «борьбы флуктуаций» (своеобразная аритмия климатической системы), приводящих, в итоге, к разрушению диссипативной структуры – фаза *кульминация* S_k ; (Таблица 1) 2) сильно неравновесное состояние – «динамический хаос», которое выделяется по [16] как фаза *терминация*; 3) состояние «бифуркация», переходное в состояние «диссипативная структура» B_k – фаза *редукция*; 4) динамическое квазиупорядоченное состояние «диссипативная структура» B_k – фаза *модерация*; 5) динамическое стационарное состояние анализируемого климатического цикла, теряющее устойчивость в результате обострения борьбы флуктуаций, – фаза *кульминация* V_k . Различие состояний климатической системы в разных фазах обусловлено соотношением уровней производства энтропии и неэнтропии и, возникающем при этом различием управляющих параметров в климатической системе.

Рассмотрим закономерности перехода от одной фазы к другой, природу потоков неэнтропии и охарактеризуем работу энергетических резервуаров, сопровождающую этот процесс.

1) *Динамическое стационарное состояние*, теряющее устойчивость в результате уменьшения амплитуды управляющих параметров и обострения «борьбы флуктуаций», приводящих, в итоге, к разрушению диссипативной структуры, *кульминация*, рассматривается на примере аналогичной фазы цикла, предшествующего рассматриваемому – цикла S_k , 185 до 137 т.л.н. (рис. 1, «кульминация»). Выбор данной фазы в качестве типичного для заключительной части климатического цикла обусловлен динамической сопряженностью ее с последующими фазами цикла V_k , значительной ее продолжительностью и возможностью детально рассмотреть особенности перехода от одного климатического цикла к другому. Обозначенный интервал климатического цикла, как и другие аналогичные состояния за последние 420 т.л., характеризуется наиболее низкими показателями температуры приземных слоев атмосферы (min – ниже -10°C , относительно современной среднегодовой температуры), неупорядоченностью температурных колебаний (температурный шум с частотами колебаний от 15 тысяч до нескольких сот лет, разброс амплитуд колебаний $0,5-4^\circ\text{C}$). Такой режим температурных колебаний с мелкими неупорядоченными флуктуациями, обусловленными аддитивным и мультипликативным шумом [19] соответствует теряющему устойчивость динамическому стационарному состоянию, что приводит в дальнейшем к разрушению диссипативной структуры, «режиму с обострением».

В начале этого состояния ещё соблюдается динамический энергетический баланс климатической системы между приходящей и уходящей энергией, главное – между энтропией и неэнтропией [33]. В стационарном неравновесном состоянии между переменными преобладают отрицательные обратные связи.

В первой половине фазы (185-175 т.л.н., см. рис. 1) запасы зарезервированной энергии достигают максимума. Они сосредоточены: в криосфере в форме гравитационной энергии ледников; в гидросфере – в виде растворенного CO_2 , а также осаждающихся в эндотермической реакции карбонатов и в экзотермической реакции – метангидратов. В криолитозоне сосредотачиваются запасы органического углерода, который, наряду с растворенными в гидросфере CO_2 и осадочными метангидратами способны образовать парниковые газы при повышении температуры соответствующей среды.

Вместе с тем, площадь и интенсивность испарения резко падают. Это следует из сопоставления параметров объема льдов Антарктиды и содержания пыли во льдах (рис. 1), которые четко связаны обратной зависимостью. Высокое содержание пыли указывает на возрастание вулканической активности, которая способствует росту ледников. С другой стороны, этот показатель свидетельствует на возросшую скорость ветров, а, следовательно, на интенсивность испарения. При максимуме объема ледников количество пыли приближается к нулю. В самой же пыли, при этом, уменьшается количество ионов Na^+ , что указывает на сокращение площадей открытого моря. Такое состояние системы, поддерживаемое чередованием мало амплитудных отрицательных и положительных обратных связей, является относительно устойчивым и его следует определить как «предкритическое» по отношению к «режиму с обострением»

Во второй половине фазы (157-137 т.л.н.) система переходит в крайне неустойчивое состояние, из которого систему выводят даже слабо интенсивные воздействия. Первопричиной перехода, по-видимому, является процесс высвобождения *депонированной потенциальной энергии ледников*. Разрушение и следующее за ним «расползание» ледниковых покровов устанавливается по следующим характерным изменениям переменных: остановке роста ледников при очень низких температурах приземного слоя воздуха; снижению содержания пылевых частиц, в том числе морской пыли. Расползание ледников привело к смешению агрегатных состояний воды (твердой, жидкой и газообразной), к перемешиванию океанических глубинных и поверхностных пресных вод, повышению уровня и расширению площади океанов и, вследствие этого, к возбуждению элементов хаотического режима. Это привело к высвобождению и других форм депонированной энергии: (1) *экзотермическому* растворению карбонатов с участием растворенного CO_2 в основном объеме вод Мирового океана, т.к. карбонатная линия находится высоко (положительная обратная связь); (2) дальнейшее повышение температуры гидросферы привело к частичному *эндотермическому*, разложению метангидратов (отрицательная обратная связь) и (3) эмиссии парниковых газов CO_2 и CH_4 (положительная обратная связь). Вследствие этого в системе, в следующей фазе, возникают положительные обратные связи, обеспечивающие нелинейный рост температуры приземного слоя воздуха при сохранении климатической системой способности к самоорганизации.

2) *Состояние, терминации* продолжалось от 137 т.л.н. до 127 т.л.н. За этот относительно короткий промежуток времени средняя температура приземного слоя воздуха возросла на 11°C , а средняя скорость роста температур составила $1,375^\circ/1000$ лет. В течение рассматриваемого отрезка времени произошел лавинообразный рост температуры и связанных с ним значений других переменных, при сохранении системой способности к самоорганизации. Так как это состояние, в рамках теории нелинейной динамики, относится к состоянию «динамический хаос» [4], то его можно назвать состоянием самоорганизованной критичности (ССОК) [34], которое, как отмечают исследователи, «... характеризуется некоторыми признаками хаотического режима, проявляет масштабную инвариантность ... не зависит от величины внешнего воздействия или флуктуаций, и даже совершенно ничтожное воздействие может привести к лавине громадных последствий (катастрофе)... Система сама поддерживает собственное критическое состояние» [34, с.138]. Причина ССОК – максимальное возбуждение положительных обратных связей в системе, обусловленных повышением содержания парниковых газов в атмосфере и снижением их растворимости в гидросфере. Каждое последовательное повышение температуры поверхности гидросферы вызывает выплеск парниковых газов, усиливает парниковый эффект и, вызывает дальнейшее повышение температуры верхнего слоя океанов – классический «режим с обострением». Помимо повышения температуры воды океанов (верхнего слоя, до глубин первых сотен метров) происходит и увеличение содержания водяных паров в атмосфере, несущих скрытую теплоту испарения.

Свободная энергия, выделяемая климатической системой (сход ледников, водно-ледниковые потоки, рост уровня океанов, испарение, нагрев океана и атмосферы посредством парникового эффекта, испарение, разрушение метангидратов, эмиссия метана, углекислого газа и пр.) достигает максимума. В течение этой фазы переходит в кинетические (тепловые) формы ранее накопленная потенциальная энергия (гравитационная – ледников, химическая – *экзотермического* растворения твердых фаз углеродсодержащих соединений – карбонатов (ниже карбонат-

ной линии) и масштабного разложения метангидратов – с выделением в атмосферу парниковых газов).

Аналогом рассматриваемой фазы является современное (цикл « A_k ») состояние климатической системы, характеризующееся ростом приземной температуры воздуха (рис. 1 Д, Ж), ростом температуры воды океанов, таянием ледников, и нарастанием количества климатических аномалий. Временные ряды планетарных метеорологических элементов выглядят и визуально, и при количественных подсчетах как реализация хаотических случайных процессов с элементами согласованности [3].

3) Климатическая система на пике температур переходит в фазу *редукции* в крайне неустойчивое (а потому *критическое*), сильно неравновесное состояние, обусловленное сочетанием высокоамплитудных положительных и отрицательных обратных связей – «режим бифуркации». В цикле « B_k » снижение свободной энергии, *редукция*, продолжалась от 127 до 112 т.л.н. Температурная кривая показывает, что в этой фазе за 15 тыс. лет произошло снижение температур приземного слоя воздуха на 3°C , со средней скоростью $\approx 2 \cdot 10^{-4}^\circ\text{C}/1000$ лет.

Рассматриваемое состояние можно отнести к процессу «самоорганизации через завершение борьбы флуктуаций» [19, 35]. Действительно экспоненциальный рост основных переменных системы в фазу *терминации* сопровождался накоплением флуктуаций и ростом их амплитуд, особенно к концу этой фазы. В остановку роста радиационного баланса, по-видимому, внесло свой вклад увеличение планетарного альbedo Земли за счет резкого увеличения площади и мощности облачного слоя в атмосфере. Так по данным [36], наибольшим альbedo (86 %) характеризуются кучево-дождевые облака, имеющие значительную толщину свыше 1 км. В настоящее время атмосферой и облаками отражается 31 % солнечной радиации [37]. С точки зрения теории нелинейной динамики одновременный рост таких параметров, как температура и облачность, действие которых направлено противоположно, повышает степень неустойчивости состояния всей климатической системы.

На протяжении рассматриваемой фазы четко выражена относительная стабильность температуры и малые амплитуды снижения содержания CO_2 в атмосфере. Основной объем водяных паров в этих условиях переходил в жидкую фазу. Это предположение подтверждается относительно небольшим объемом ледников [11], составляющих в самом конце фазы 30 % от объема в середине фазы «кульминация». Это была эпоха дождей, теплого и влажного климата.

Как только падение температур на поверхности гидросферы и в атмосфере достигло уровня, при котором началось формирование твердой фазы в значительных количествах (негэнтропийный процесс), создались условия для формирования более высокой степени упорядоченности климатической системы – квазистационарного состояния климатической системы, в котором сохранение системой способности к самоорганизации, обусловлено сочетанием малоамплитудных отрицательных и положительных обратных связей – фазы «*модерация*».

4) *Периодическое квазипорядоченное состояние «модерация»* продолжалось от 112 до 33 т.л.н. По продолжительности эта фаза (79 т.л.) является самой длительной не только из фаз рассматриваемого климатического цикла, но и из фаз других климатических циклов за последние 420 т.л. Как известно [35], состояние самоорганизующейся диссипативной системы является динамически устойчивым, если она после отклонения вновь возвращается к квазистационарному состоянию.

В фазу «модерация» происходит накопление основных объемов льда на земной поверхности, начавшееся в конце фазы *редукции* (≈ 112 т.л.н.), когда среднегодовые температуры на ней опустились в полярных и субполярных областях ниже 0°C . Накопление льда в этой фазе приходится на период 80-30 т.л.н. в первой половине валдайского оледенения (вюрмского или вейхзельского в Европе и висконсинского в Северной Америке) и проходило оно в условиях достаточной влагообеспеченности. Аналогом этих оледенений на востоке Азии является зырянское оледенение, также характеризующееся достаточной влагообеспеченностью [38, 39]. Пульсационный режим времени ранневалдайского оледенения имел многопорядковую структуру. Наиболее высокий порядок с длиной полуволны (теплый или холодный эпизод) составил около 10 т.л. и четко совпадал по знаку и времени с периодами увеличения или уменьшения инсоляции. Второй порядок волны имел длину полуволны 30 т.л. Третий, наиболее низкий по-

рядок с общим трендом снижения температур в среднем на 2°C происходил за все время рассматриваемой фазы. Пульсационный режим, по-видимому, объясняется изменением влажности атмосферы. Ледники в этот период являются главным депозитарием энергии скрытой теплоты испарения. Первоначальное снижение температур в конце фазы редукции вызвало первое отложение льда и снижение влажности атмосферы, увеличение ее прозрачности, уменьшение альбеда облачного слоя и, как следствие, увеличение температуры и интенсивности испарения с земной поверхности.

Эта смена знака радиационного баланса, когда отрицательные обратные связи системы менялись на положительные, происходила закономерно. После промежуточного максимума похолодания (первая половина полувоны) наступал период потепления и сопровождающее его повышение влажности и степени облачности. При достижении критической точки облачности начиналось похолодание, и положительные обратные связи менялись на отрицательные. Смена знака связей обеспечивала колебательный режим системы на достаточно высоком энергетическом уровне, не позволяя ей уйти в область «режима с обострением» или в квазиравновесный режим. Большую роль в эти периоды начинал играть уровень инсоляции, при повышении которого формировались дополнительные положительные обратные связи, приводящие к дальнейшему повышению уровня инсоляции, к повышению температуры и влажности атмосферы. Не исключено, что волны этого порядка являлись следствием астрономических причин. При достижении квазистационарного состояния и при максимальном значении уровня радиационного баланса, большое значение в увеличении массы влаги в воздухе играла растительная – и микробиота, а также процессы почвообразования. Их расцвет, обеспеченный положительным тепловым режимом на ветви с положительными обратными связями, замедлял потепления, увеличивал влажность воздуха. Кроме того, растительная- и микробиота уменьшали количество CO_2 в атмосфере, консервируя углерод в гидросфере и литосфере. Действие этого фактора, совместно со снижением инсоляции, обеспечивали начало поворота климатической системы в направлении снижения радиационного баланса. до достижения нового квазистационарного состояния.

В конце данной фазы происходило изменение природы депонированной энергии в виде ледников (потока негэнтропии), которая стала уменьшаться. Режим льдонакопления второй половины валдайского ледникового цикла характеризовался дефицитом влажности. Например, на европейском и Азиатском материках тот период (сартангская эпоха северной Азии) характеризуется отступанием ледников при условии очень низких температур. Вместе с тем, способность к самоорганизации климатической системы (увеличение потока негэнтропии) сохраняется за счет того, что в гидросфере происходит увеличение депонированной энергии за счет экзотермического образования метангидратов. Этот процесс, мало того, что обеспечивает поток негэнтропии во второй части фазы «мадерация», он, наряду с экзотермическим процессом растворения карбонатов (из-за увеличения растворимости CO_2 при понижении температуры верхних слоев гидросферы) в водах Мирового океана, также замедляет процесс похолодания. В итоге, обеспечивает переход фазы «мадерация» в фазу «кульминация».

5) *Стационарное состояние, «кульминация», цикла V_k* (переход в состояние «режим с обострением») продолжалось от 31 до 18 тыс. л.н. Несмотря на относительную непродолжительность фазы в ее прохождении можно видеть наиболее характерные черты, отмеченные для аналогичного состояния цикла C_k . К таким особенностям относятся: низкие температуры приземного слоя воздуха ($-10 \div -7^{\circ}\text{C}$), небольшие амплитуды всех переменных, низкие содержания парниковых газов. К времени около 18 т.л.н. относится максимум ледниковых покровов и начало их разрушения, знаменующее завершение цикла V_k . На востоке Азии к этому времени приурочено сартанское оледенение, которое характеризуется здесь чрезвычайно низкой влагообеспеченностью [38, 39]. Именно с этим временем (около 18 т.л.н) связано начало разрушения ледникового покрова Арктики, вызвавшего *гидросферную катастрофу* [40, 41]. Основное отличие состояния кульминации цикла V_k , от аналогичного состояния цикла C_k состоит в том, что в нем отсутствует событие разрушения ледников в середине фазы, с последующей релаксацией последствий. В фазе кульминации V_k , начало разрушения ледников совпало с началом фазы терминации, что и привело к катастрофическим последствиям

Обсуждение результатов и выводы

Обнаружение фазовой структуры эталонного климатического цикла V_k позволяет охарактеризовать фазовую структуру всех климатических циклов последних 420 тыс. лет (табл. 2).

Таблица 2

Фазовая структура климатических циклов

Фазы цикла	Климатические циклы (тыс. лет)				
	A_k	B_k	C_k	D_k	E_k
Терминация	18-11	137-127	242-238	334-323	-
Редукция	11-0	127-112	-	323-315	420-410
Модерация		112-31	238-185	315-269	410-363
Кульминация		31-18	185-137	269-242	363-334

Изменения режимов климатической системы, появление фаз с резкими отличиями переменных на фоне постоянной мало меняющейся инсоляции, связаны с изменением динамических связей между переменными в каждой из фаз и наличием в климатической системе энергетических резервуаров. В климатической системе целесообразно выделить следующие типы режимов: LS-режим, HS-режим (по [4]) и стационарный (квазистационарный). Они отличаются и динамикой связей основных элементов климатической системы. В условиях LS-режима между элементами системы устанавливаются положительные обратные связи, действие которых приводит к ускорению протекающих процессов, в итоге, к формированию, самоорганизованной системы. В HS-режиме, который можно охарактеризовать как диссипативный, преобладают отрицательные обратные связи, приводящие к охлаждению системы. Эти два состояния климатической системы разделены периодами квазистационарного (стационарного) состояния и слабых изменений энергии, в течение которых происходит перестройка климатической системы: в середине климатического цикла – редукция – переход к состоянию модерации (самоорганизации) системы, в конце цикла – кульминация, «режим с обострением» и переход в начало следующего цикла – «терминация», состояние «динамический хаос». Совокупность этих четырех состояний образует климатический цикл, состоящий из фаз – разных энергетических состояний климатической системы.

Другим результатом проведенного анализа состояний климатической системы представляется выявление большой роли депонированной энергии. Выделяется два главных типа энергетических резервуаров: тепловые и гравитационные. Приток энергии из гравитационных резервуаров приводит к возрастанию интенсивности процессов в климатической системе, ее разогреву (LS-режим) и наполнению тепловых резервуаров. Последующий расход энергии в климатических процессах сопровождается охлаждением системы, опустошением тепловых резервуаров (HS-режим) и заполнением гравитационных резервуаров.

Третьим результатом является уточнение условий, обеспечивающих способность системы к самоорганизации. Таким условием является интенсивность потока негэнтропии, которая должна быть \geq интенсивности производства энтропии в системе. Благодаря этому, климатическая система, являясь открытой, термодинамически сильно неравновесной и нелинейной (в определенных фазах в ней протекают нелинейные процессы), во всех фазах своей эволюции сохраняет способность к самоорганизации. Депонирование энергии (увеличение негэнтропии) происходит при трансформации агрегатных состояний её ряда вещественных составляющих: из газообразного в жидкофазное, газообразного или жидкофазного – в твердофазное. В планетарной системе существует только два типа веществ, которые способны существовать во всех трех агрегатных состояниях. Это H_2O и совокупность углеродсодержащих соединений.

Температурные эффекты при переходе H_2O и углеродсодержащих соединений из одного агрегатного состояния в другое определяют тренды изменений температуры и мало амплитудных колебаний в протекание разных фаз климатического цикла. Причем, протекание нелинейных

процессов (с взаимным усилением температурного эффекта) определяется наличием положительных обратных связей, а формирование квазистационарных состояний («диссипативных структур») – отрицательными обратными связями между протекающими процессами.

В настоящее время климатическая система Земли находится в режиме «бифуркации», то даже низкоинтенсивная флуктуация может изменить траекторию её дальнейшей эволюции. К таким воздействиям можно отнести влияние техносферы на процесс взрывообразного разложения метангидратов, которые в настоящее время находятся в гидро- и криосфере в крайне неустойчивом метастабильном состоянии. Например, даже работы судового двигателя в Арктическом шельфе бывает достаточно для их разложения с выбросом метана в атмосферу со всеми вытекающими из этого последствиями [42].

Заключение

В заключение необходимо подчеркнуть, что фазы климатического цикла характеризуют процесс работы климатической системы. Её устойчивость обусловлена непрерывным потоком солнечной энергии. Работа климатической системы заключается в обмене энергией между тепловым резервуаром, заполняемым в фазу терминации, и гравитационным резервуаром, заполняемым в фазу модерации. Фазы кульминации и редукции играют роль «клапанов», попеременно открывающих и запирающих соответствующие резервуары. Основным механизмом, обеспечивающим работу «клапанов» климатической системы является смена знаков обратных связей между термодинамическими компонентами климатической системы положительных на отрицательные (в фазу редукции) и отрицательных на положительные (на рубеже кульминации и редукции).

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научных проектов № 17-05-41079 и № 18-55-5354ГФЕН_а.

Литература

1. Николис Г., Пригожин И. Познание сложного. – М.: Мир, 1990. – 344 с.
2. Nicolis C., Nicolis G. There a Climatic Attractor? // Nature. -1984. – vol. 311. – P. 529-532.
3. Монин А.С. Климат как проблема физики / А.С. Монин, Ю.А. Шишков // УФН. – 2000. – Том 170, № 4. – С. 419-444.
4. Князева Е.Н. Антропный принцип в синергетике / Е.Н. Князева, С.П. Курдюмов // Вопросы философии. – 1997. – № 3. – С. 70-72.
5. Кравцов Ю.А. Физические аспекты моделирования изменений в климатической системе Земли // (режим доступа: <http://www.archipelag.ru/agenda/geoklimat/effort/aspect/>) дата обращения: 1.12.2018.
6. Кравцов Ю.А. Земля как самоорганизующаяся климато-экологическая система / Ю.А. Кравцов // Соросовский Образовательный Журнал. – 1995. – № 1. – С. 82-87.
7. Спектор В.Б. Климатические циклы и криогенные эпохи на Северо-Востоке России / В.Б. Спектор, Б.М. Кершенгольц, В.В. Спектор, С.Х. Лифшиц, Г.Т. Максимов // Наука и техника в Якутии. – 2015. – № 1(28). – С. 3-9.
8. Адушкин В.В., Соловьев С.П., Турунтаев С.Б. Соотношение антропогенной и природной составляющих в потоке газов в атмосферу // Глобальные изменения природной среды – 2001. Новосибирск: СО РАН «ГЕО», 2001. – С. 249-264.
9. Балобаев В.Т. Космо-планетарные климатические циклы и их роль в развитии биосферы Земли / В.Т. Балобаев, В.В. Шенелев // ДАН. – 2001. – Т. 379, № 2. – С. 247-251.
10. Mudelsee M. The phase relations among atmospheric CO₂ content, temperature and global ice volume over the past 420 ka // Quaternary Science Reviews. – 2001. – 20. – P. 583-589.
11. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core Antarctica // Nature. – 1999. – Vol. 399. – P. 429-436.
12. Shackleton N.J. The 100.000-year Ace-Age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity // Science. – 2000. – Vol. 289. – P. 1897-1902.
13. Большаков В.А. Уроки развития орбитальной теории климата / В.А. Большаков, А.П. Капица // Вестник РАН. – 2011. – том 81, № 7. – С. 603-612.
13. Кеннет Дж. Морская геология: в 2х томах. – М.: Мир, 1987. – Т. 1. – 397 с., Т. 2. – 384 с.

14. Большаков В.А.. Орбитальные факторы воздействия на криосферу Земли (на примере анализа антарктических кернов) / В.А. Большаков, В.А. Федин // Криосфера Земли. – 2015. – Том XIX, № 2. – С. 87-97.
15. Bradley R.S. Paleoclimatology. Reconstructing Climate of the Quaternary. 2nd edition. International Geophysics Series. vol. 64. – Harcourt Academic Press, 1999. – 610 p.
16. Broecker W.S., van Donk J. Insolation changes, ice volumes, and the O¹⁸ record in deep-sea cores // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1970. – № 8. – P. 169-198.
17. Muller R., MacDonald G. Glacial cycles and astronomical forcing // Science. – 1997. – vol. 277. – P. 215-218.
18. Периодичность – фундаментальная характеристика мироздания. Цикличность Хаоса и порядка // (режим доступа: <http://www.wedjat.ru/index.php?id=newsid>) дата обращения: 1.12.2018.
19. Хакен Г. Синергетика и иерархии неустойчивостей в самоорганизующихся системах и устройствах. – М.: Мир, 1985. – 424 с.
20. Огурцов А.Н. Введение в синергетику. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2013. – 208 с.
21. Трухин В.И., Показеев К.В., Куницын В.Е. Общая и экологическая геофизика. – М: ФИЗМАТЛИТ, 2005. – 576 с.
22. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. Общая гидрология. – Л.: Гидрометеоздат, 1973. – 463 с.
23. Климатическая система Земли // (режим доступа: diplomba.ru/work/127454) дата обращения: 8.12.2018.
24. Глобальное потепление // (режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Глобальное_потепление) дата обращения: 8.12.2018.
25. Спектор В.Б. Карбонатно-метановая система саморегуляции планетарного климата / В.Б. Спектор, Б.М. Кершенгольц, С.Х. Лифшиц, В.В. Спектор // Известия РАН. Серия географическая. – 2007. – № 6. – С. 1-12.
26. Спектор В.Б. Карбонатная геохимическая модель планетарного климата / В.Б. Спектор, Б.М. Кершенгольц // Доклады Академии Наук. – 2007. – Том 416, № 3. – С. 1-3.
27. Иващенко. Потепление // (режим доступа: <http://www.poteplenie.ru/news/news170905.htm>) дата обращения: 8.12.2018.
28. Потепление // (режим доступа: <http://www.poteplenie.ru/problem/oi-1-3.htm>) дата обращения: 8.12.2018.
29. Алексеев В.В. Рост концентрации CO₂ в атмосфере – всеобщее благо? / В.В. Алексеев, С.В. Киселева, Н.И. Чернова // Природа. – 1999. – № 9. – С. 3-13.
30. Валяев Б.М. Углеродная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений / Б.М. Валяев // Газовая промышленность. – 1997. – № 7. – С. 6-10.
31. Заварзин Г.А. Становление биосферы / Г.А. Заварзин // Вестник Российской Академии наук. – 2001. – Том 71, № 11. – С. 988-1001.
32. Запасы снега и льда // (режим доступа: <https://geographyofrussia.com/zapasy-snega-i-lda/>) дата обращения: 8.12.2018.
33. Пригожин И., Стенгерс, И. Время, хаос, квант. К решению парадокса времени. – М: Едиториал УРСС, 2003. – 240 с.
34. Матизен Э.В. Состояние самоорганизованной критичности в джефсоновской решетке / Э.В. Матизен, В.Г. Мартынец, П.П. Безверхи // Вестник СибГУТИ. – 2009. – № 3. – С. 137-144.
35. Хакен Г. Синергетика. – М.: Мир, 1980. – 404 с.
36. Солнечная радиация // (режим доступа: <http://www.studfiles.ru/preview/5162964/>) дата обращения: 8.12.2018.
37. Ойкумена // (режим доступа: <http://geo-site.ru/index.php/>) дата обращения: 8.12.2018.
38. Спектор В.В. Происхождение криолитогенных комплексов высокой равнины Лено-Амгинского междуречья: автореф. дис. ... к. геогр.н.: 25.00.08 – Якутск: ИМЗ СО РАН, 2003. – 28 с.
39. Спектор В.В., Спектор В.Б. Криогенно-аккумулятивные процессы и явления в плейстоцене и голоцене на территории Центральной Якутии // Итоги геокриологических исследований в Якутии в XX веке и перспективы их дальнейшего развития. – Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН, 2003. – С. 133-148.
40. Гросвальд М.Г. Евразийские гидросферные катастрофы и оледенения Арктики. – М.: Научный мир, 1999. – 118 с.

41. Взаимодействие оледенения с атмосферой и океаном / отв. ред. В.М. Котляков, М.Г. Гросвальд. – М.: Наука, 1987. – 248 с.
42. Шахова Н.Е. Антропогенный фактор и эмиссия метана на Восточно-Сибирском шельфе / Н.Е. Шахова, В.А. Юсупов, А.Н. Салюк, Д.А. Космач, И.П. Семилетов // ДАН. – 2009. – Том 429, № 3. – С. 398-401.

References

1. Nikolis G., Prigozhin I. Poznanie slozhnogo. – М.: Mir, 1990. – 344 s.
2. Nicolis C., Nicolis G. There a Climatic Attractor? // Nature. – 1984. – Vol. 311. – P. 529-532.
3. Monin A.S. Klimat kak problema fiziki / A.S. Monin, Yu.A. Shishkov // UFN. – 2000. – Tom 170, № 4. – S. 419-444.
4. Knyazeva E.N. Antropnyj princip v sinergetike / E.N. Knyazeva, S.P. Kurdyumov // Voprosy filosofii. – 1997. – № 3. – S. 70-72.
5. Kravcov YU.A. Fizicheskie aspekty modelirovaniya izmenenij v klimaticheskoy sisteme Zemli // (rezhim dostupa: <http://www.archipelag.ru/agenda/geoklimat/effort/aspect/>) data obrashcheniya: 1.12.2018.
6. Kravcov YU.A. Zemlya kak samoorganizuyushchayasya klimato-ekologicheskaya sistema / YU.A. Kravcov // Sorosovskij Obrazovatel'nyj Zhurnal. – 1995. – № 1. – S. 82-87.
7. Spektor V.B. Klimaticheskie cikly i kriogennye ehposhi na Severo-Vostoke Rossii / V.B. Spektor, B.M. Kershengol'c, V.V. Spektor, S.H. Lifshic, G.T. Maksimov // Nauka i tekhnika v Yakutii. – 2015. – № 1(28). – S. 3-9.
8. Adushkin V.V., Solov'ev S.P., Turuntaev S.B. Sootnoshenie antropogennoj i prirodnoj sostavlyayushchih v potoke gazov v atmosferu // Global'nye izmeneniya prirodnoj sredy – 2001. Novosibirsk: SO RAN «GEO», 2001. – S. 249-264.
9. Balobaev V.T. Kosmo-planetarnye klimaticheskie cikly i ih rol' v razvitii biosfery Zemli / V.T. Balobaev, V.V. Shepelev // DAN. – 2001. – T. 379, № 2. – S. 247-251.
10. Mudelsee M. The phase relations among atmospheric CO₂ content, temperature and global ice volume over the past 420 ka // Quaternary Science Reviews. – 2001. – 20. – P. 583-589.
11. Petit J.R., Jouzel J., Raynaud D. et al. Climate and atmospheric history of the past 420 000 years from the Vostok ice core Antarctica // Nature. – 1999. – Vol. 399. – P. 429-436.
12. Shackleton N.J. The 100.000-year Ace-Age cycle identified and found to lag temperature, carbon dioxide, and orbital eccentricity // Science. – 2000. – vol. 289. – P. 1897-1902.
13. Bol'shakov V.A. Uroki razvitiya orbital'noj teorii klimata / V.A. Bol'shakov, A.P. Kapica // Vestnik RAN. – 2011. – Tom 81, № 7. – S. 603-612.
13. Kennet Dzh. Morskaya geologiya: v 2h tomah. – М.: Mir, 1987. – T. 1. – 397 s., T. 2. – 384 s.
14. Bol'shakov V.A.. Orbital'nye faktory vozdeystviya na kriosferu Zemli (na primere analiza antarkticheskikh kernov) / V.A. Bol'shakov, V.A. Fedin // Kriosfera Zemli. – 2015. – Tom XIX, № 2. – S. 87-97.
15. Bradley R.S. Paleoclimatology. Reconstructing Climate of the Quaternary. 2nd edition. International Geophysics Series. Vol. 64. – Harcourt Academic Press, 1999. – 610 p.
16. Broecker W.S., van Donk J. Insolation changes, ice volumes, and the O18 record in deep-sea cores // Reviews of Geophysics and Space Physics. – 1970. – № 8. – P. 169-198.
17. Muller R., MacDonald G. Glacial cycles and astronomical forcing // Science. – 1997. – Vol. 277. – P. 215-218 .
18. Periodichnost' – fundamental'naya harakteristika mirozdaniya. Ciklichnost' Haosa i poryadka // (rezhim dostupa: <http://www.wedjat.ru/index.php newsid>) data obrashcheniya: 1.12.2018.
19. Haken G. Sinergetika i ierarhii neustojchivostej v samoorganizuyushchih sistemah i ustrojstvah. – М.: Mir, 1985. – 424 s.
20. Ogurcov A.N. Vvedenie v sinergetiku. – Har'kov: NTU «HPI», 2013. – 208 s.
21. Truhin, V.I., Pokazeev, K.V., Kunicyn, V.E. Obshchaya i ekhologicheskaya geofizika. – М: FIZMATLIT, 2005. – 576 s.
22. Davydov L.K., Dmitrieva A.A., Konkina N.G. Obshchaya gidrologiya. – L.: Gidrometeoizdat, 1973. – 463 s.
23. Klimaticheskaya sistema Zemli // (rezhim dostupa: diplomba.ru/work/127454) data obrashcheniya: 8.12.2018.

24. Global'noe poteplenie // (rezhim dostupa: [https:// ru.wikipedia.org/wiki/Global'noe_poteplenie](https://ru.wikipedia.org/wiki/Global'noe_poteplenie)) data obrashcheniya: 8.12.2018.
25. Spektor V.B. Karbonatno-metanovaya sistema samoregulyacii planetarnogo klimata / V.B. Spektor, B.M. Kershengol'c, S.H. Lifshic, V.V. Spektor // Izvestiya RAN. Seriya geograficheskaya. – 2007. – № 6. – S. 1-12.
26. Spektor V.B. Karbonatnaya geohimicheskaya model' planetarnogo klimata / V.B. Spektor, B.M. Kershengol'c // Doklady Akademii Nauk. – 2007. – Tom 416, № 3. – S. 1-3.
27. Ivashchenko. Poteplenie // (rezhim dostupa: <http://www.poteplenie.ru/news/news170905.htm>) data obrashcheniya: 8.12.2018.
28. Poteplenie // (rezhim dostupa: <http://www.poteplenie.ru/problem/oi-1-3.htm>) data obrashcheniya: 8.12.2018.
29. Alekseev V.V. Rost koncentracii SO₂ v atmosfere – vseobshchee blago? / V.V. Alekseev, S.V. Kiseleva, N.I. Chernova // Priroda. – 1999. – № 9. – S. 3-13.
30. Valyaev B.M. Uglevodorodnaya degazaciya Zemli i genezis neftegazovyh mestorozhdenij / B.M. Valyaev // Gazovaya promyshlennost'. – 1997. – № 7. – S. 6-10.
31. Zavarzin G.A. Stanovlenie biosfery / G.A. Zavarzin // Vestnik Rossijskoj Akademii nauk. – 2001. – Tom 71, № 11. – S. 988-1001.
32. Zapasy snega i l'da // (rezhim dostupa: <https://geographyofrussia.com/zapasy-snega-i-lda/>) data obrashcheniya: 8.12.2018.
33. Prigozhin I., Stengers, I. Vremya, kaos, kvant. K resheniyu paradoksa vremeni. – M: Editorial URSS, 2003. – 240 s.
34. Matizen Eh. V. Sostoyanie samoorganizovannoj kritichnosti v dzhezhfonovskoj reshetke / Eh.V Matizen, V.G. Martynec, P.P. Bezverhi // Vestnik SibGUTI. – 2009. – № 3. – S.137-144.
35. Haken G. Sinergetika. – M.: Mir, 1980. – 404 s.
36. Solnechnaya radiaciya // (rezhim dostupa: <http://www.studfiles.ru/preview/5162964/>) data obrashcheniya: 8.12.2018.
37. Ojkumena // (rezhim dostupa: <http://geo-site.ru/index.php/>) data obrashcheniya: 8.12.2018.
38. Spektor V.V. Proiskhozhdenie kriolitogennyh kompleksov vysokoj ravniny Leno-Amginskogo mezhdurech'ya: avtoref. dis. ... k. geogr.n.: 25.00.08 – Yakutsk: IMZ SO RAN, 2003. – 28 s.
39. Spektor V.V., Spektor V.B. Kriogenno-akkumulyativnye processy i yavleniya v plejstocene i golocene na territorii Central'noj Yakutii // Itogi geokriologicheskikh issledovanij v Yakutii v XX veke i perspektivy ih dal'nejshego razvitiya. – Yakutsk: Izd-vo IMZ SO RAN, 2003. – S. 133-148.
40. Grosval'd, M.G. Evrazijskie gidrosfernye katastrofy i oledeneniya Arktiki. – M.: Nauchnyj mir, 1999. – 118 s.
41. Vzaimodejstvie oledeneniya s atmosferoj i okeanom / otv. red. V.M. Kotlyakov, M.G. Grosval'd. – M.: Nauka, 1987. – 248 s.
42. Shahova N.E. Antropogennyj faktor i ehmissiya metana na Vostochno-Sibirskom shel'fe / N.E. Shahova, V.A. Yusupov, A.N. Salyuk, D.A. Kosmach, I.P. Semiletov // DAN. – 2009. – Tom 429, № 3. – S. 398-401.