

Реконструкция первых клеточных организмов и их среды обитания

Армен Мулкиджанян

**Физический и биологический факультеты
Оснабрюкского университета, ФРГ**

**Факультет биоинженерии и биоинформатики и
НИИ физ.-хим. биологии им. А.Н. Белозерского
МГУ им. М.В. Ломоносова**



Collaborators:



Andrew Bychkov
(Андрей Бычков)
Moscow State University

Daria Dibrova (Дарья Диброва)
University of Osnabrück and
Moscow State University



Dmitry Cherepanov
(Дмитрий Черепанов), РАН



Michael Galperin
(Михаил Гальперин)
Eugene Koonin (Евгений Кунин)
National Center
for Biotechnology Information,
National Library of Medicine,
National Institutes of Health, USA



Support: DFG, DAAD, NIH, РФФИ, Рособразование

Введение: Принципы построения биологических полимеров

Top-down: Реконструкция древних организмов и их среды обитания

Bottom-up: Обзор новостей по абиогенному синтезу биополимеров

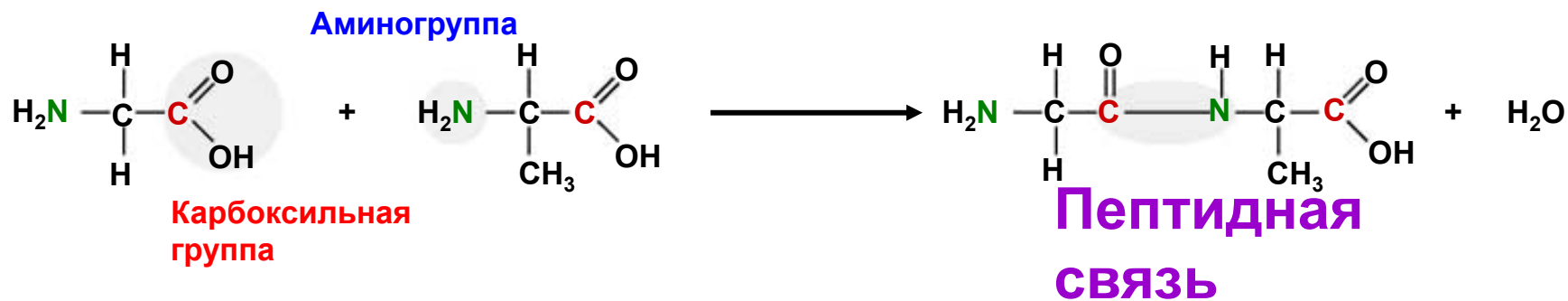
Заключение: Бескислородные геотермальные поля и происхождение жизни

Жизнь – это взаимодействие трех типов кодируемых биополимеров – ДНК, РНК и белков



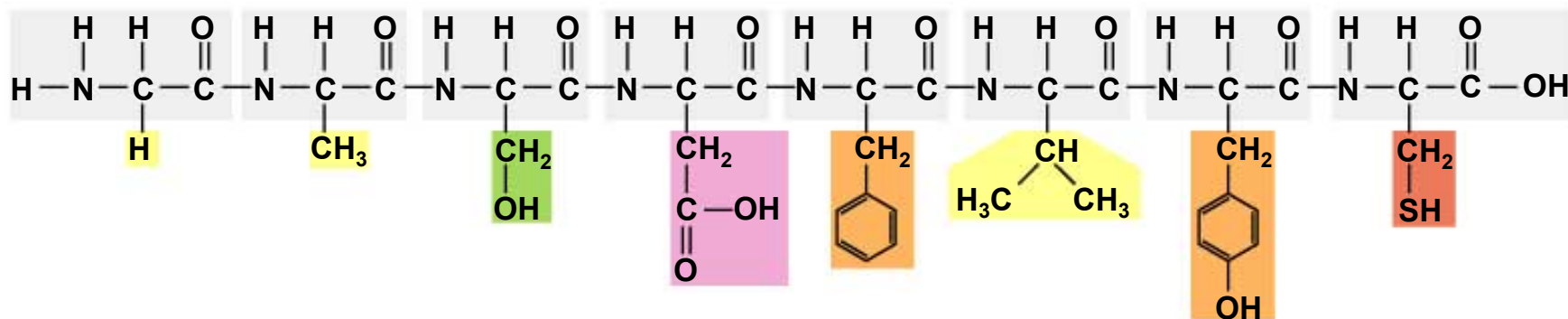
Источник рисунка: macroevolution.narod.ru

Белки состоят из аминокислот



N-terminus

C-terminus



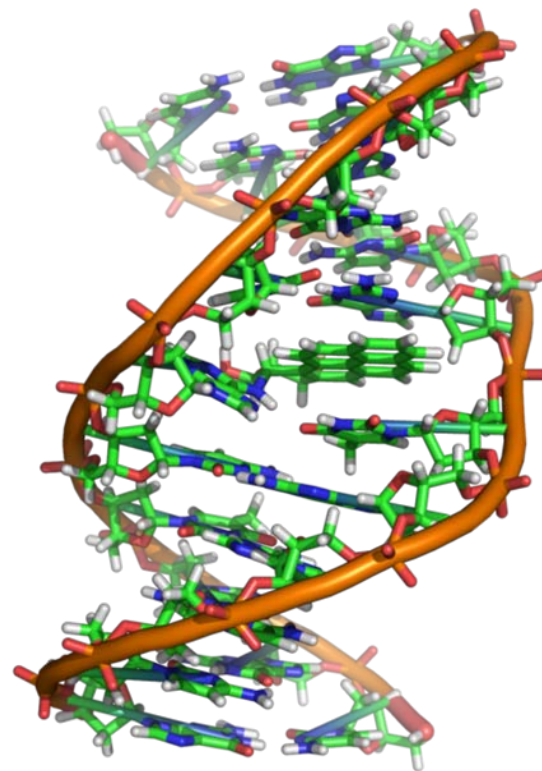
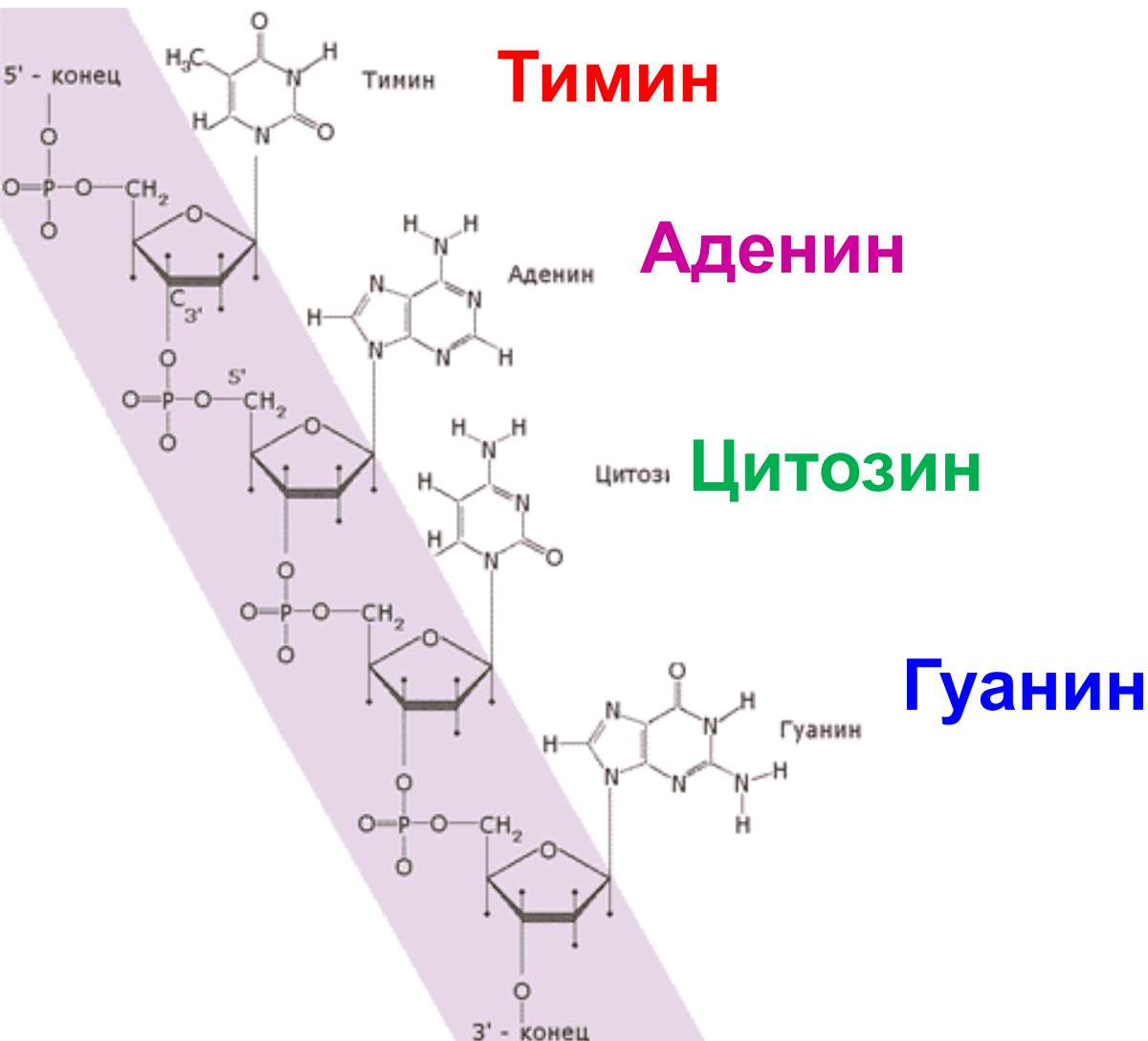
N-terminus

C-terminus



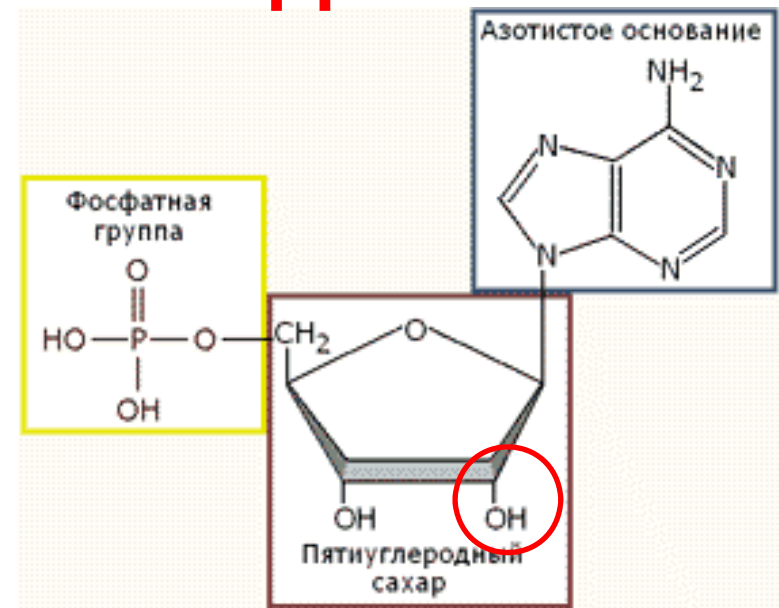
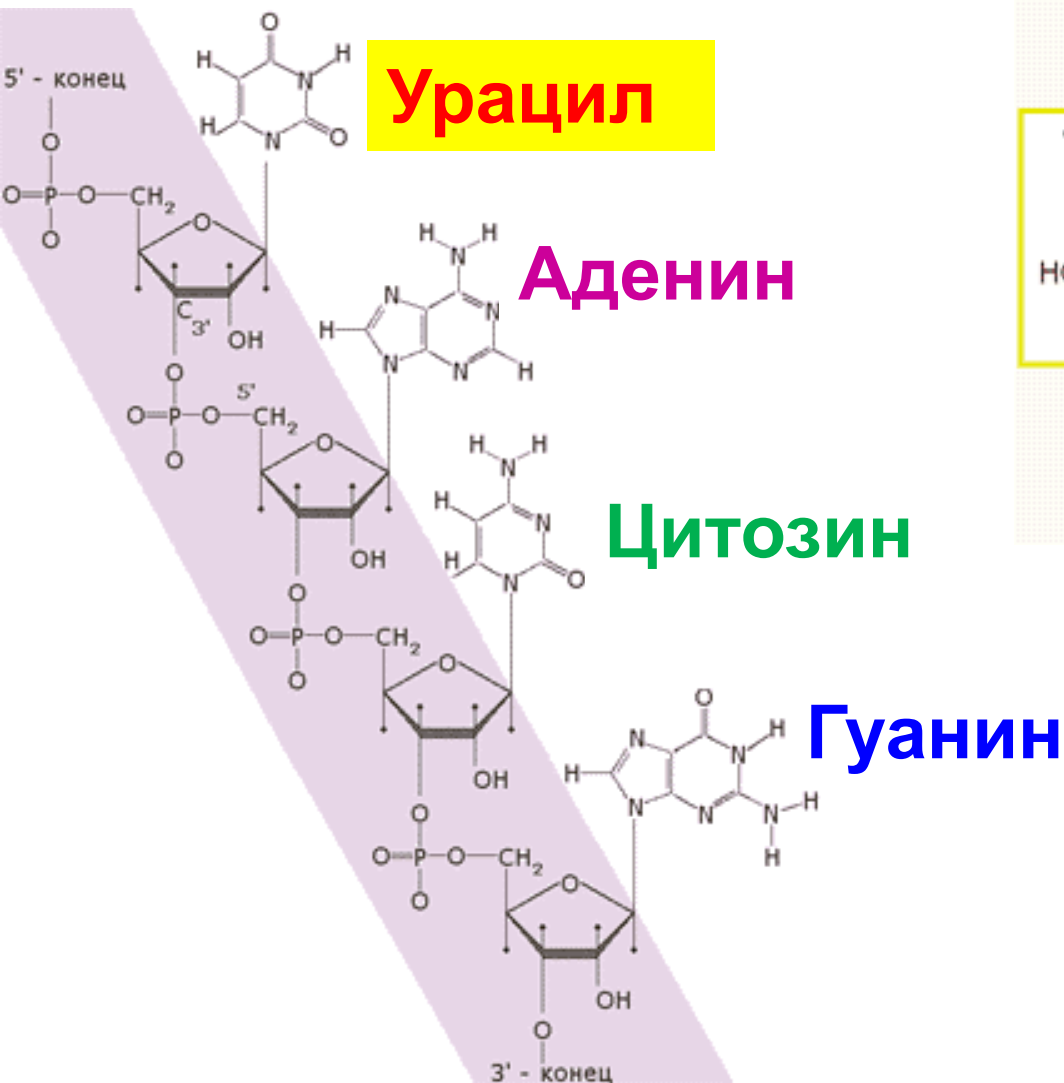
Источник рисунка: www.umbc.edu, с изменениями

ДНК, дезоксирибонуклеиновая кислота, полимер из нуклеотидов

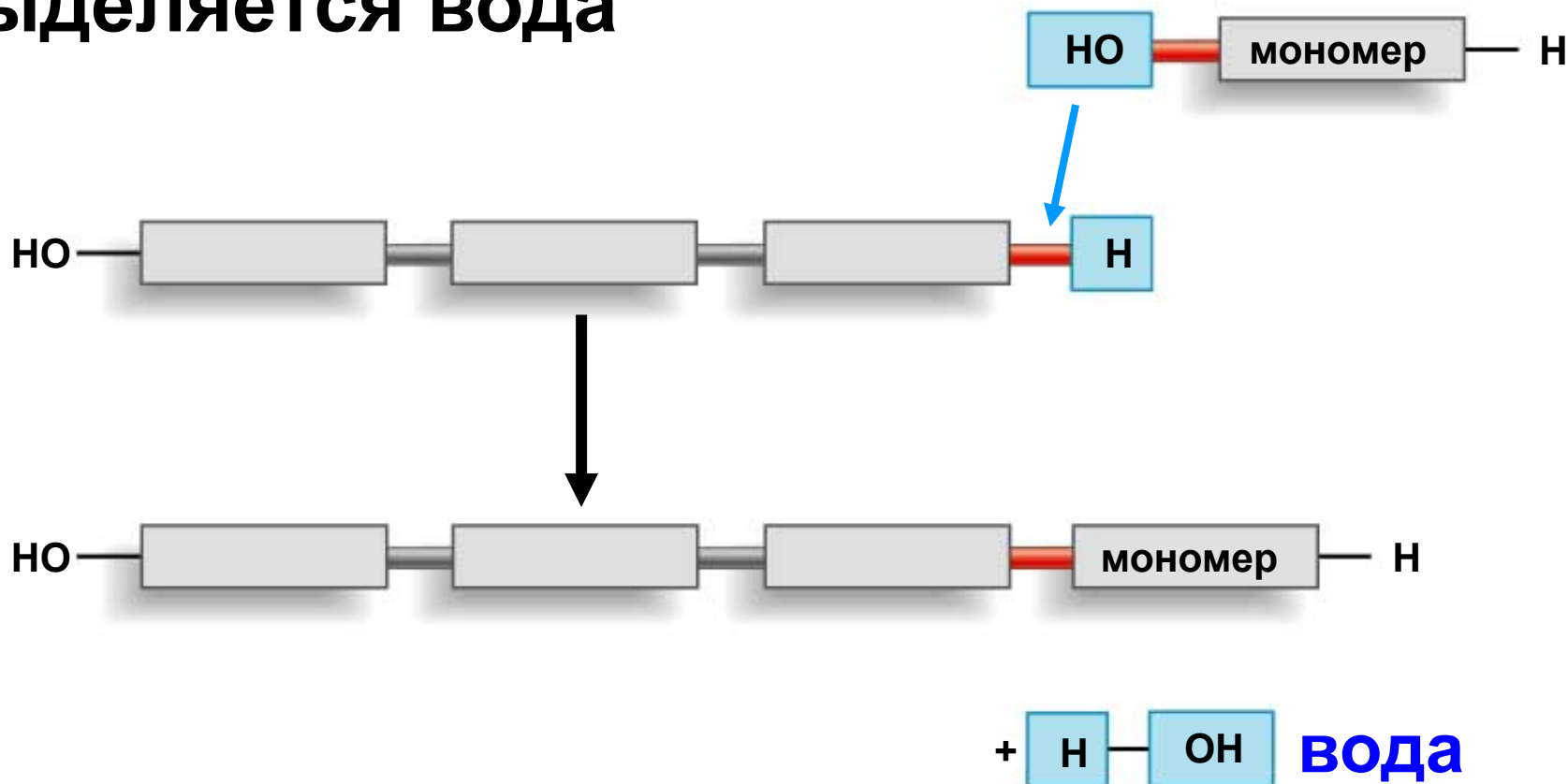


Источник рисунков: www.mathcell.ru

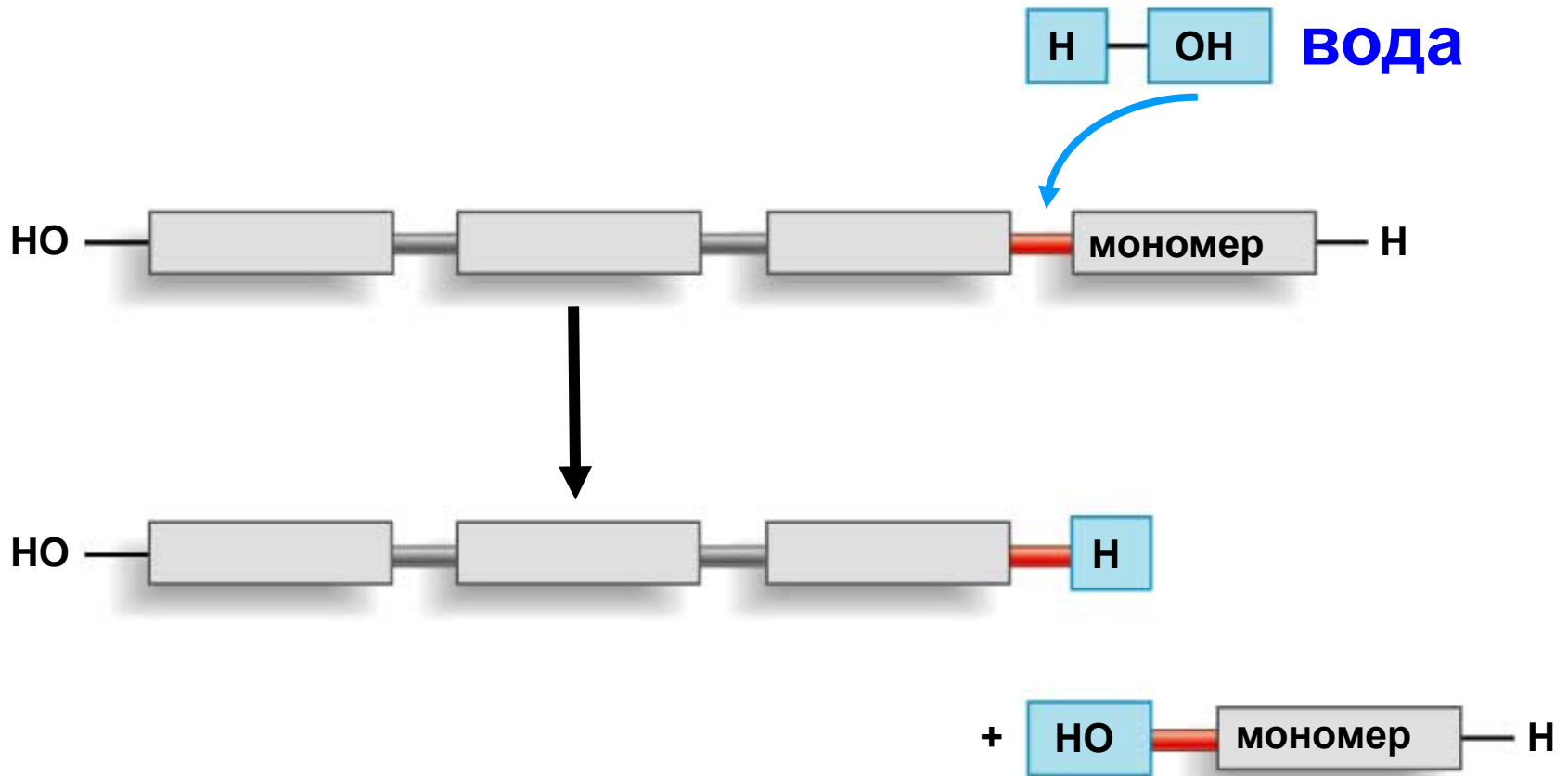
РНК, рибонуклеиновая кислота, полимер из рибонуклеотидов



При полимеризации биополимеров выделяется вода



Поэтому в присутствии воды биополимеры распадаются

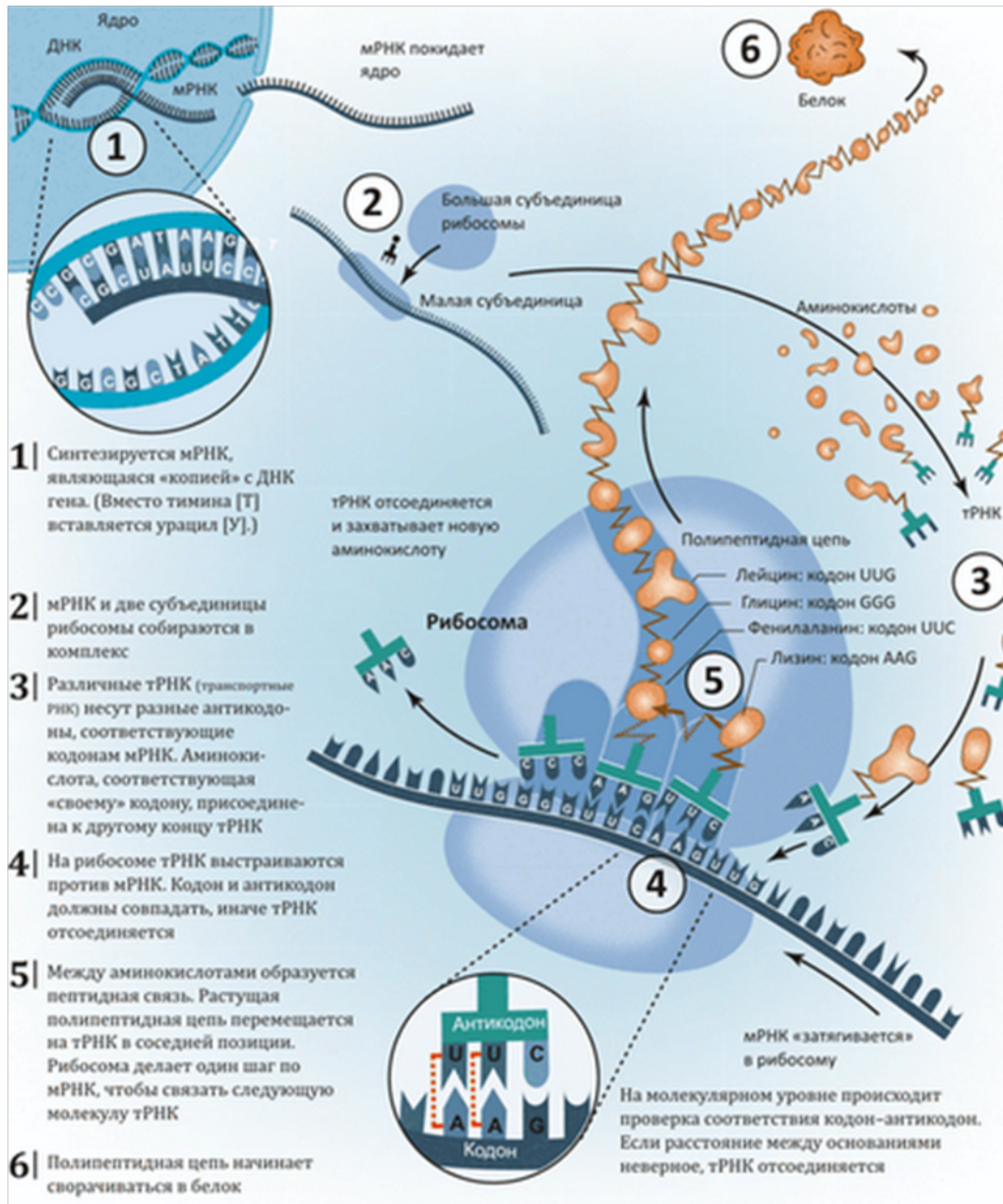


Источник: www.umbc.edu, с изменениями

**Поэтому в присутствии воды
биополимеры распадаются**

**Водный парадокс:
Спонтанное,
не требующее энергии
образование белков или
полинуклеотидов (РНК, ДНК)
не может идти в воде**

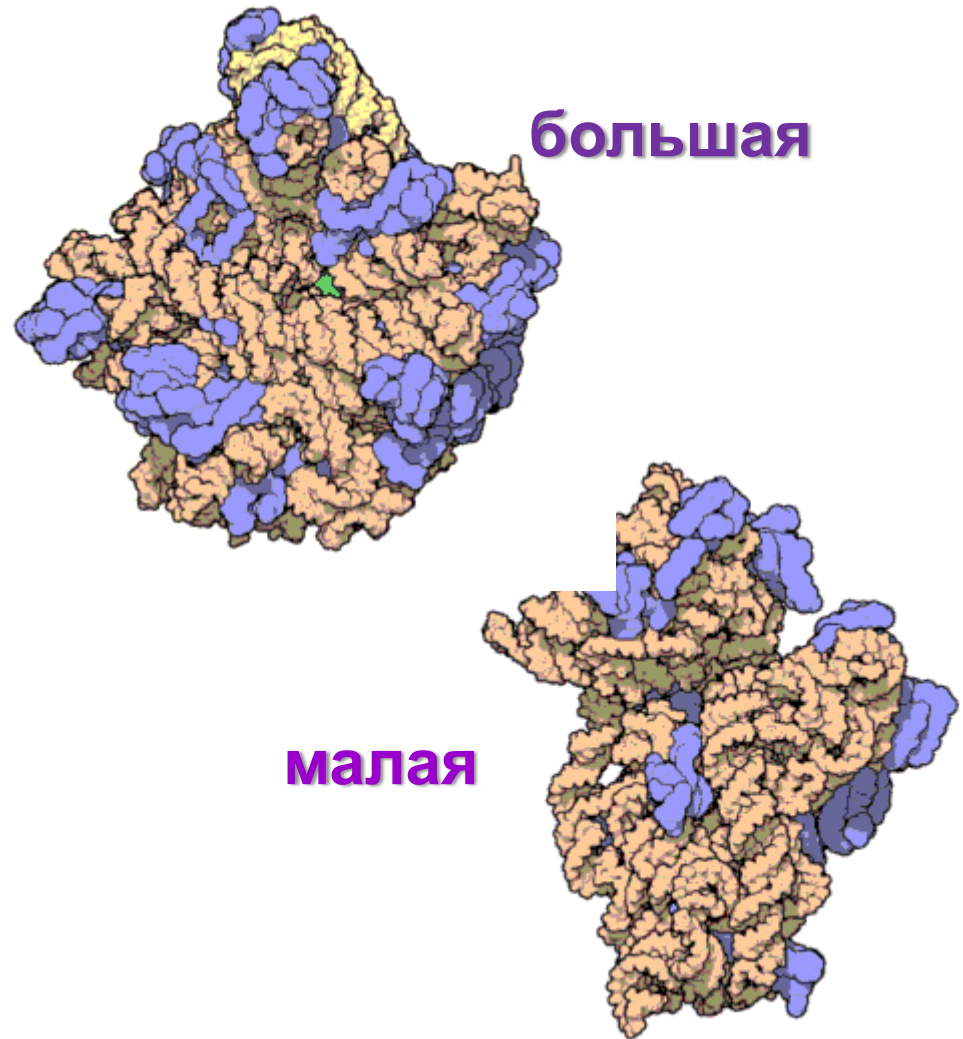
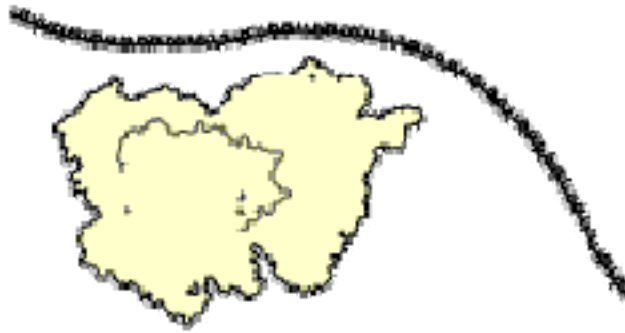
Синтез белка - трансляция



Кодируемая **ДНК** информация считывается в виде молекул **РНК** и далее используется при синтезе белков рибосомами

Синтез белка на рибосоме

Структура рибосомных субъединиц



Источник анимаций: Wikipedia

Мир самодостаточных РНК

Агрегаты молекул РНК могут сами себя реплицировать (Lancaster, Joice, 2009),

Молекулы РНК могут образовывать растущие колонии на твердом субстрате (А. Б. Четверин, А. С. Спирин),

Синтез белка на рибосоме осуществляется молекулами рибосомальной РНК (рРНК),

РНК вирусы обходятся без ДНК.



Концепция **первичности РНК**
была предложена
Андреем Николаевичем
Белозерским в 1957 г.

«...вряд ли на ранних этапах развития жизни
возникли одновременно и РНК, и ДНК.
**Нам представляется, что возникновение
рибонуклеотидов и затем РНК было первичным.**
ДНК возникла значительно позже и параллельно
с усложнением функций и все большей
дифференциацией протоплазмы».

Введение: Принципы построения
биологических полимеров

Top-down: Реконструкция древних
организмов и их среды обитания

Bottom-up: Обзор новостей по абиогенному
синтезу биополимеров

Заключение: Бескислородные
геотермальные поля и происхождение жизни

Nothing in biology makes sense except in the light of evolution.

Theodosius Dobzhansky

**Биология имеет смысл только
в свете эволюции.**



***Феодосий
Григорьевич
Добржанский***

Источник рисунка: institucional.us.es

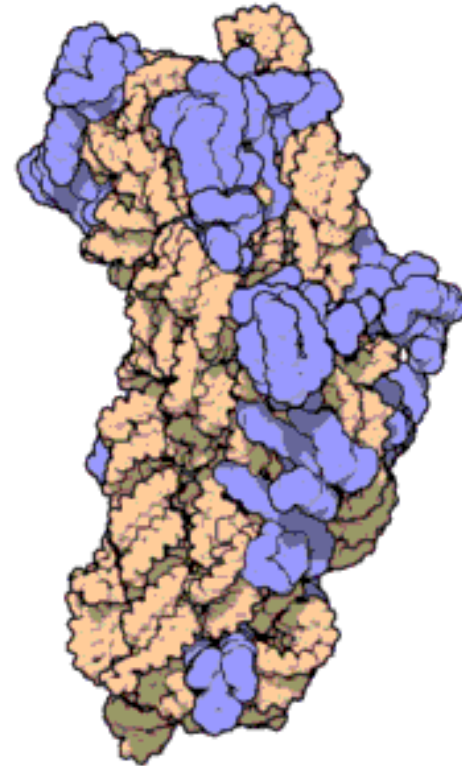
Как можно сравнить все живые организмы?



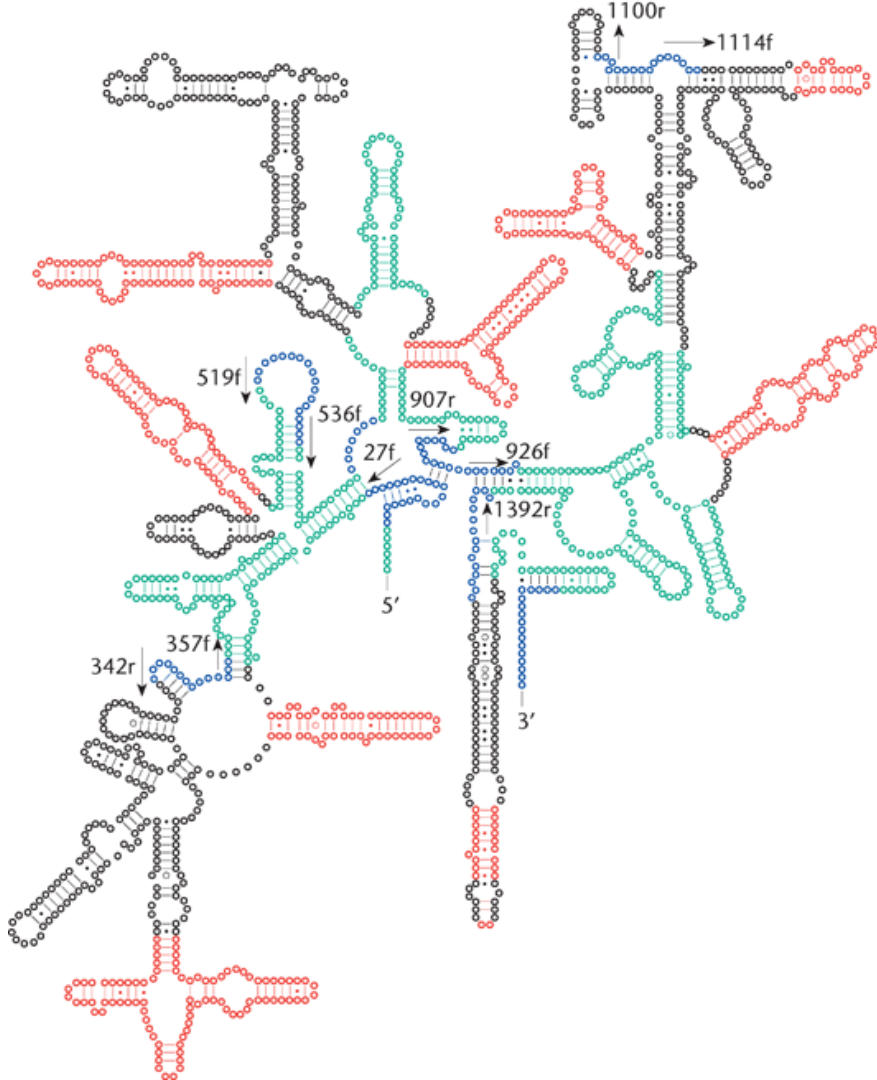
Борис Куликов (www.boriskulikov.com)



**Карл Вёзе (Carl Woese)
выбрал для сравнения
последовательности
нуклеотидов молекул
рибосомальной РНК.**

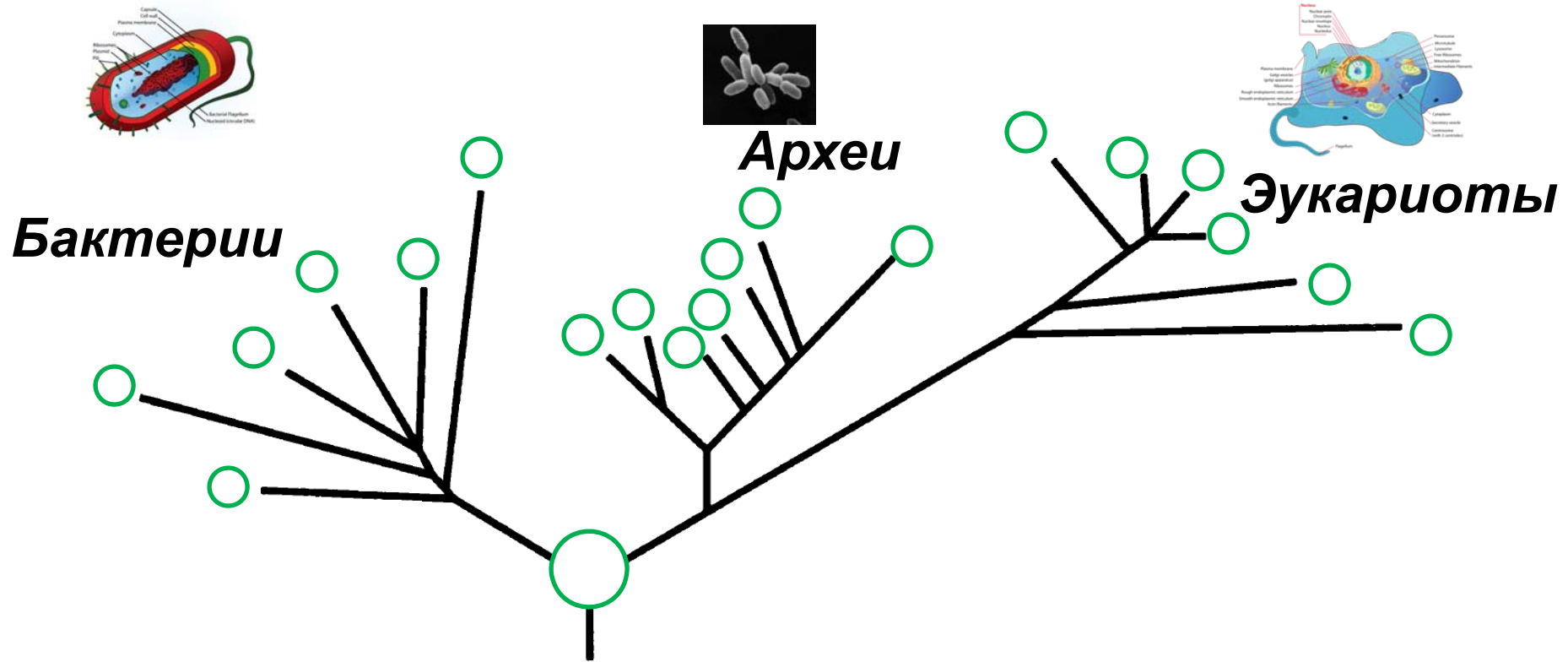


**Источники рисунков:
accres.ens-lyon.fr и wikipedia.com**



**РНК малой
рибосомной
субъединицы есть во
всех организмах.
Она содержит как
меняющиеся, так и
консервативные
участки, поэтому
сравнивая рРНК
можно определять и
дальнее и близкое
родство.**

Три домена жизни



Сравнение последовательностей 16S рРНК выявило наличие трех доменов жизни (Woese *et al.*, *PNAS*, 1977; Woese *et al.*, *PNAS*, 1990).

Сравнение первых двух бактериальных геномов выявило наличие всего 256 общих генов.

Proc. Natl. Acad. Sci. USA
Vol. 93, pp. 10268–10273, September 1996
Evolution

A minimal gene set for cellular life derived by comparison of complete bacterial genomes

ARCADY R. MUSHEGIAN AND EUGENE V. KOONIN*

National Center for Biotechnology Information, National Library of Medicine, National Institutes of Health, Bethesda, MD 20894

Communicated by Clyde Hutchinson, University of North Carolina, Chapel Hill, NC, May 17, 1996 (received for review March 11, 1996)



Аркадий
Мушегян



Евгений
Кунин

Методы сравнительной геномики позволяют, анализируя полные геномы, предсказывать функции большинства закодированных в геномах белков.



**Кира
Макарова**

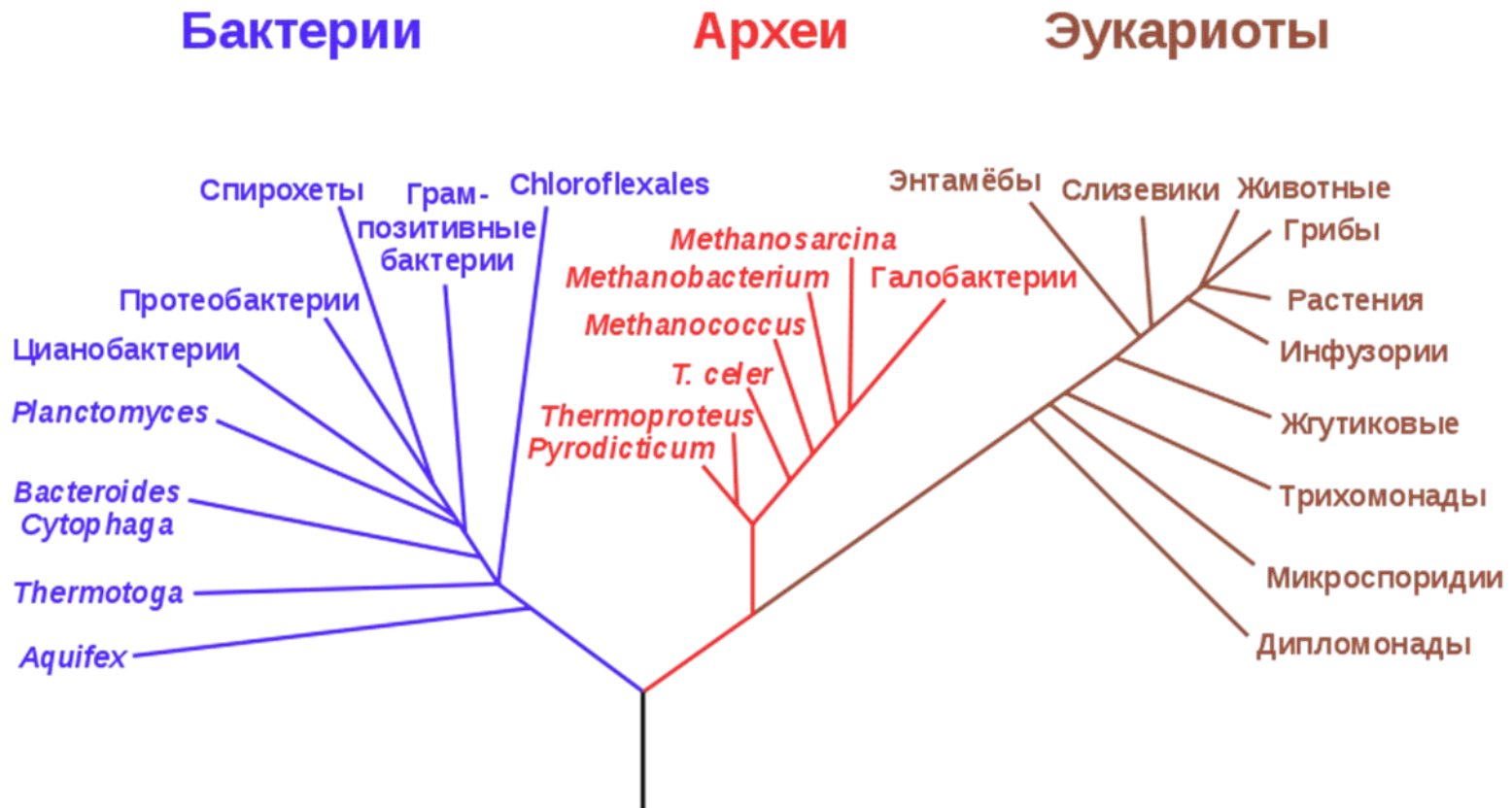


**Юрий
Вульф**



**Михаил
Гальперин**

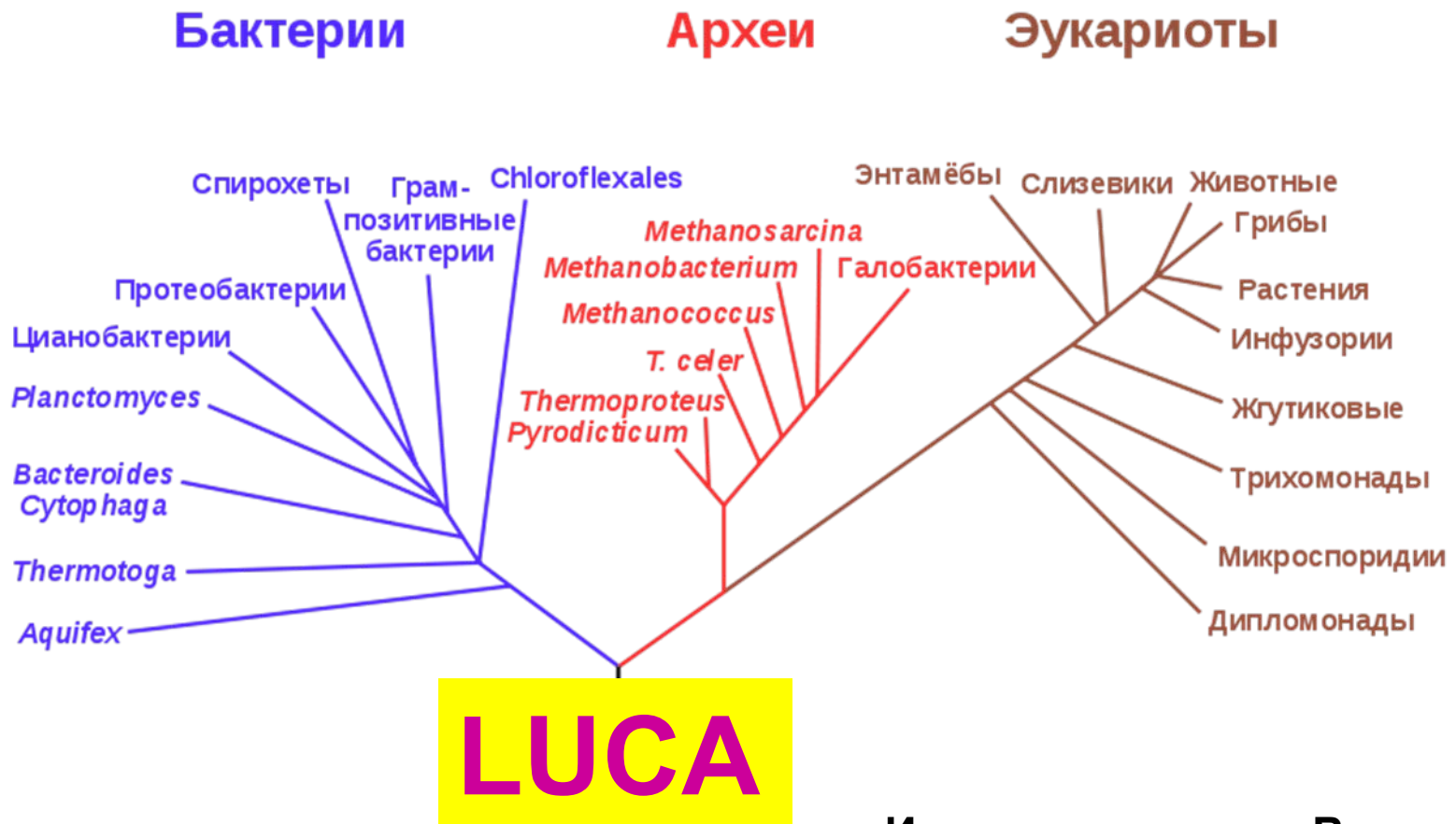
В биологии предковые формы реконструируют, выявляя общие свойства потомков.
Сравнивая **архей** и **бактерий** можно «реконструировать» их общего предка



Источник рисунка: Википедия

Набор из ~ 60 кодирующих белки генов есть у всех организмов (Koonin, 2000).

Эти гены были и у **последнего предка клеточных организмов (LUCA, Last Universal Cellular Ancestor)**



Источник рисунка: Википедия

Каким был LUCA?

Protein function	EC number (if available)
Translation and ribosomal biogenesis	
Ribosomal proteins (33)	-
Conserved translational factors (EF-G, EF-Tu, IF-1, IF-2, eIF5-a)	3.6.5.3
Most tRNA synthetases (6)	6.1.1.-
Pseudouridylate synthase	5.4.99.12
Methionine aminopeptidase	3.4.11.18
Transcription	
DNA-directed RNA polymerase [α , β , β']	2.7.7.6
Replication	
Clamp loader ATPase (pol III, subunit γ and τ)	2.7.7.7
Topoisomerase IA	5.99.1.2
DNA primase (dnaG)	2.7.7.-
Repair and Recombination	
5'-3' exonuclease (including N- terminal domain of PolI)	3.1.11.-
RecA/RadA (Rad51) recombinase	-

Белки LUCA:

45 белков,
участвующих в
синтезе белка,

1 белок транскрипции,

3 белка репликации,

Каким был LUCA?

Protein function	EC number (if available)
Chaperone function	
Chaperonin GroEL	3.6.4.9
Nucleotide and amino acid metabolism	
Thymidylate kinase	2.7.4.9
Thioredoxin reductase	1.8.1.9
Thioredoxin	-
CDP-diglyceride-synthase	2.7.7.41
Energy conversion	
Phosphomannomutase	5.4.2.8
Catalytic subunit of the membrane ATP synthase	3.6.3.14
Proteolipid subunits of the membrane ATP synthase	3.6.3.14
Coenzymes	
Glycine hydroxymethyltransferase	2.1.2.1

Белки LUCA:

белки метаболизма
нуклеотидов,
аминокислот, сахаров
и липидов

Каким был LUCA?

Protein function	EC number (if available)
Protein Secretion	
Preprotein translocase subunit SecY	-
Signal recognition particle GTPase FtsY	3.6.5.4
Miscellaneous	
Predicted GTPase (YchF, PF06071, 1JAL, 2OHF, 2DBY, 2DWQ, 1NI3)	-
S-adenosylmethionine-6-N',N'-adenosyl (rRNA) dimethyltransferase (KsgA)	2.1.1.48

Белки LUCA:

белки секреции
белков из клетки,

3 мембранных белка

Что мы знаем про LUCA?

LUCA умел синтезировать белки на рибосомах.

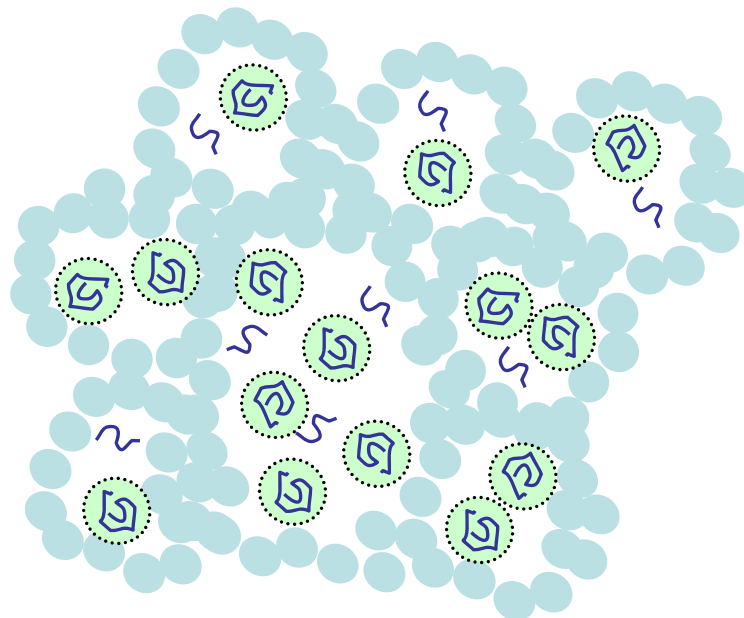
Была ли ДНК у LUCA – до сих пор не ясно.

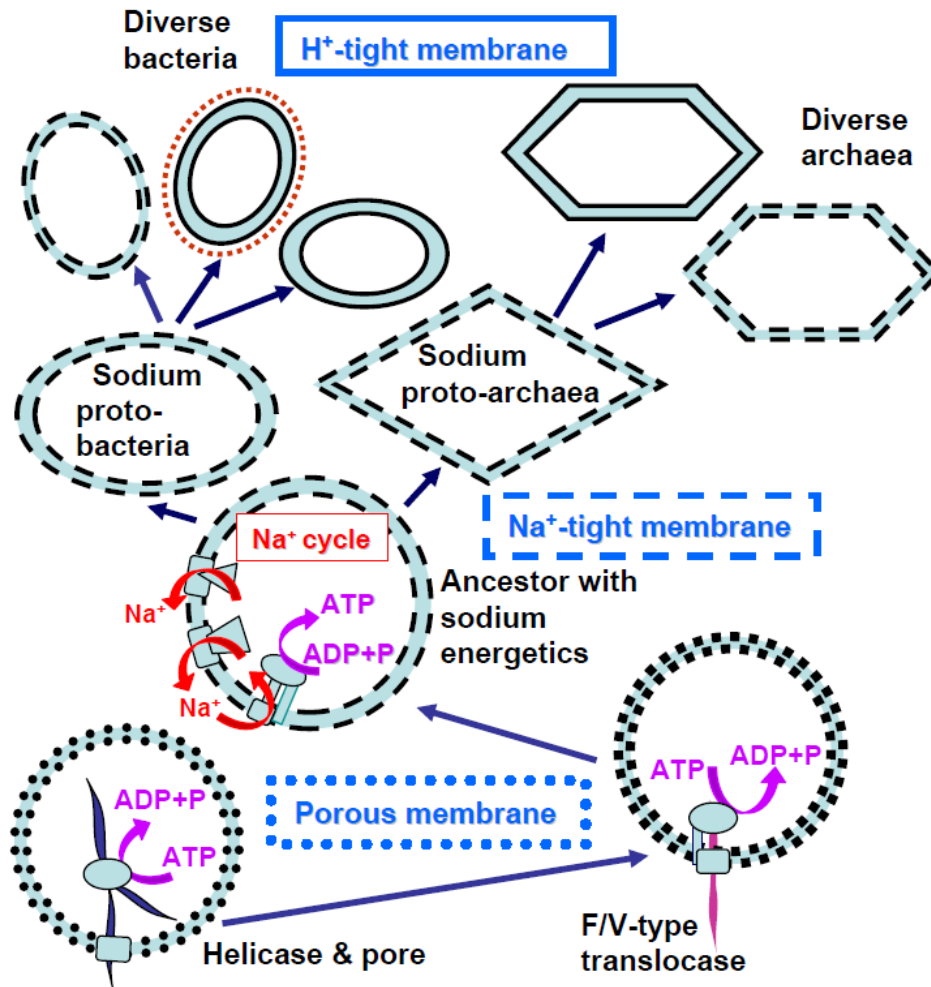
Надежно хранить и воспроизводить большие количества информации LUCA не мог, поэтому каждый организм мог синтезировать только несколько белков и метаболитов.

Метаболиты и ферменты должны были «обобществляться», приводя к взаимозависимости, что повышало стабильность сообществ и защищало от паразитов.

Эта взаимозависимость существует и сейчас и обеспечивает устойчивость биосферы.

**LUSA - консорциум
взаимозависимых и
способных к синтезу
белков и метаболитов
организмов, обитавших,
возможно, в пористых
неорганических
отложениях.**





Поскольку первые клетки обменивались метаболитами, их мембраны должны были быть проницаемыми для малых ионов.

Ионные составы цитоплазмы первых клеток и их сред обитания должны были быть схожи.

Ионный состав цитоплазмы очень сильно отличается от химии природных водоемов.

Все клетки содержат большие количества переходных металлов, таких как **Zn, **Fe**, **Mn**.**

**Отражают ли эти особенности среду обитания первых клеток?
Насколько эти свойства древние?**

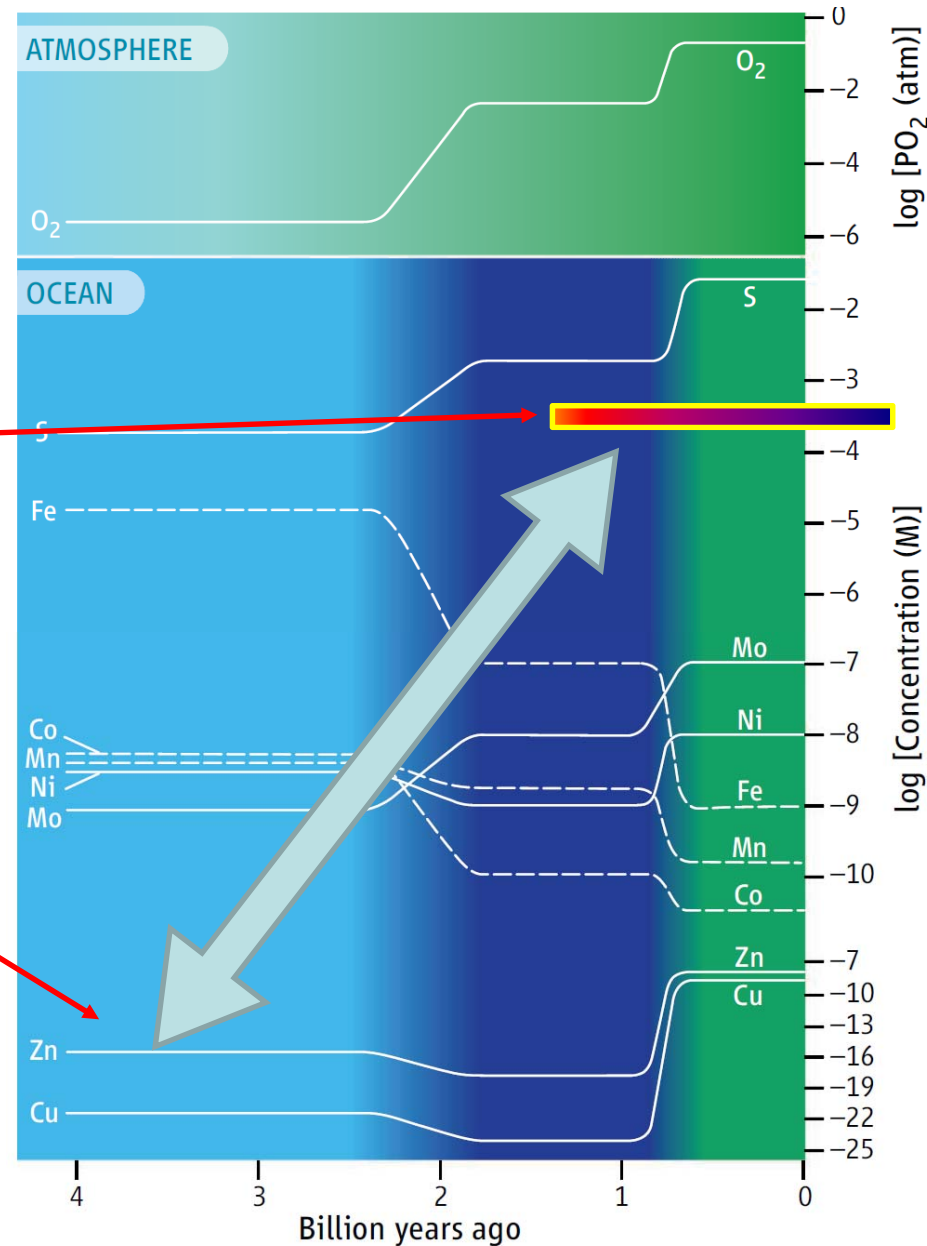
	Морская вода	вода древнего океана	цитоплазма
Na ⁺	0.4	>0.4	0.01
K ⁺	0.01	~0.01	0.1
Ca ²⁺	0.01	~0.01	0.001
Mg ²⁺	0.05	~0.01	0.01
Fe	10 ⁻⁸ (mostly Fe ³⁺)	10 ⁻⁵	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Mn ²⁺	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶
Zn ²⁺	10 ⁻⁹	<10 ⁻¹²	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Cu	10 ⁻⁹ (Cu ²⁺)	<10 ⁻²⁰ (Cu ¹⁺)	10 ⁻⁵
Cl ⁻	0.5	>0.1	0.1
PO ₄ ³⁻	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁵	~10 ⁻² (mostly bound)

Цинковый парадокс

Содержание Zn^{2+} в современных клетках

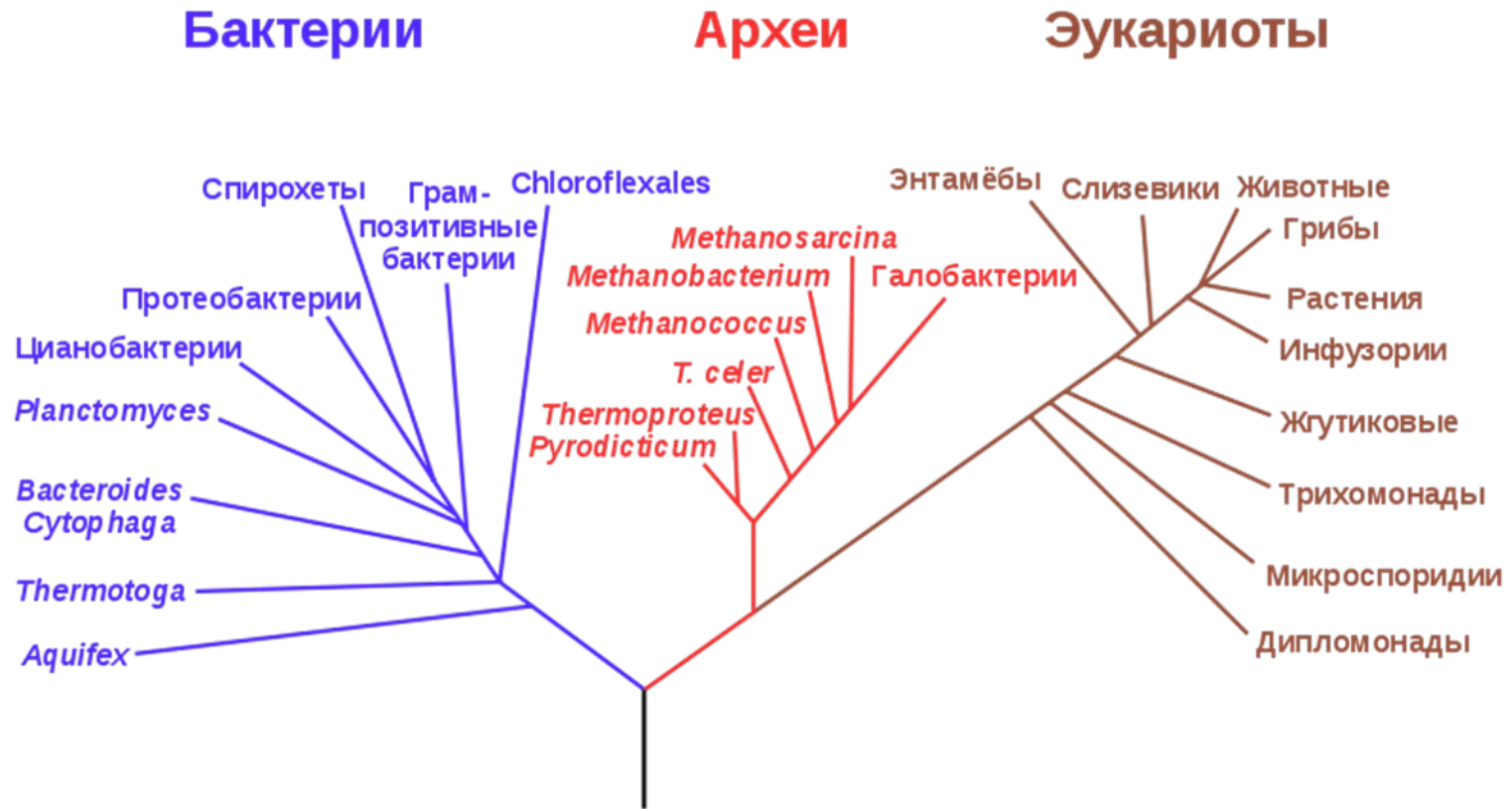
Содержание Zn^{2+} в древнем бескислородном океане

ЛУСА жил в местах, богатых цинком?



From Anbar, 2008, *Science*

Ионный состав цитоплазмы похож в бактериях и археях, хотя они и разошлись > 3.4 миллиарда лет назад.



Источник рисунка: Википедия

Переходные металлы в белках LUCA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Translation and ribosomal biogenesis						
Ribosomal proteins (33)	-	-	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺ , Na ⁺	-	Mg ²⁺ , Cd ²⁺ , Zn ²⁺
Conserved translational factors (EF-G, EF-Tu, IF-1, IF-2, eIF5-a)	3.6.5.3	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , NH ₄ ⁺ , ↓Na ⁺	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Most tRNA synthetases (6)	6.1.1.-	PP _i	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Pseudouridylate synthase	5.4.99.12	PO ₄ ³⁻	-	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Methionine aminopeptidase	3.4.11.18	-	-	K ⁺ , Na ⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Transcription						
DNA-directed RNA polymerase [α, β, β']	2.7.7.6	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Replication						
Clamp loader ATPase (pol III, subunit γ and τ)	2.7.7.7	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Topoisomerase IA	5.99.1.2	-	K ⁺ > Na ⁺	-	Mg ²⁺	Zn ²⁺ , Hg ²⁺
DNA primase (dnaG)	2.7.7.-	PP _i	-	-	Zn ²⁺	-
Repair and Recombination						
5'-3' exonuclease (including N- terminal domain of PolI)	3.1.11.-	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
RecA/RadA (Rad51) recombinase	-	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺

Переходные металлы в белках LUCA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations		
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures	
Chaperone function							
Chaperonin GroEL	3.6.4.9	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	
Nucleotide and amino acid metabolism							
Thymidylate kinase	2.7.4.9	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺	
Thioredoxin reductase	1.8.1.9	-	-	-	-	Mg ²⁺	
Thioredoxin	-	-	-	-	-	Cd ²⁺ , Zn ²⁺	
CDP-diglyceride-synthase	2.7.7.41	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	No entries	Mg ²⁺	No entries	
Energy conversion							
Phosphomannomutase	5.4.2.8	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	
Catalytic subunit of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺	
Proteolipid subunits of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	-	-	-	-	-	
Coenzymes							
Glycine hydroxymethyltransferase	2.1.2.1	-	↓MC ⁺	-	↓Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺	-	

Переходные металлы в белках LUSA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures

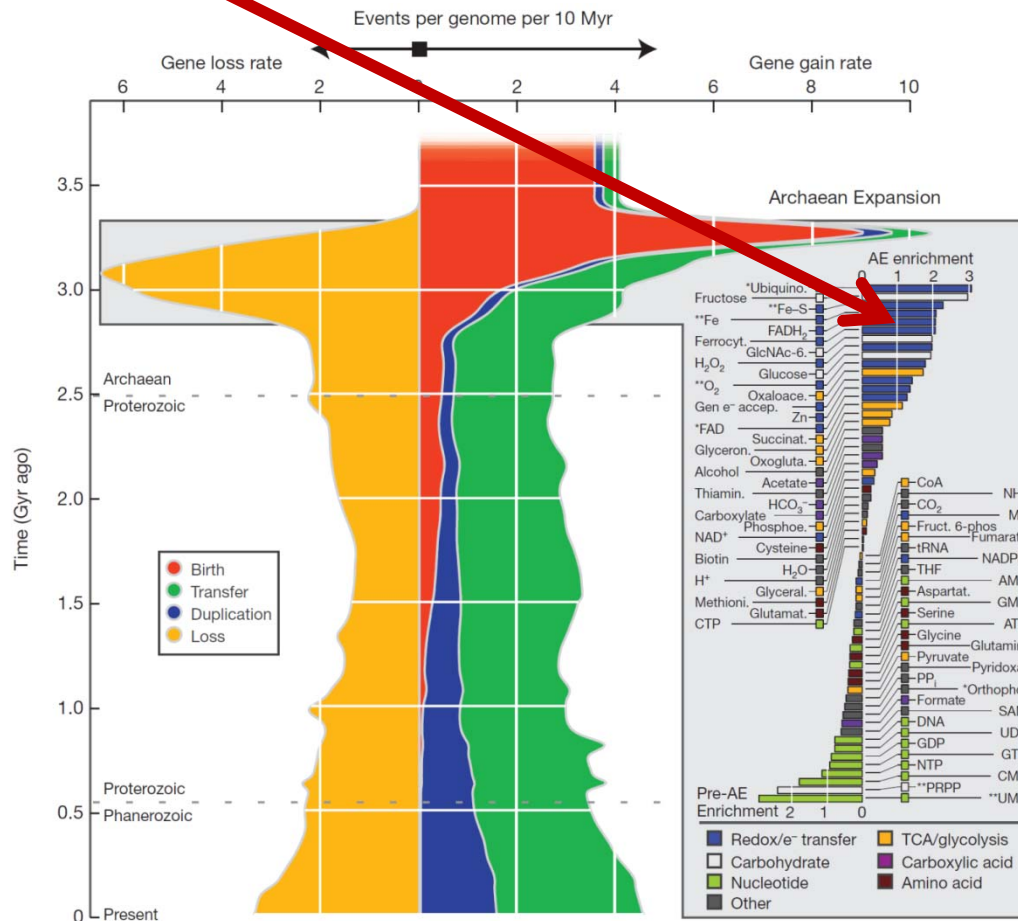
Protein Secretion

Preprotein translocase subunit

Zn^{2+}

**Всеобщие и потому древнейшие
клеточные системы нуждаются
в ионах Zn^{2+} и Mn^{2+} .**

Глобальный геномный анализ показывает, что **железо-содержащие** ферменты возникли позже **цинк-содержащих**



From: David & Alm, 2011, Nature

**В природе большие концентрации
цинка наблюдаются только в
металлоносных водах горячих
источников**

ZnS образует кольцевидные отложения вокруг глубоководных гидротермальных источников



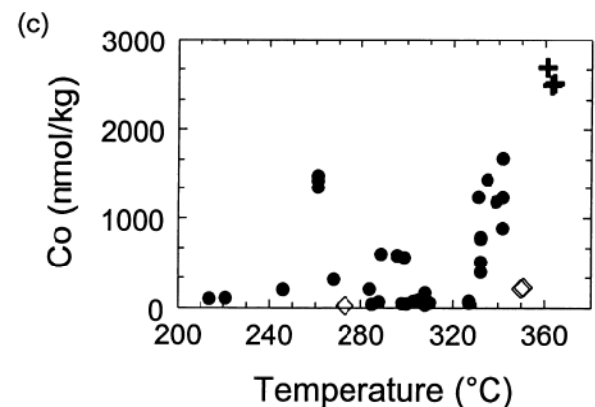
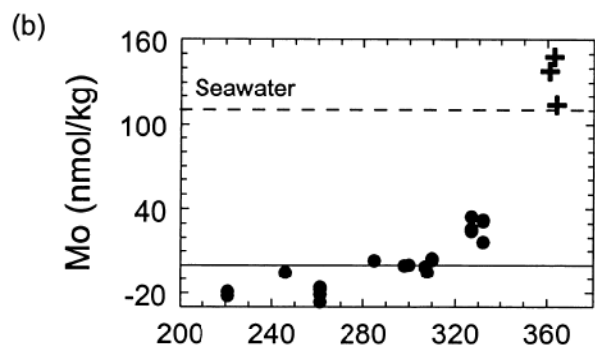
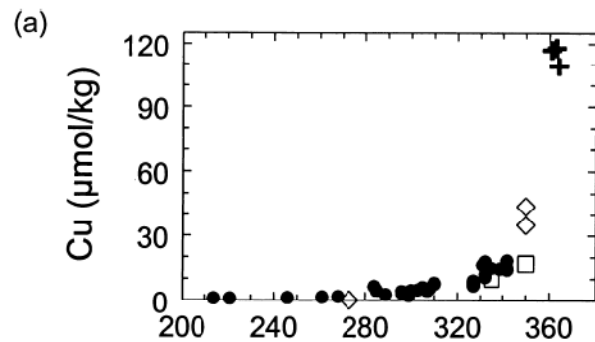
Отложения ZnS

**гидротермальные
источники
с t° – 200-300°C**

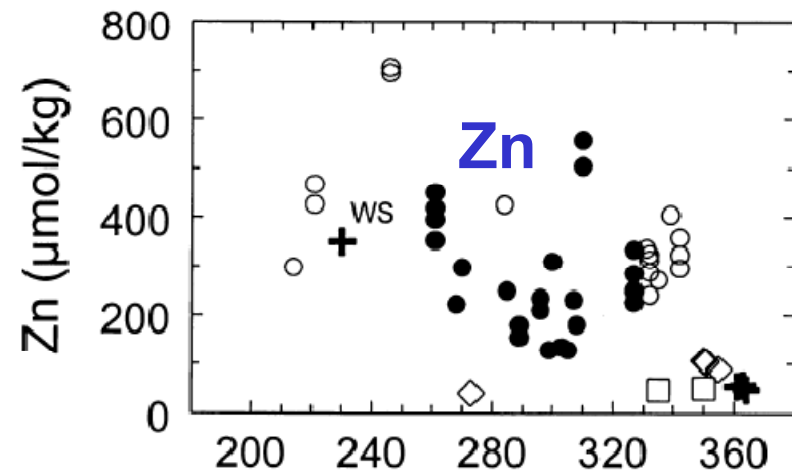
**t° гидротермальных
вод - до 350°C**



FIGURE 1. Schematic diagram of the modern TAG sulphide deposit on the Mid-Atlantic Ridge. This represents a classic cross-section of a VMS deposit, with concordant semi-massive to massive sulphide lens underlain by a discordant stockwork vein system and associated alteration halo, or “pipe”. From Hannington et al. (1998).



(a)



При $t^{\circ} < 300^{\circ}\text{C}$
Zn доминирует в гидротермальной
 жидкости, поскольку соли **Zn** и **Mn**
 осаждаются медленнее солей других
 переходных металлов

Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol. 64, No. 13, pp. 2267–2279, 2000
 Copyright © 2000 Elsevier Science Ltd
 Printed in the USA. All rights reserved
 0016-7037/00 \$20.00 + .00

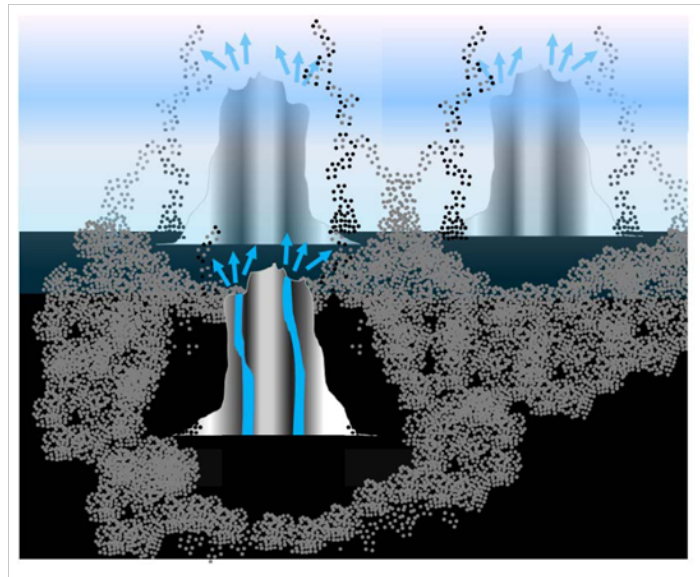
PII S0016-7037(00)00354-9

Chemical and mineralogical influences on concentrations of trace metals in
 hydrothermal fluids

SIMONE METZ and JOHN H. TREFRY*

ZnS и **MnS** могут восстанавливать CO₂ на **УФ**-свету

Вариант 1:
богатые **ZnS** и **MnS**
отложения вокруг
горячих источников на
морском мелководье?



**Цинковый
мир?**

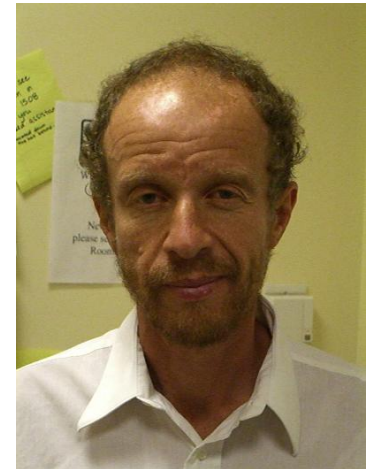
Вариант 2:
богатые **ZnS** и **MnS**
пруды и лужи вокруг
континентальных
геотермальных систем?

Origin of first cells at terrestrial, anoxic geothermal fields

Armen Y. Mulkidjanian^{a,b,1}, Andrew Yu. Bychkov^c, Daria V. Dibrova^{a,d}, Michael Y. Galperin^e, and Eugene V. Koonin^{e,1}

^aSchool of Physics, University of Osnabrück, D-49069 Osnabrück, Germany; ^bA. N. Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology and Schools of ^cGeology and ^dBioengineering and Bioinformatics, Moscow State University, Moscow 119992, Russia; and ^eNational Center for Biotechnology Information, National Library of Medicine, National Institutes of Health, Bethesda, MD 20894

Edited* by Norman H. Sleep, Stanford University, Stanford, CA, and approved January 17, 2012 (received for review October 28, 2011)



Ионный состав цитоплазмы очень сильно отличается от химии природных водоемов.

Во всех клетках **калия** больше, чем **натрия**

Насколько древнее это свойство?

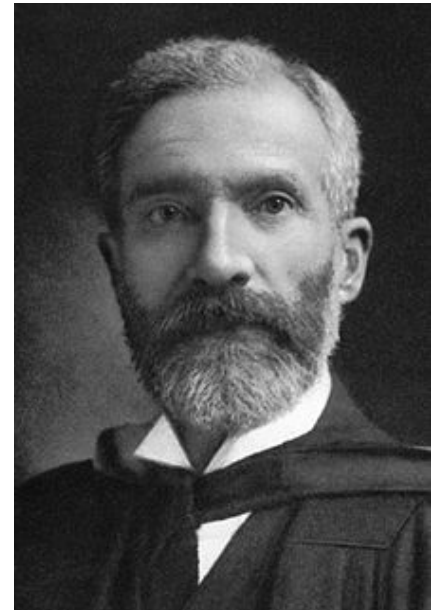
	Морская вода	вода древнего океана	цитоплазма
Na ⁺	0.4	>0.4	0.01
K ⁺	0.01	~0.01	0.1
Ca ²⁺	0.01	~0.01	0.001
Mg ²⁺	0.05	~0.01	0.01
Fe	10 ⁻⁸ (mostly Fe ³⁺)	10 ⁻⁵	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Mn ²⁺	10 ⁻⁸	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁸	10 ⁻⁶
Zn ²⁺	10 ⁻⁹	<10 ⁻¹²	10 ⁻³ to 10 ⁻⁴
Cu	10 ⁻⁹ (Cu ²⁺)	<10 ⁻²⁰ (Cu ¹⁺)	10 ⁻⁵
Cl ⁻	0.5	>0.1	0.1
PO ₄ ³⁻	10 ⁻⁶ to 10 ⁻⁹	<10 ⁻⁵	~10 ⁻² (mostly bound)

Mulkidjanian et al., 2012, *PNAS*

“...the very earliest organisms must have been of the micellar or ultramicroscopic kind... These had as yet no nuclei and an enclosing membrane could have been only of the most elementary character.

From the first there must have been an adjustment in the composition of very simple organisms to that of their medium,.... which diffusing into each minute multi-micellar mass brought into it the inorganic elements in the proportions in which they obtained in the external medium.”

Archibald Byron Macallum, 1926



Ионы щелочных металлов в белках LUCA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Translation and ribosomal biogenesis						
Ribosomal proteins (33)	-	-	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺ , Na ⁺	-	Mg ²⁺ , Cd ²⁺ , Zn ²⁺
Conserved translational factors (EF-G, EF-Tu, IF-1, IF-2, eIF5-a)	3.6.5.3	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , NH ₄ ⁺ , ↓Na ⁺	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Most tRNA synthetases (6)	6.1.1.-	PP _i	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Pseudouridylate synthase	5.4.99.12	PO ₄ ³⁻	-	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Methionine aminopeptidase	3.4.11.18	-	-	K ⁺ , Na ⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Transcription						
DNA-directed RNA polymerase [α, β, β']	2.7.7.6	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Replication						
Clamp loader ATPase (pol III, subunit γ and τ)	2.7.7.7	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Topoisomerase IA	5.99.1.2	-	K ⁺ > Na ⁺	-	Mg ²⁺	Zn ²⁺ , Hg ²⁺
DNA primase (dnaG)	2.7.7.-	PP _i	-	-	Zn ²⁺	-
Repair and Recombination						
5'-3' exonuclease (including N- terminal domain of PolI)	3.1.11.-	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
RecA/RadA (Rad51) recombinase	-	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺

Ионы щелочных металлов в белках LUSA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Chaperone function						
Chaperonin GroEL	3.6.4.9	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Nucleotide and amino acid metabolism						
Thymidylate kinase	2.7.4.9	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Thioredoxin reductase	1.8.1.9	-	-	-	-	Mg ²⁺
Thioredoxin	-	-	-	-	-	Cd ²⁺ , Zn ²⁺
CDP-diglyceride-synthase	2.7.7.41	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	No entries	Mg ²⁺	No entries
Energy conversion						
Phosphomannomutase	5.4.2.8	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Catalytic subunit of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Proteolipid subunits of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	-	-	-	-	-
Coenzymes						
Glycine hydroxymethyltransferase	2.1.2.1	-	↓MC ⁺	-	↓Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺	-

Ионы щелочных металлов в белках LUCA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Protein Secretion						
Preprotein translocase subunit SecY	-	-	-	-	-	Zn ²⁺
Signal recognition particle GTPase FtsY	3.6.5.4	PO ₄ ³⁻	-	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Miscellaneous						
Predicted GTPase (YchF, PF06071, 1JAL, 2OHF, 2DBY, 2DWQ, 1NI3)	-	PO ₄ ³⁻	K ⁺	-	Mg ²⁺	-
S-adenosylmethionine-6-N',N'- adenosyl (rRNA) dimethyltransferase (KsgA)	2.1.1.48	-	-	-	Mg ²⁺	-

Ионы щелочных металлов в белках LUCA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Pro						
Pre						
Sec						
Sign						
GTI						
Mis						
Pre						
PFC						
2DV						
S-a						
ade						
dim						

**Всеобщие и потому древнейшие
клеточные системы, помимо ионов
 Zn^{2+} и Mn^{2+} , нуждаются еще в ионах K^{+} .**

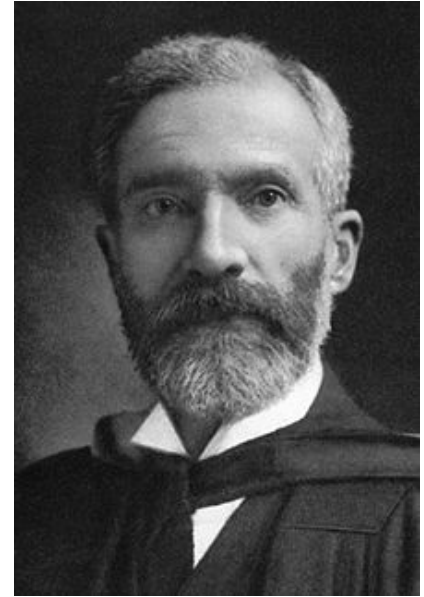
**Ни один из этих ферментов не
зависит от Na^{+} .**

Первые клетки, скорее всего, обитали в среде, содержащей больше **калия, чем **натрия** и богатой переходными металлами и фосфорными соединениями.**

Где на древней Земле могла быть такая среда?

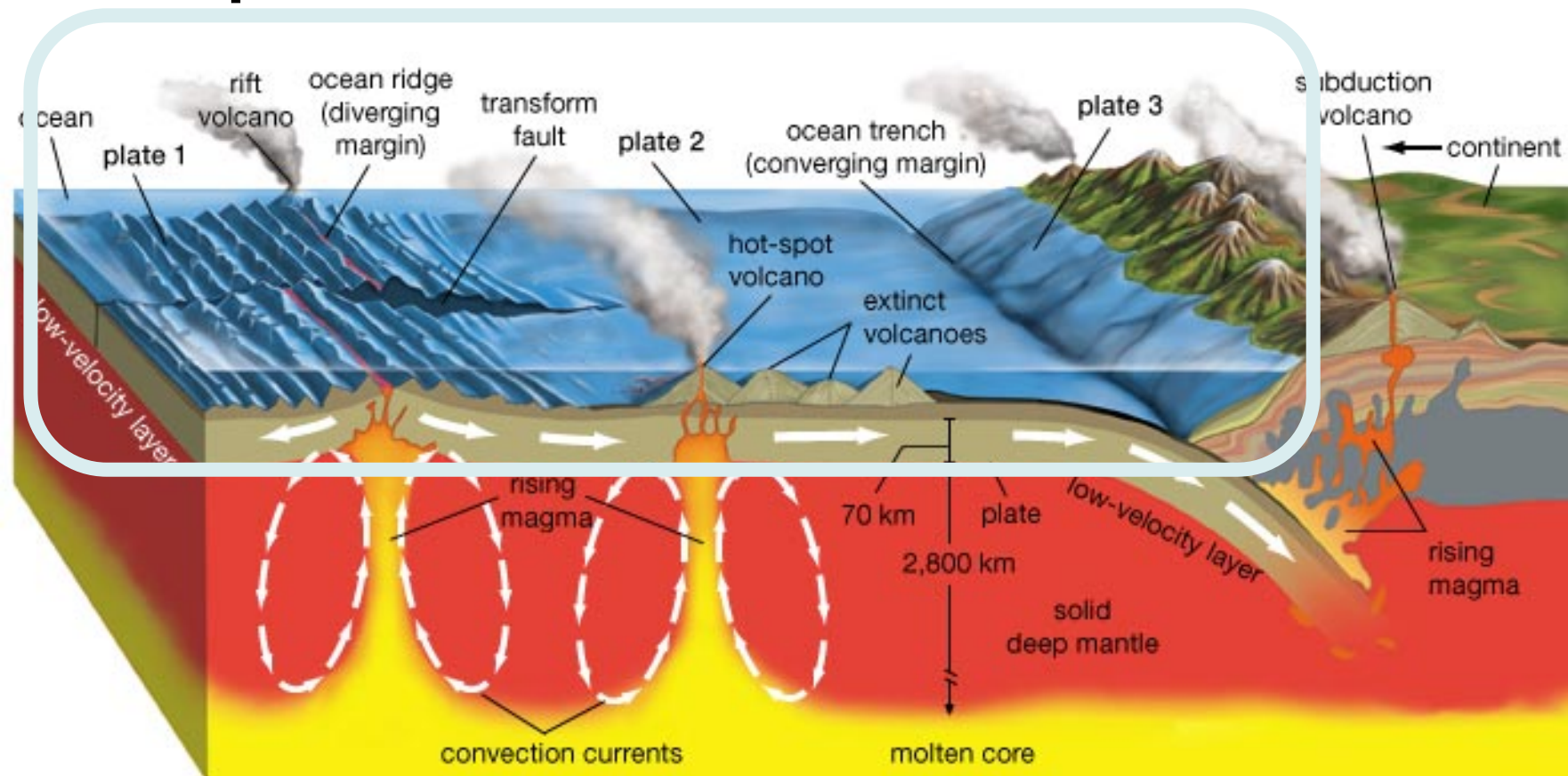
“It is...very probable that in the primal oceans the potassium present was in excess of the sodium...”

Archibald Byron Macallum, 1926



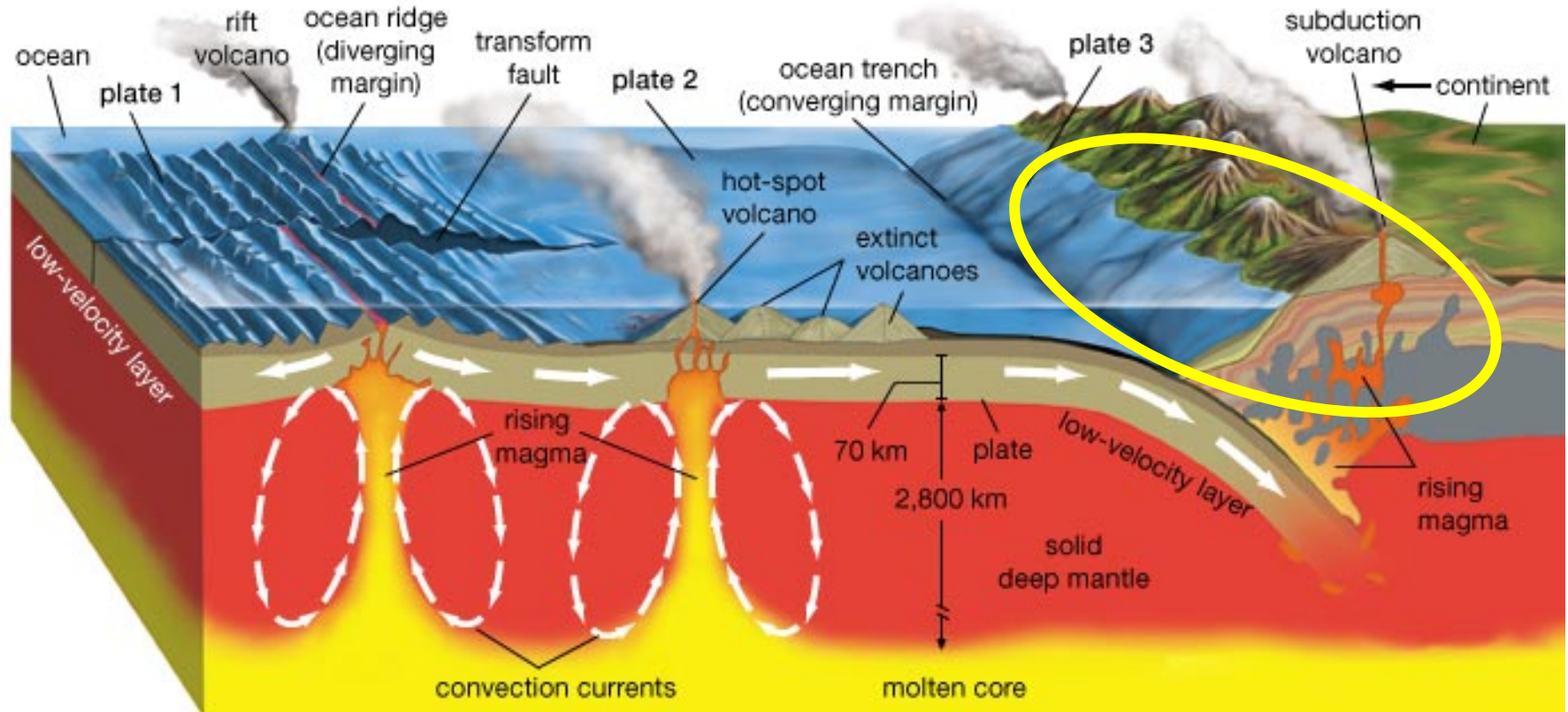
**В древнем океане было
больше калия, чем натрия??**

Ни в каких древних морских
или океанских системах
калия не могло быть больше чем **натрия**.
Первые клетки не могли развиваться в
морской воде.

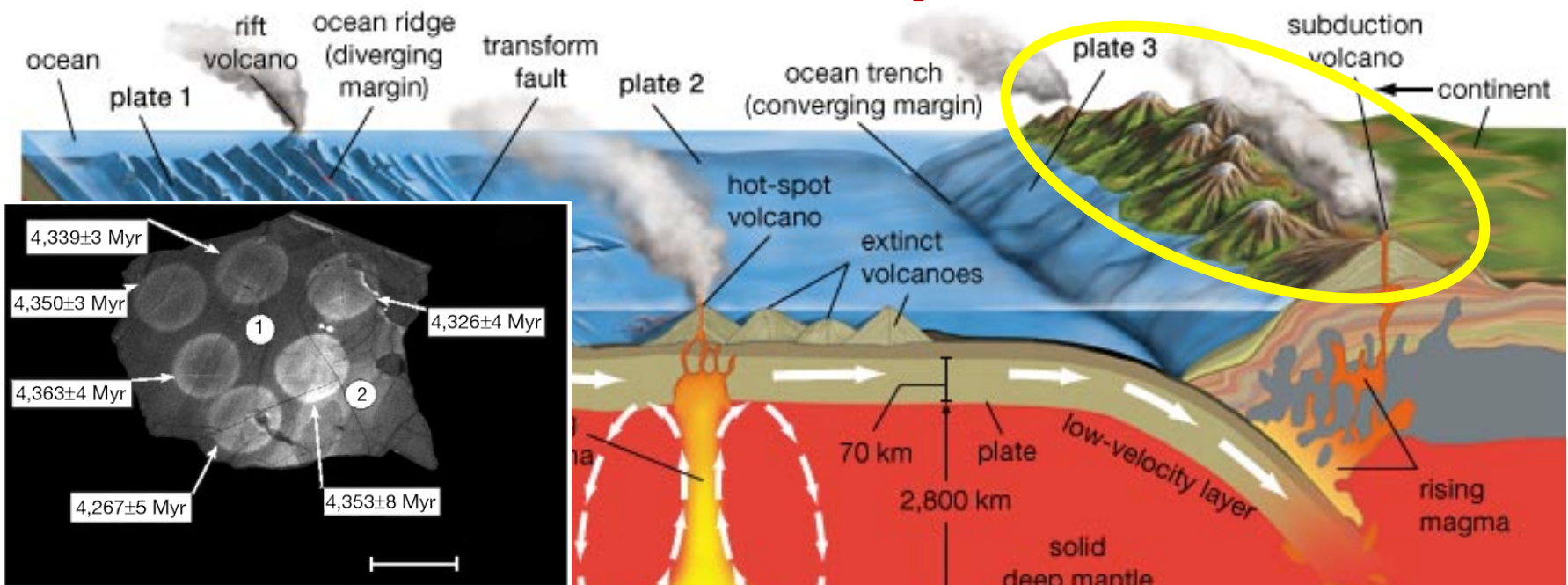


Источник рисунка: www.nasa.gov

Остаются континентальные геотермальные системы, где можно использовать и **энергию солнечного света, и **геотермальную энергию**.**



Континентальные геотермальные системы?

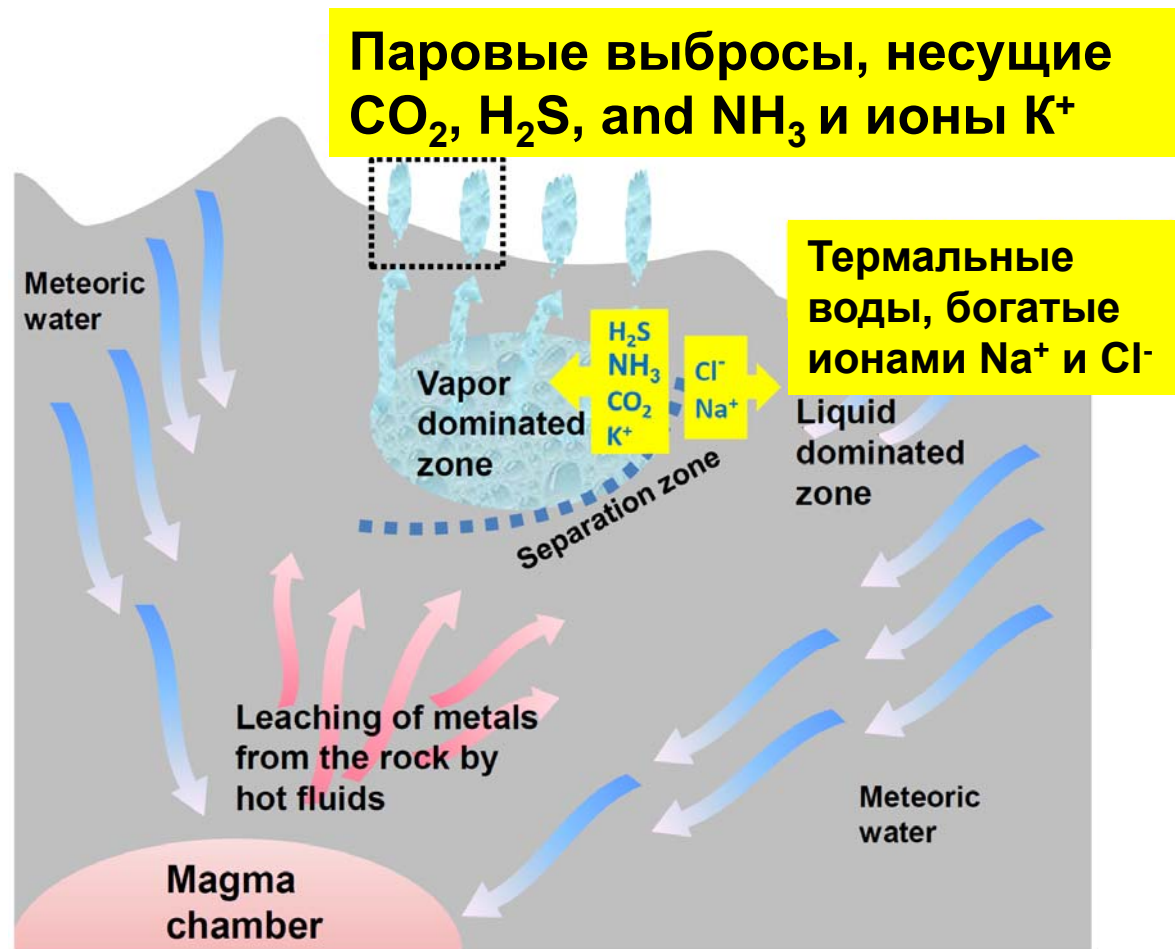


Старейшие геологические фоссилии, циркониевые гранулы возрастом 4.4-4.1 Ga, образовывались в континентальных гранитных расплавах, в условиях, напоминавших современные зоны субдукции

Из: Wilde et al. Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago (2001) *Nature*

На суше **геотермальная жидкость**, поднимаясь, начинает кипеть и **разделяется на две фазы - жидкую и газообразную, паровую**.
У них разный химический состав.

Паровая фаза
обогащена
летучими
веществами,
такими как CO_2 ,
 H_2S , and NH_3 .



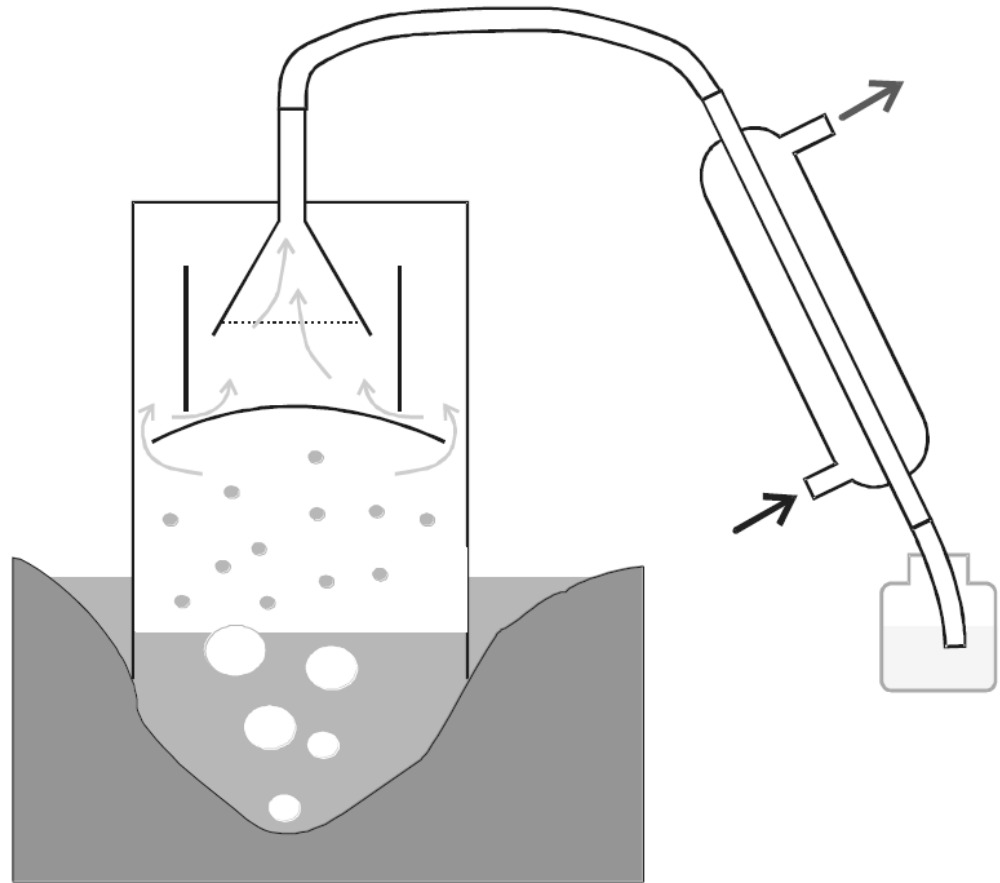
Фумаролы и кипящие грязевые котлы образуют геотермальные поля



Мутновское геотермальное поле, Камчатка,
(фотографии д.б.н. Анны С. Карягиной)



**Андрей
Бычков,
геол. ф-т
МГУ**



**Для термальных источников
можно порознь определить
химический состав жидкости и пара**

Table 2. Concentration of some essential elements in the water of thermal springs and in the condensate of the same springs

Element	Spring Number					
	S6-14	S6-15	S6-16	S6-17	S6-18	S6-19
Water composition, parts per billion						
t, °C	94.00	93.00	89.00	93.00	96.00	96.00
pH	0.50	-0.28	0.25	-0.58	-0.09	-0.30
B	95,109	54,142	35,927	72,639	83,813	133,910
Ca	279,893	121,911	455,703	213,657	334,430	168,640
Fe	384,075	174,308	245,163	258,688	446,416	250,982
K	89,606	138,879	22,881	882,720	86,835	155,190
Mg	168,491	68,883	118,968	78,648	202,059	98,071
Mn	7,355	2,909	3,358	3,942	9,424	4,325
Na	128,609	100,599	79,224	479,027	143,699	121,597
Ni	140	89	82	96	593	67

**Сотношение
K⁺/Na⁺ в
геотермальной
жидкости :
до 1.4**

В паровой фазе ионы K⁺ более летучи, чем ионы Na⁺

Ca	566.7	219.2	424.4	30.0	90.0	288.9
Fe	760.4	216.3	798.5	10.7	154.6	99.4
K	15,787.2	45.5	2,317.2	22.6	37.6	8,398.6
Mg	141.0	48.7	138.9	2.5	15.5	24.5
Mn	9.0	2.3	7.0	0.1	1.9	2.3
Na	5,427.1	127.8	797.6	14.9	50.7	3,082.5
Ni	16.2	0.4	9.2	0.2	1.3	0.7
P	18.0	5.2	11.8	2.0	6.6	4.3
Ti	18.7	16.6	8.3	0.5	2.6	4.1
Zn	19.0	3.4	12.8	6.0	6.9	10.8

**Сотношение
K⁺/Na⁺ в паре:
до 2.9**

For Mutnovsky volcano, Kamchatka peninsula, see *Methods* and refs. 62, 95.

Богатый ионами K^+ паровой конденсат также содержит много фосфата, аммиака, сероводорода и углеводородов.

Table 2. Concentration of some essential elements in the water of thermal springs and in the condensate of the same springs

Element	Spring Number					
	S6-14	S6-15	S6-16	S6-17	S6-18	S6-19
Water composition, parts per billion						
t, °C	94.00	93.00	89.00	93.00	96.00	96.00
pH	0.50	-0.28	0.25	-0.58	-0.09	-0.30
B	95,109	54,142	35,927	72,639	83,813	133,910
Ca	279,893	121,911	455,703	213,657	334,430	168,640
Fe	384,075	174,308	245,163	258,688	446,416	250,982
K	89,606	138,879	22,881	882,720	86,835	155,190
Mg	168,491	68,883	118,968	78,648	202,059	98,071
Mn	7,355	2,909	3,358	3,942	9,424	4,325
Na	128,609	100,599	79,224	479,027	143,699	121,597
Ni	140	89	82	96	593	67
P	7,399	8,615	6,434	33,689	7,568	9,163
Ti	9,170	2,345	2,300	3,106	8,533	7,874

На современных геотермальных полях выбрасываемый сероводород окисляется кислородом воздуха до концентрированной серной кислоты.

Table 2. Concentration of some essential elements in the water of thermal springs and in the condensate of the same springs

Element	Spring Number					
	S6-14	S6-15	S6-16	S6-17	S6-18	S6-19
Water composition, parts per billion						
t. °C	94.00	93.00	89.00	93.00	96.00	96.00
pH	0.50	−0.28	0.25	−0.58	−0.09	−0.30
B	95,109	54,142	35,927	72,639	83,813	133,910
Ca	279,893	121,911	455,703	213,657	334,430	168,640
Fe	384,075	174,308	245,163	258,688	446,416	250,982
K	89,606	138,879	22,881	882,720	86,835	155,190
Mg	168,491	68,883	118,968	78,648	202,059	98,071
Mn	7,355	2,909	3,358	3,942	9,424	4,325
Na	128,609	100,599	79,224	479,027	143,699	121,597
Ni	140	89	82	96	593	67
P	7,399	8,615	6,434	33,689	7,568	9,163
Ti	9,170	2,345	2,300	3,106	8,533	7,874
Zn	657	324	734	471	830	439

На древней Земле кислорода в атмосфере еще не было, поэтому:

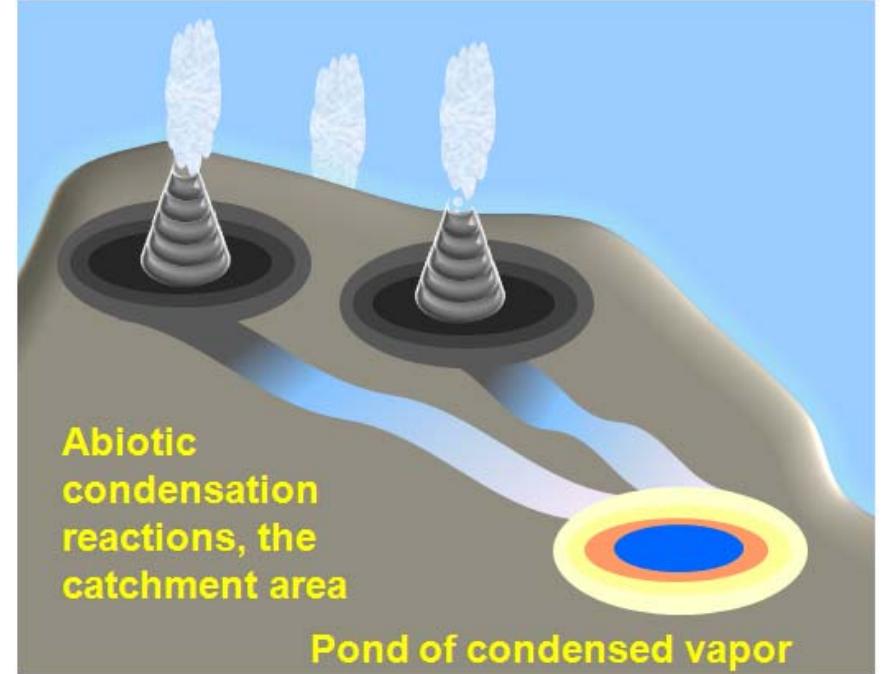
условия на геотермальных полях были близки к нейтральным;

кремниевые частицы не слипались в грязь, а, будучи отрицательно заряженными, образовывали пористые глины или цеолиты;

Ионы переходных металлов выпадали в виде сульфидов металлов, способных (фото)катализировать химические реакции.

Бескислородные геотермальные поля:

Богатый различными веществами пар конденсировался и высыхал на поверхностях минералов, способных катализировать реакции синтеза.



Часть конденсата, охлаждаясь, стекала в водоемы, в которых и могли обитать первые клетки

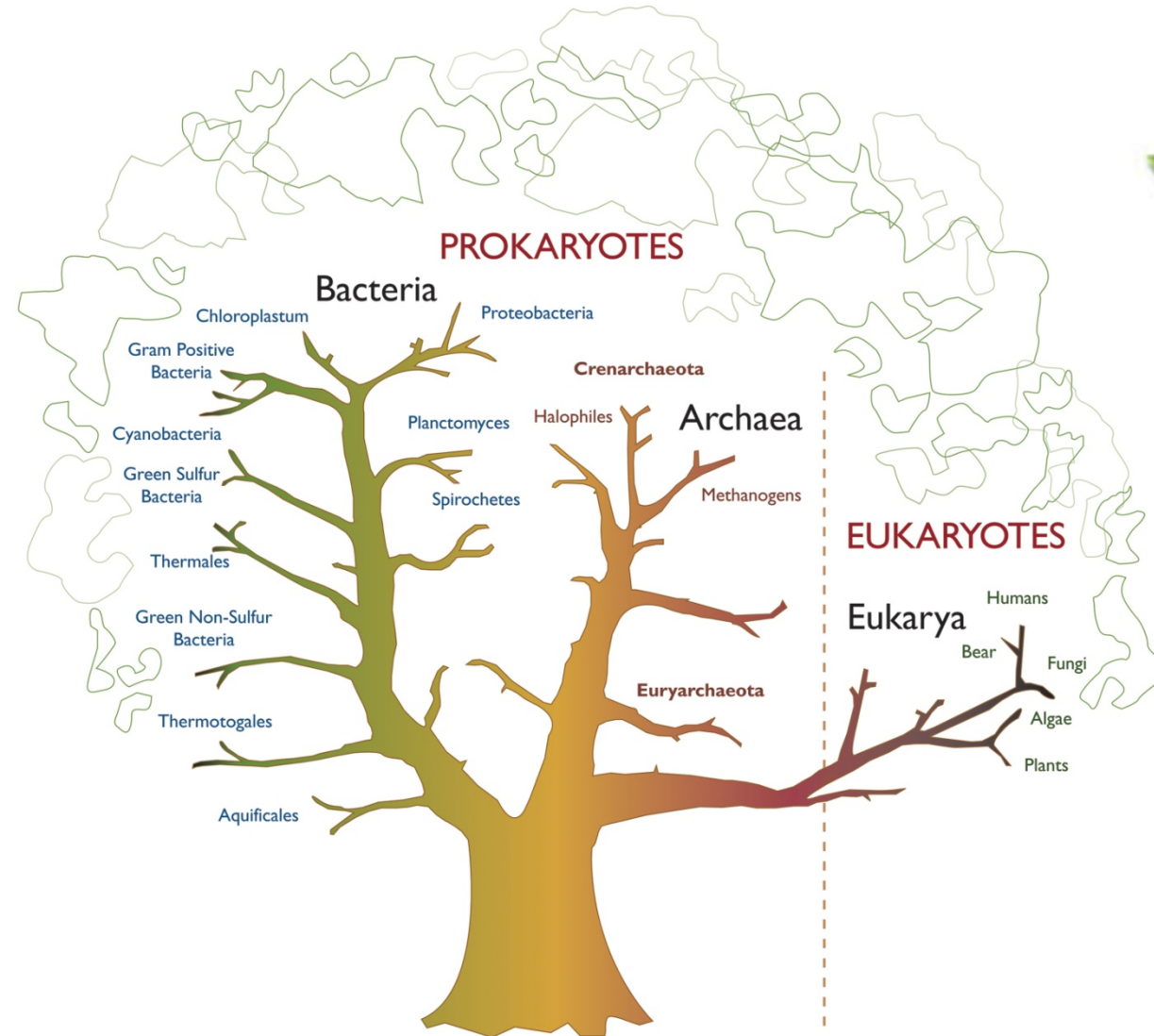
Введение: Принципы построения
биологических полимеров

Top-down: Реконструкция древних
организмов и их среды обитания

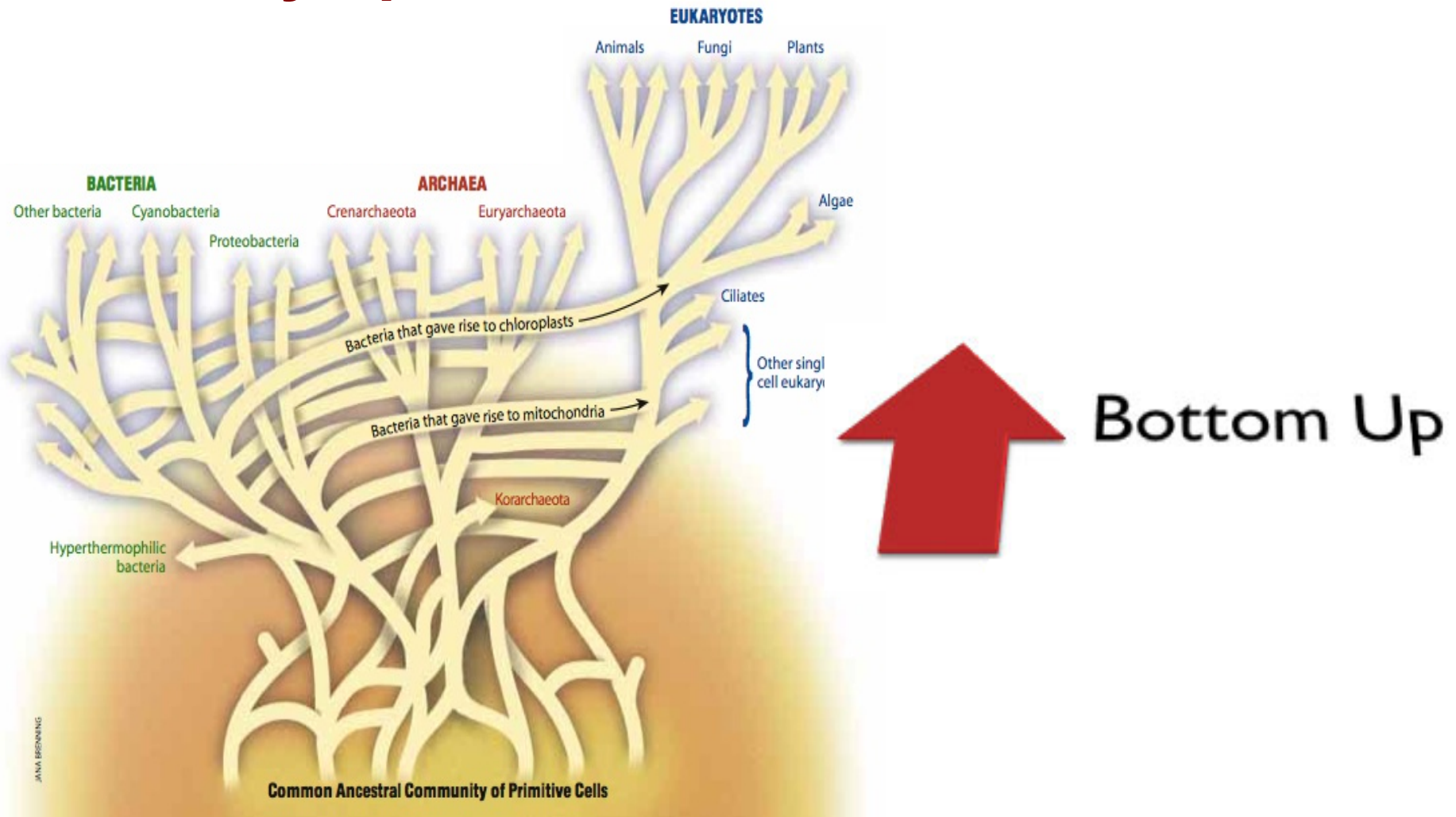
Bottom-up: Обзор новостей по абиогенному
синтезу биополимеров

Заключение: Бескислородные
геотермальные поля и происхождение жизни

Мы провели реконструкцию, спускаясь ВНИЗ по веткам **древа жизни**



Можно ли реконструировать химические реакции, которые могли приводить к синтезу предшественников РНК и белков?



Источник: Doolittle, 2000

1953 год: Стенли Миллер пропустил электрические разряды через смесь газов, имитирующую первичную атмосферу (в основном, водород и метан).

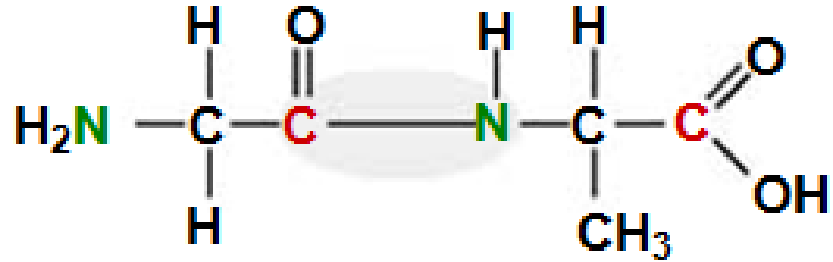
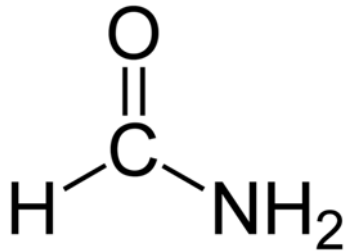
Наблюдалось образование органических соединений вплоть до простейших аминокислот.



С более реалистичной, нейтральной атмосферой образования аминокислот практически не наблюдалось.

Безуспешными были и попытки вести абиогенные синтезы в морской воде, поскольку вода не способствует реакциям полимеризации.

Аллен Шоффсталл попробовал взять вместо воды формамид – «свободноживущую пептидную связь».

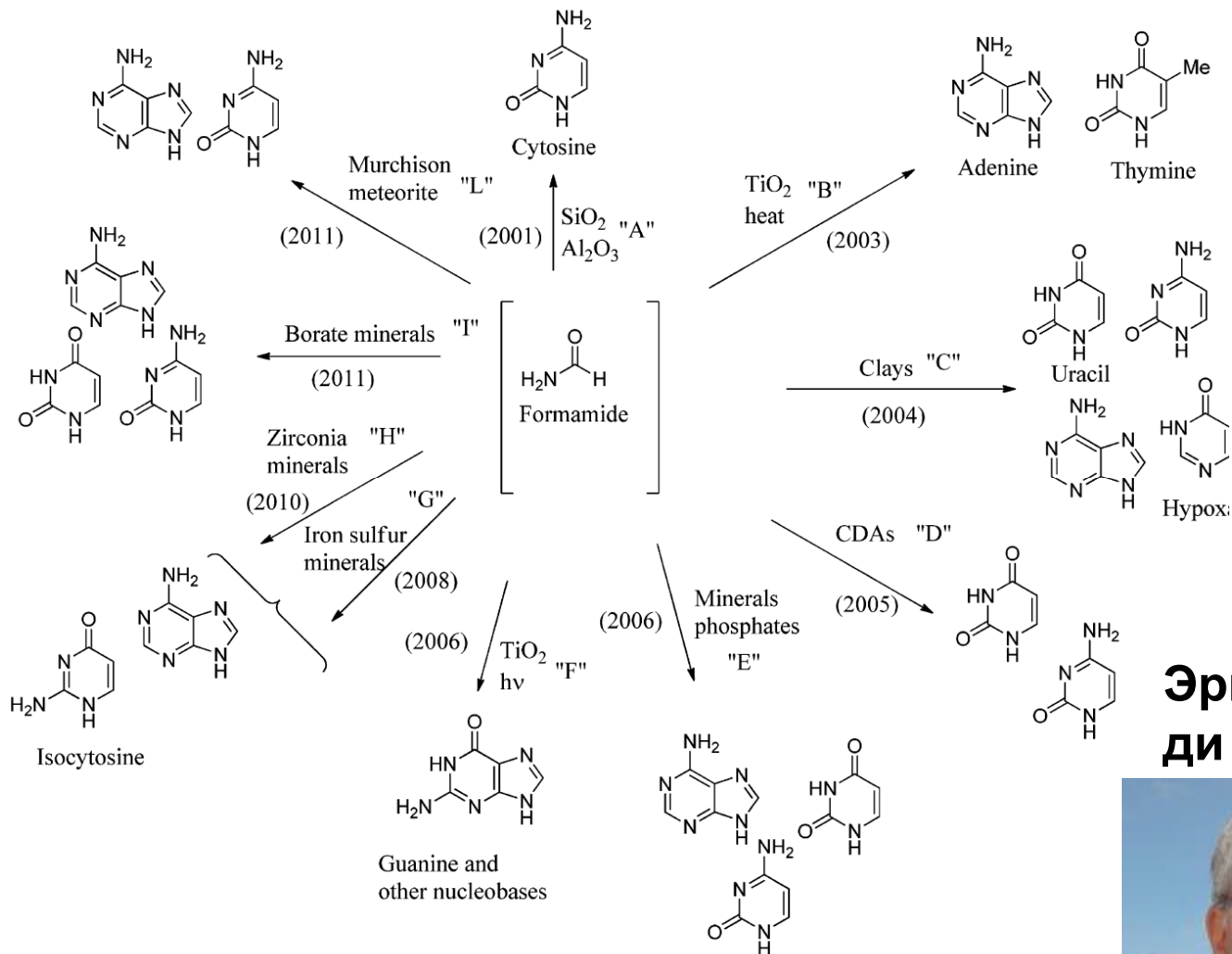


Простое нагревание формамида давало аминокислоты и азотистые основания. В присутствии фосфата спонтанно образовывались фосфопроизводные, для получения которых в воде нужна энергия.

**Ален Шоффсталл,
Университет Колорадо**



Из формамида, нагревая его, можно получить все азотистые основания и аминокислоты



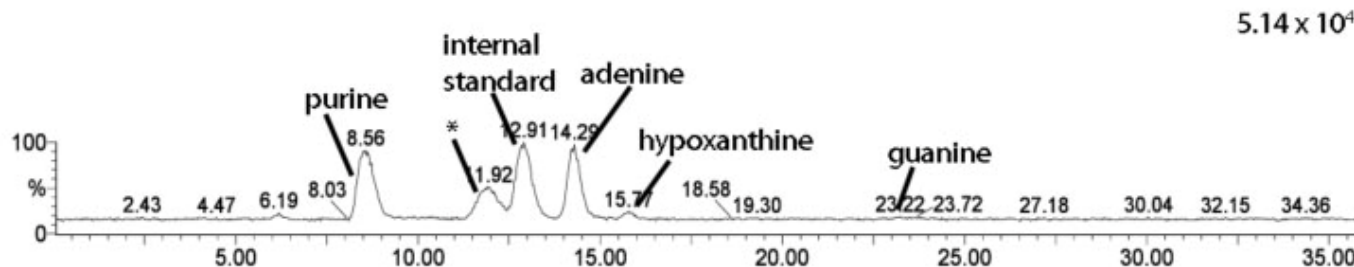
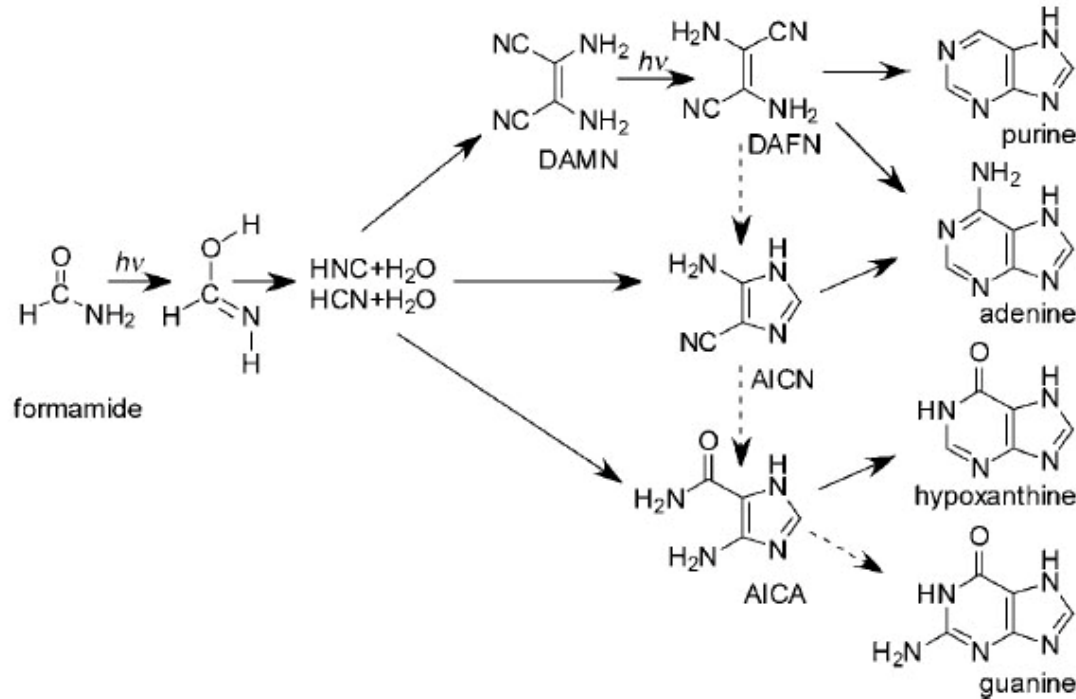
**Рафаэле
Саладино**



**Эрнесто
ди Мауро**



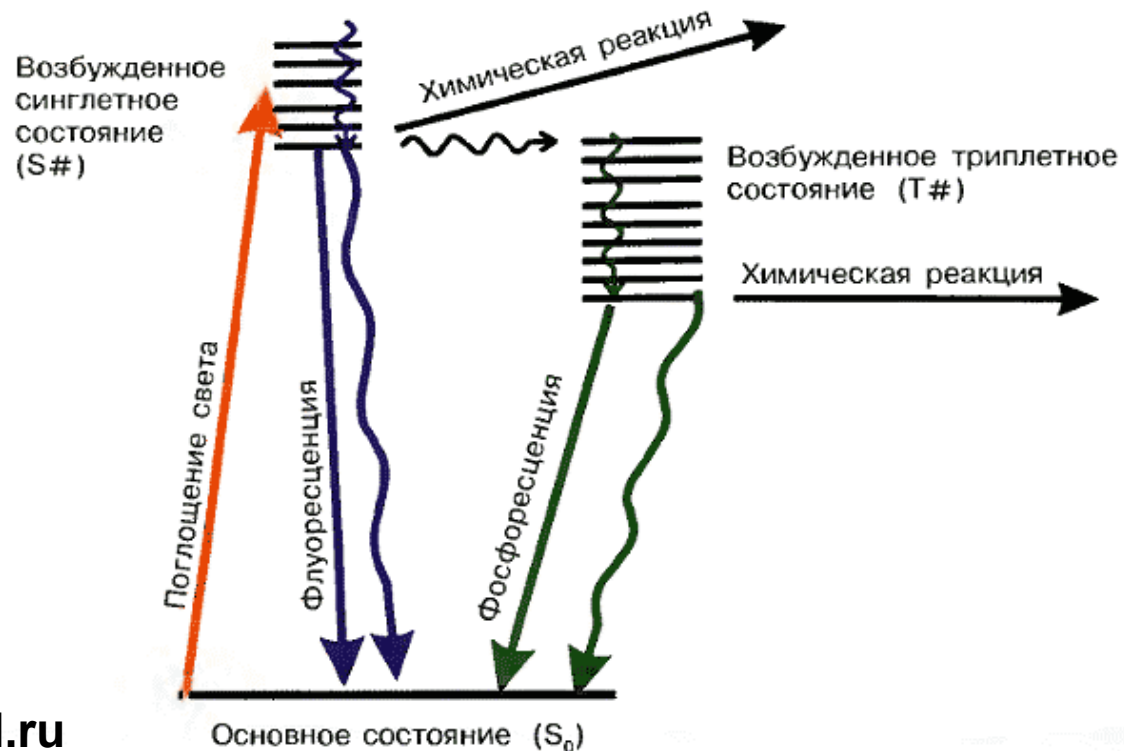
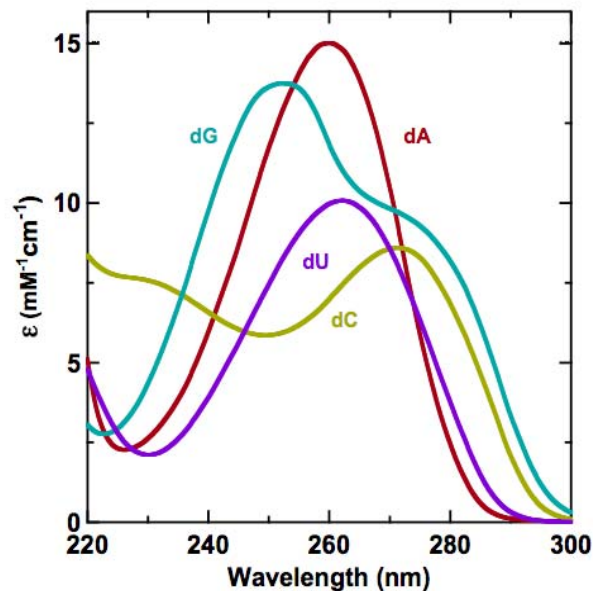
Никлас Худ (Nicolas Hud) и соавторы получили аденин, гипоксантин и гуанин, просто освещая формамид УФ-светом.



Источник: интернет-
страница Р. Бакли

Все нуклеотиды отличаются повышенной фотоустойчивостью в **УФ**.

Время жизни возбужденного состояния нуклеотидов очень коротко, менее 1 пс, а чем короче это время, тем ниже вероятность фото-диссоциации молекулы.



До появления кислорода в атмосфере не было защитного озонового слоя.

В отсутствие озонового слоя ультрафиолетовое облучение поверхности Земли было гораздо интенсивнее, чем сейчас.

Ультрафиолетовый свет мог служить как источником энергии (Скулачев, 1969), так и фактором естественного отбора.

**Весьма маловероятно,
что высокая фотоустойчивость
азотистых оснований случайна.**

**Более вероятно, что эти соединения были
отобраны как наиболее фотоустойчивые
до того, как они начали служить
носителями генетической информации.**

Уникальная фотоустойчивость азотистых оснований могла способствовать образованию РНК-подобных полимеров (2003).

BMC Evolutionary Biology



Research article

Open Access

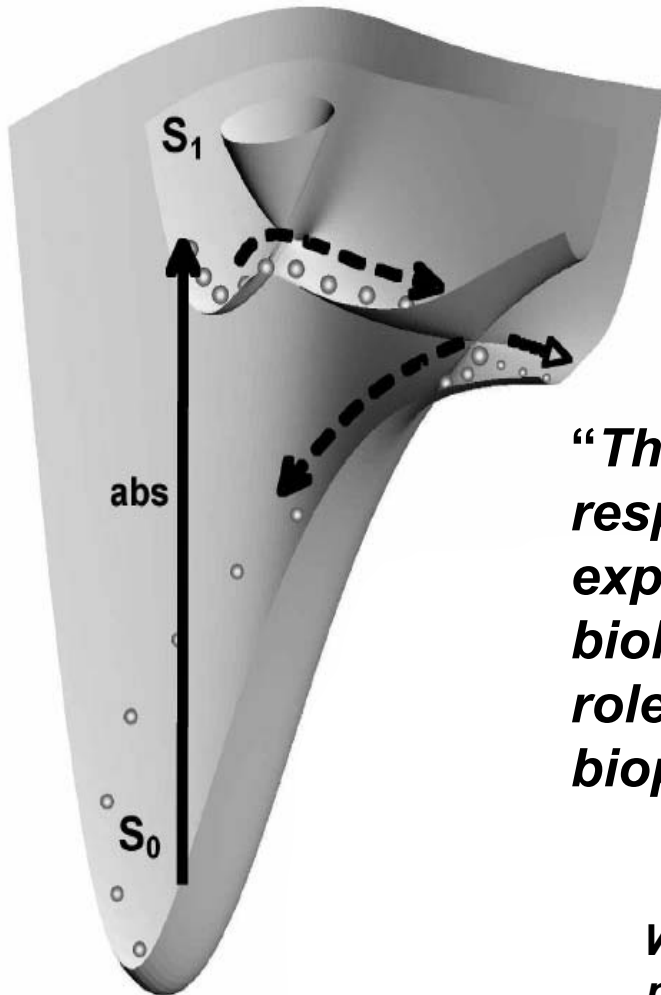
Survival of the fittest before the beginning of life: selection of the first oligonucleotide-like polymers by UV light

Armen Y Mulkidjanian^{*1,2}, Dmitry A Cherepanov^{1,3} and Michael Y Galperin⁴

Address: ¹Division of Biophysics, Department of Biology and Chemistry, Universität Osnabrück, D-49069 Osnabrück, Germany, ²A.N.Belozersky Institute of Physico-Chemical Biology, Moscow State University, Moscow, 119899, Russia, ³Institute of Electrochemistry, Russian Academy of Sciences, Leninskii prosp. 31, 117071 Moscow, Russia and ⁴National Center for Biotechnology Information, National Library of Medicine, National Institutes of Health, Bethesda, MD 20894, USA

Свидетельства в пользу участия фотоселекции в отборе нуклеотидов (полученные после 2003 г.)

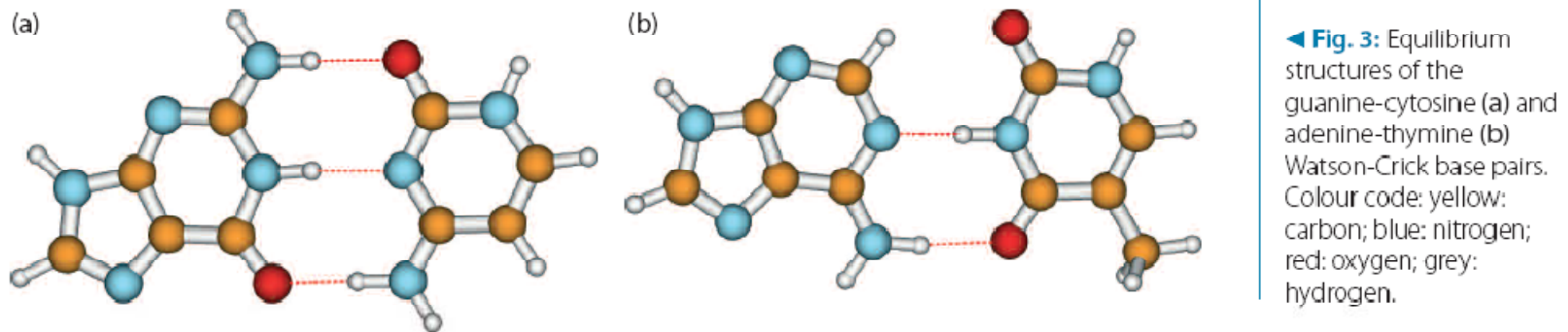
Время жизни возбужденного состояния азотистых оснований оказалось менее 100 fs (1 фемтосекунда – это 10^{-15} секунды)



“The ... bases ... appear to be optimized with respect to photostability. This property can explain the selection ... at the beginning of the biological evolution. They may have played the role of integrated sunscreens in the earliest biopolymers (presumably RNA)”.

Источник: Sobolewski and Domcke, *The chemical physics of the photostability of life*, 2006

Время жизни возбужденного состояния уотсон-криковских пар оснований было оценено как несколько фемтосекунд (Abo-Riziq et al, 2005)



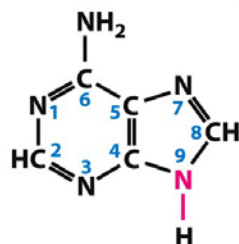
“The biologically relevant Watson-Crick structures of GC and AT are distinguished by uniquely efficient excited-state deactivation mechanisms which maximize their photostability”.

Источник: Sobolewski and Domcke, *The chemical physics of the photostability of life*, 2006

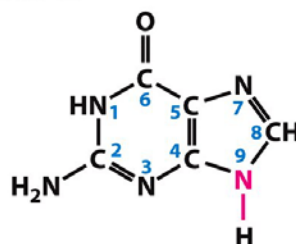
Синтез пиримидиновых нуклеотидов в формаменте по (Powner et al. 2009)

In the presence of phosphate, the raw materials for nucleobases and ribose first form 2-amino-oxazole, a molecule that contains part of a sugar and part of a C or U nucleobase. Further reactions yield a full ribose-base block and then a full nucleotide. The reactions also produce "wrong" combinations of the original molecules, but after exposure to ultraviolet rays, only the "right" versions—the nucleotides—survive.

PURINES

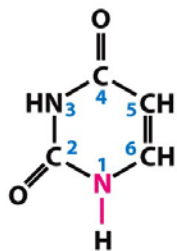


Adenine (A)

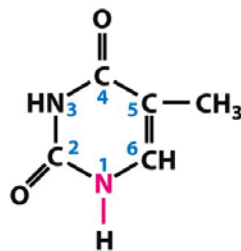


Guanine (G)

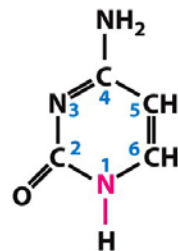
PYRIMIDINES



Uracil (U)



Thymine (T)

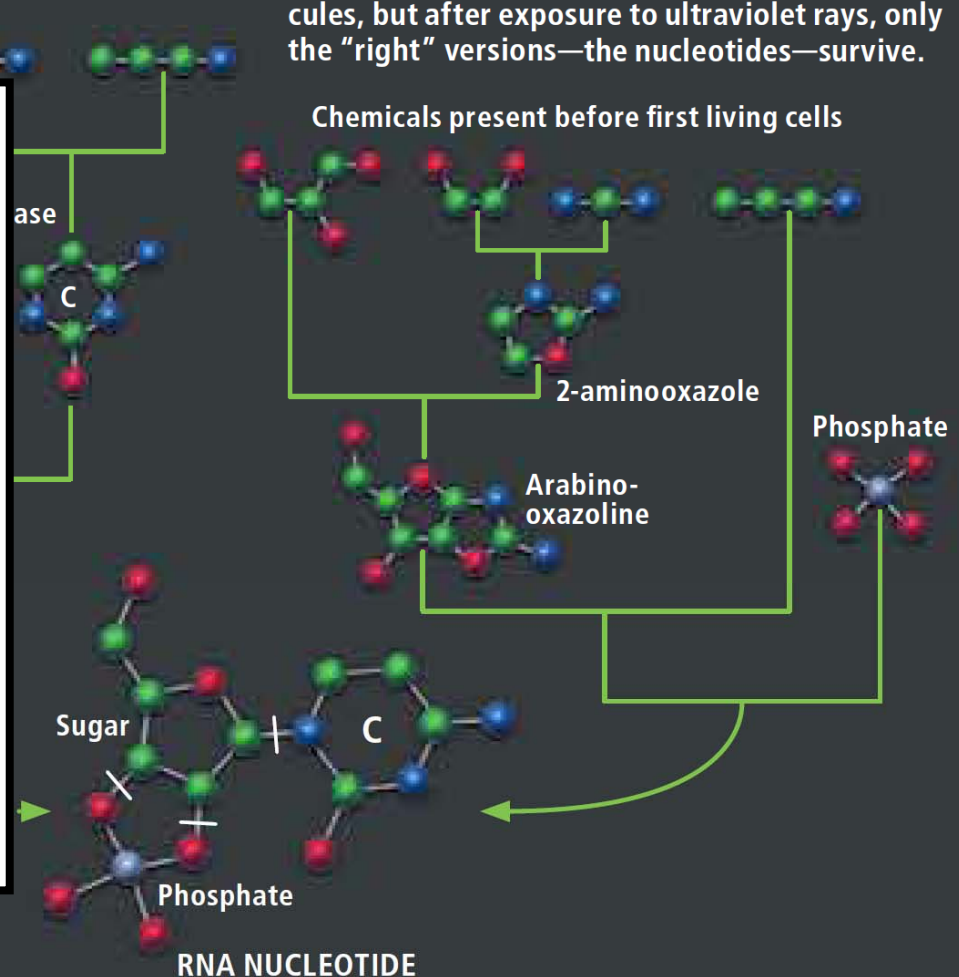


Cytosine (C)

Figure 2-17
Molecular Cell Biology, Sixth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

● Nitrogen
● Phosphorus

Chemicals present before first living cells



Продолжительное освещение смеси различных рибонуклеотидов и рибонуклеозидов УФ-светом приводило к разрушению различных копродуктов, оставляя только пиримидиновые нуклеотиды РНК.

There must be some (photo)protective mechanism that *"provides a means whereby ...the ... activated pyrimidine ribonucleotides needed for RNA synthesis, can be enriched relative to other ... products"* (Powner et al. 2009).

УФ-кванты, очевидно, участвовали в отборе природных азотистых оснований – образование первых РНК-подобных полимеров шло на солнечном свету.

Саладино, ди Мауро и их сотрудники обнаружили термодинамическое «окно»:

**Если формамида более 30%,
полинуклеотиды стабильнее моонуклеотидов,
что означает возможность спонтанного
образования РНК-полимеров**

**Рафаэле
Саладино**



**Эрнесто
ди Мауро**



Откуда могло взяться много формамида на древней Земле?

Температура кипения формамида и других простых амидов – около 200°C.

Поэтому в любой природной системе, где происходило испарение, амиды, если были, должны были накапливаться.

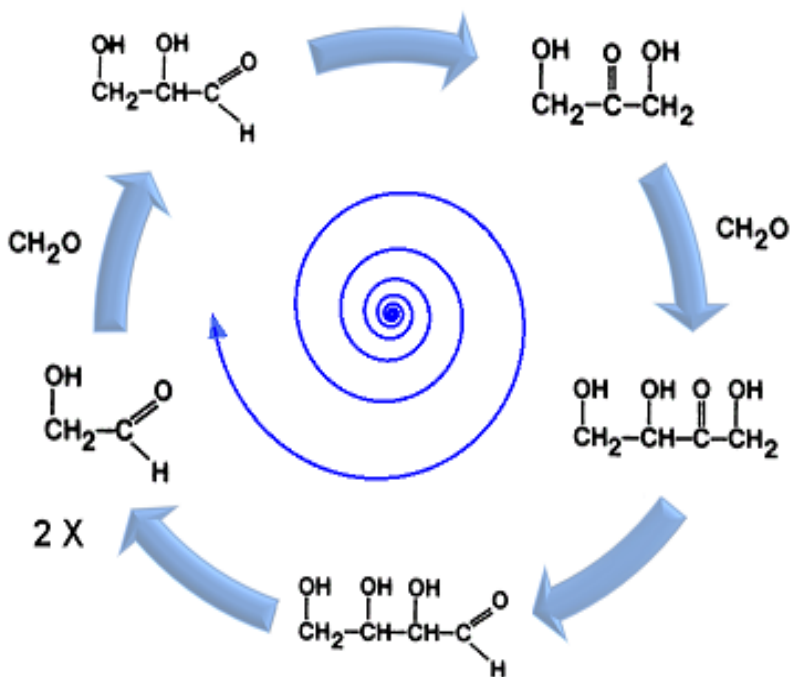
Стивен Беннер (2006): «жизнь возникла в пустыне, где вся вода испарялась, а выпадавший с атмосферными осадками формамид оставался»

Источник фотографии: NASA

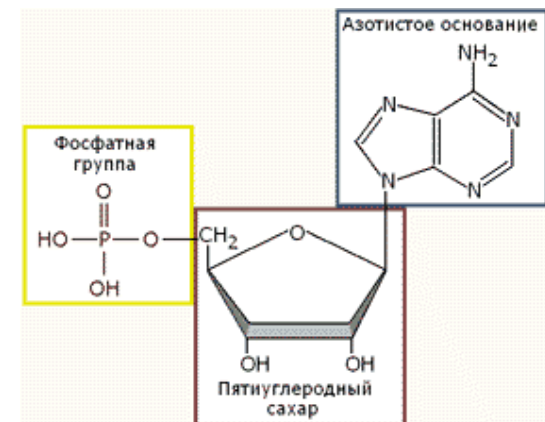


Источник сахаров?

Единственная пока известная автокаталитическая реакция – это открытое Бутлеровым в 1861 году образование смеси C4-C6 сахаров из формальдегида в присутствии ионов металлов, эта реакция ускоряется УФ-светом (В. Пармон, 2010).



Источник: Wikipedia



рибоза



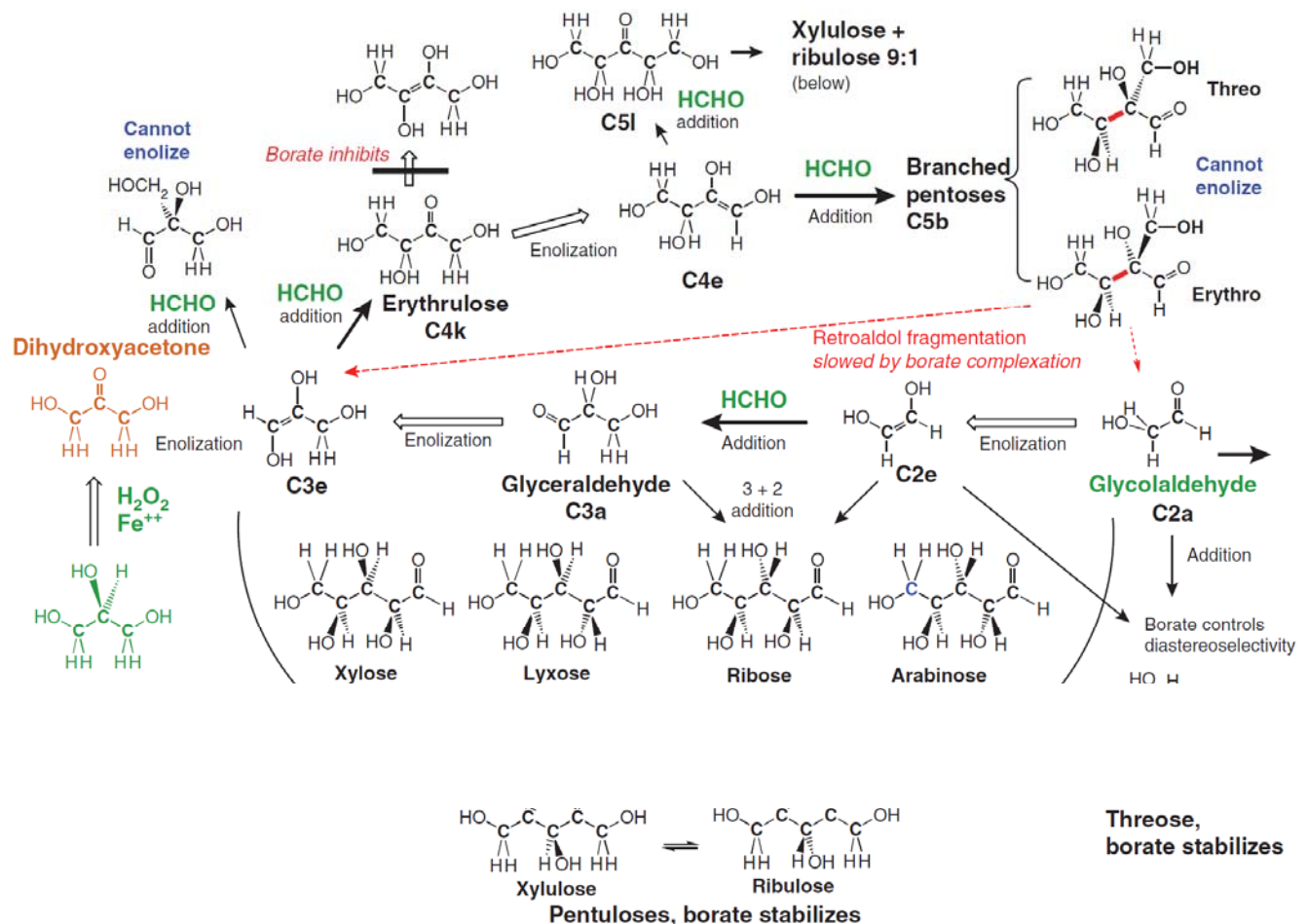
Александр
Михайлович
Бутлеров

Можно одновременно стабилизировать рибозу и предотвратить «карамелизацию» сахаров, добавив много борной кислоты (С. Беннер, 2010)

**Много борной кислоты
в древних пустынях – это вряд ли...**



**Стивен
Беннер**



Геотермальный конденсат содержит до 10 мМ борной кислоты, которая избирательно накапливается в паровой фазе.

Table 2. Concentration of some essential elements in the water of thermal springs and in the condensate of the same springs

Element	Spring Number					
	S6-14	S6-15	S6-16	S6-17	S6-18	S6-19
Water composition, parts per billion						
t, °C	94.00	93.00	89.00	93.00	96.00	96.00
pH	0.50	-0.28	0.25	-0.58	-0.09	-0.30
B	95,109	54,142	35,927	72,639	83,813	133,910
Ca	279,893	121,911	455,703	213,657	334,430	168,640
Fe	384,075	174,308	245,163	258,688	446,416	250,982
K	89,606	138,879	22,881	882,720	86,835	155,190
Mg	168,491	68,883	118,968	78,648	202,059	98,071
Mn	7,355	2,909	3,358	3,942	9,424	4,325
Na	128,609	100,599	79,224	479,027	143,699	121,597
Ni	140	89	82	96	593	67
P	7,399	8,615	6,434	33,689	7,568	9,163
Ti	9,170	2,345	2,300	3,106	8,533	7,874



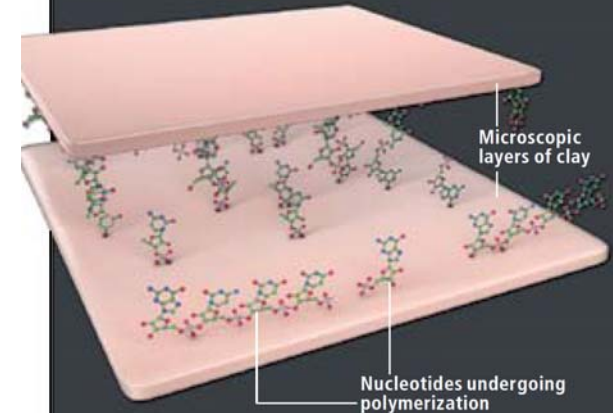
Андрей
Бычков,
геол. ф-т
МГУ

Реконструированная химиками среда образования первых биомолекул соответствует условиям бескислородных геотермальных полей.

Испарение геотермального конденсата должно было сопровождаться **образованием простых амидов и накоплением бората, фосфата и органических соединений на (фото)каталитических поверхностях минералов.**

ON THE WAY TO LIFE

After chemical reactions created the first genetic building blocks and other organic molecules, geophysical processes brought them to new environments and concentrated them. The chemicals assembled into more complex molecules and then into primitive cells. And some 3.7 billion years ago geophysics may have also nudged these "protocells" to reproduce.



RNA BREEDING GROUNDS

In the water solutions in which they formed, nucleotides would have had little chance of combining into long strands able to store genetic information. But under the right conditions—for example, if molecular adhesion forces brought them close together between microscopic layers of clay (above)—nucleotides might link up into single strands similar to modern RNA.

Введение: Принципы построения
биологических полимеров

Top-down: Реконструкция древних
организмов и их среды обитания

Bottom-up: Обзор новостей по абиогенному
синтезу биополимеров

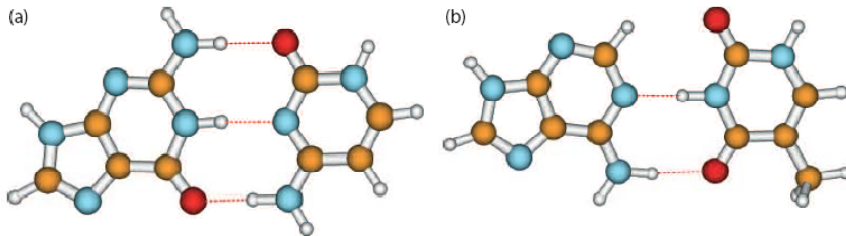
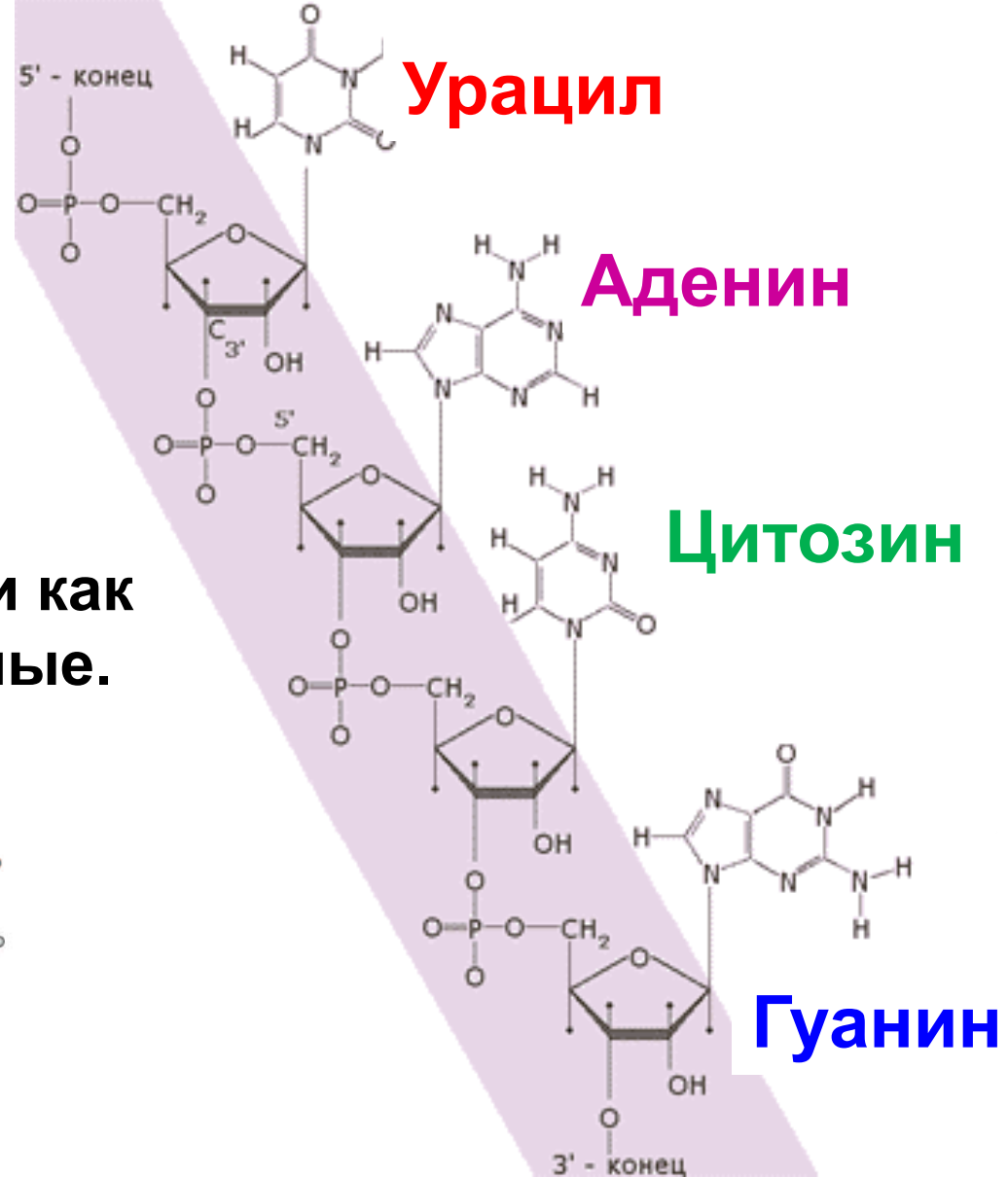
Заключение: Бескислородные
геотермальные поля и происхождение жизни



Сценарий возникновения жизни в освещенной, богатой амидами среде бескислородных геотермальных полей дает физико-химическое обоснование миру РНК.

Аденин, гуанин, урацил и цитозин могли быть выбраны за их фотоустойчивость.

Уотсон-криковские взаимодействия могли закрепиться в эволюции как наиболее фотостабильные.



Источники рисунков: Sobolewski and Domcke, *The chemical physics of the photostability of life*, 2006 и www.mathcell.ru

Паровая фаза специфически обогащена цинком

Spring Number

Element	S6-14	S6-15	S6-16	S6-17	S6-18	S6-19
Water composition, parts per billion						
t, °C	94.00	93.00	89.00	93.00	96.00	96.00
pH	0.50	-0.28	0.25	-0.58	-0.09	-0.30
B	95,109	54,142	35,927	72,639	83,813	133,910
Ca	279,893	121,911	455,703	213,657	334,430	168,640
Fe	384,075	174,308	245,163	258,688	446,416	250,982
K	89,606	138,879				
Mg	168,491	68,883				
Mn	7,355	2,909				
Na	128,609	100,599				
Ni	140	89				
P	7,399	8,615				
Ti	9,170	2,345	2,300	3,106	8,533	7,874
Zn	657	324	734	471	830	439
Condensate composition, parts per billion						
pH	2.29	2.19	2.54	2.03	1.05	2.03
B	2,635.0	84.4	1,092.3	184.6	214.6	4,295.5
Ca	566.7	219.2	424.4	30.0	90.0	288.9
Fe	760.4	216.3	798.5	10.7	154.6	99.4
K	15,787.2	45.5	2,317.2	22.6	37.6	8,398.6
Mg	141.0	48.7				
Mn	9.0	2.3				
Na	5,427.1	127.8				
Ni	16.2	0.4				
P	18.0	5.2	11.8	2.0	6.6	4.3
Ti	18.7	16.6	8.3	0.5	2.6	4.1
Zn	19.0	3.4	12.8	6.0	6.9	10.8

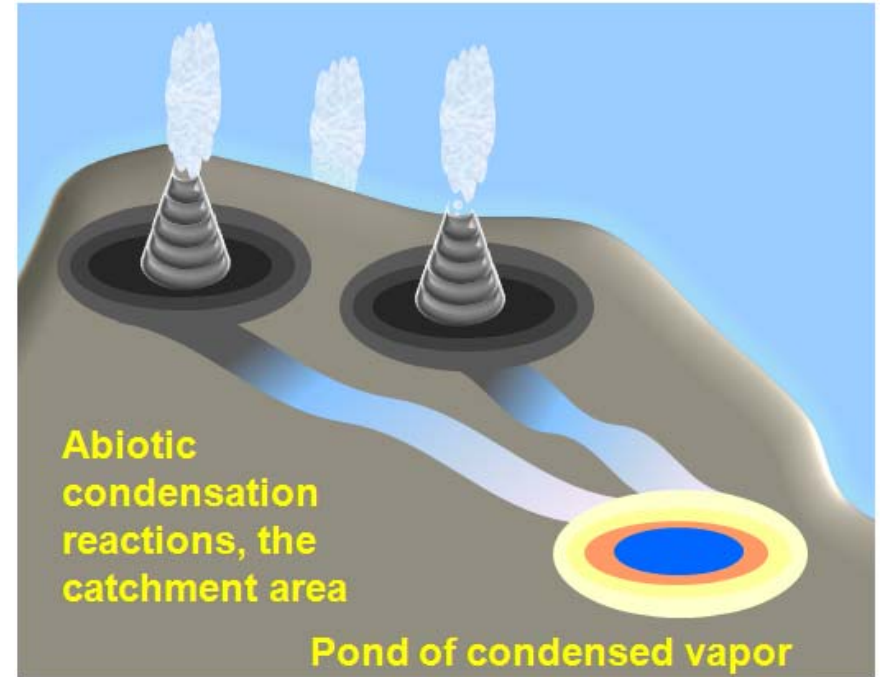
Сотношение **Fe/Zn**
в геотермальной жидкости :
около 500

Сотношение в паровой фазе:
1,7 < Fe/Zn < 40

For Mutnovsky volcano, Kamchatka peninsula, see *Methods* and refs. 62, 95.

Бескислородные геотермальные поля:

Поскольку **FeS** преципитирует быстрее, чем **ZnS** и **MnS**, сульфиды **цинка** и **марганца** должны были накапливаться на «прохладной» периферии геотермальных полей



Энергетика ранней жизни:

Первые организмы, скорее всего, были гетеротрофами, потребляющими абиогенно синтезированные органические молекулы.

Органические соединения могли образовываться как при абиогенном фотосинтезе, так и в результате реакций гидротермального изменения в толще горячих скал.

Фосфорные соединения и ионы Mg^{2+} в белках LUSA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Translation and ribosomal biogenesis						
Ribosomal proteins (33)	-	-	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺ , Na ⁺	-	Mg ²⁺ , Cd ²⁺ , Zn ²⁺
Conserved translational factors (EF-G, EF-Tu, IF-1, IF-2, eIF5-a)	3.6.5.3	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , NH ₄ ⁺ , ↓Na ⁺	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Most tRNA synthetases (6)	6.1.1.-	PP _i	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Pseudouridylate synthase	5.4.99.12	PO ₄ ³⁻	-	K ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Methionine aminopeptidase	3.4.11.18	-	-	K ⁺ , Na ⁺	Fe ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Transcription						
DNA-directed RNA polymerase [α, β, β']	2.7.7.6	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺	Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Zn ²⁺
Replication						
Clamp loader ATPase (pol III, subunit γ and τ)	2.7.7.7	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Topoisomerase IA	5.99.1.2	-	K ⁺ > Na ⁺	-	Mg ²⁺	Zn ²⁺ , Hg ²⁺
DNA primase (dnaG)	2.7.7.-	PP _i	-	-	Zn ²⁺	-
Repair and Recombination						
5'-3' exonuclease (including N- terminal domain of PolI)	3.1.11.-	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mn ²⁺ , Zn ²⁺
RecA/RadA (Rad51) recombinase	-	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺

Фосфорные соединения и ионы Mg^{2+} в белках LUSA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Chaperone function						
Chaperonin GroEL	3.6.4.9	PO ₄ ³⁻	K ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Nucleotide and amino acid metabolism						
Thymidylate kinase	2.7.4.9	PO ₄ ³⁻	-	Na ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Thioredoxin reductase	1.8.1.9	-	-	-	-	Mg ²⁺
Thioredoxin	-	-	-	-	-	Cd ²⁺ , Zn ²⁺
CDP-diglyceride-synthase	2.7.7.41	PO ₄ ³⁻	↑K ⁺ , ↓Na ⁺	No entries	Mg ²⁺	No entries
Energy conversion						
Phosphomannomutase	5.4.2.8	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺ , Zn ²⁺
Catalytic subunit of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	PO ₄ ³⁻	-	-	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Proteolipid subunits of the membrane ATP synthase	3.6.3.14	-	-	-	-	-
Coenzymes						
Glycine hydroxymethyltransferase	2.1.2.1	-	↓MC ⁺	-	↓Mg ²⁺ , Mn ²⁺ , Ca ²⁺	-

Фосфорные соединения и ионы Mg^{2+} в белках LUSA

Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant inorganic anions	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional dependence	Presence in at least some structures	Functional dependence	Presence in at least some structures
Protein Secretion						
Preprotein translocase subunit SecY	-	-	-	-	-	Zn ²⁺
Signal recognition particle GTPase FtsY	3.6.5.4	PO ₄ ³⁻	-	K ⁺	Mg ²⁺	Mg ²⁺
Miscellaneous						
Predicted GTPase (YchF, PF06071, 1JAL, 2OHF, 2DBY, 2DWQ, 1NI3)	-	PO ₄ ³⁻	K ⁺	-	Mg ²⁺	-
S-adenosylmethionine-6-N',N'- adenosyl (rRNA) dimethyltransferase (KsgA)	2.1.1.48	-	-	-	Mg ²⁺	-

Фосфорные соединения и ионы Mg^{2+} в белках LUSA

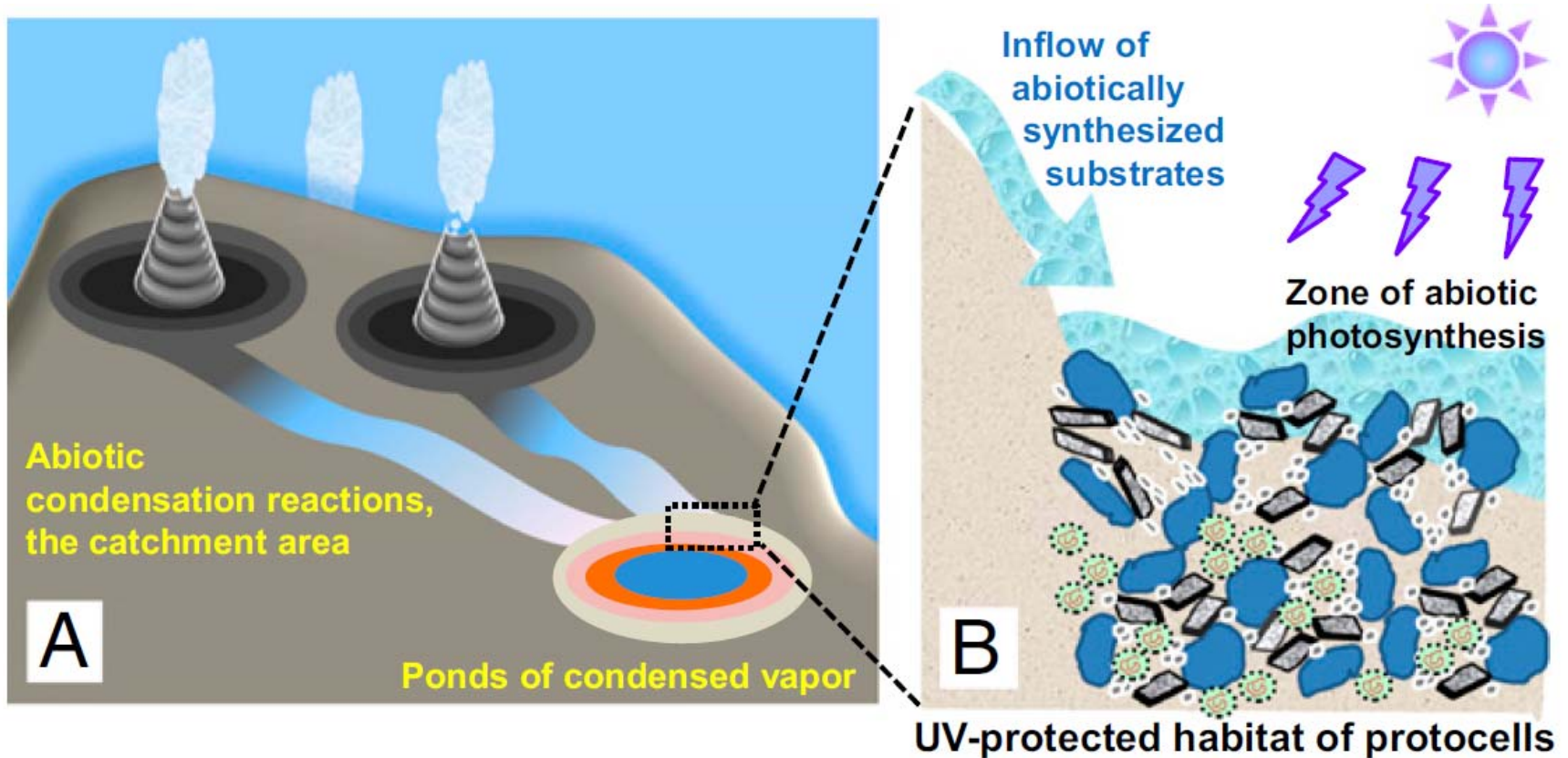
Protein function	EC number (if available)	Functionally relevant	Monovalent cations		Divalent cations	
			Functional	Presence in at	Functional	Presence in

Высокое содержание фосфорных соединений в геотермальной жидкости могло обеспечивать образование фосфорилированных молекул, таких как АТФ или ГТФ, и поддерживать энергетику, основанную на переносе фосфатных групп.

Бескислородные геотермальные поля:

В каждый геотермальный пруд стекал «урожай» органических молекул из его водосбора.

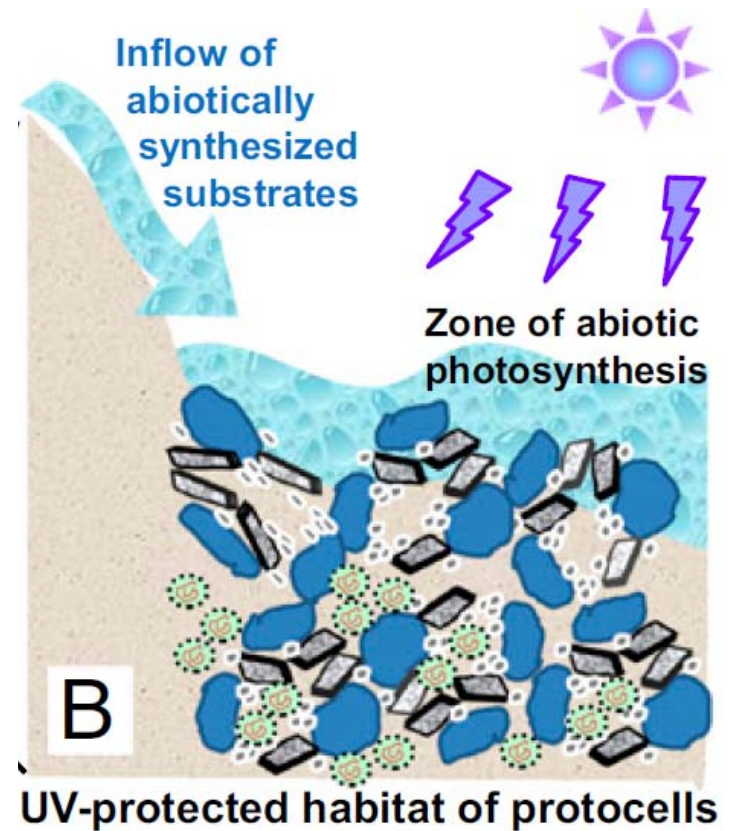
Только переносимые водой соединения могли попадать в такие пруды.



Бескислородные геотермальные поля:

Содержащие сульфиды металлов осадки должны были защищать первые клетки от **УФ-квантов**.

Слой ZnS в 5 мкМ
ослабляет
УФ-излучение в **10^{10} раз**
(как более 100 м воды)



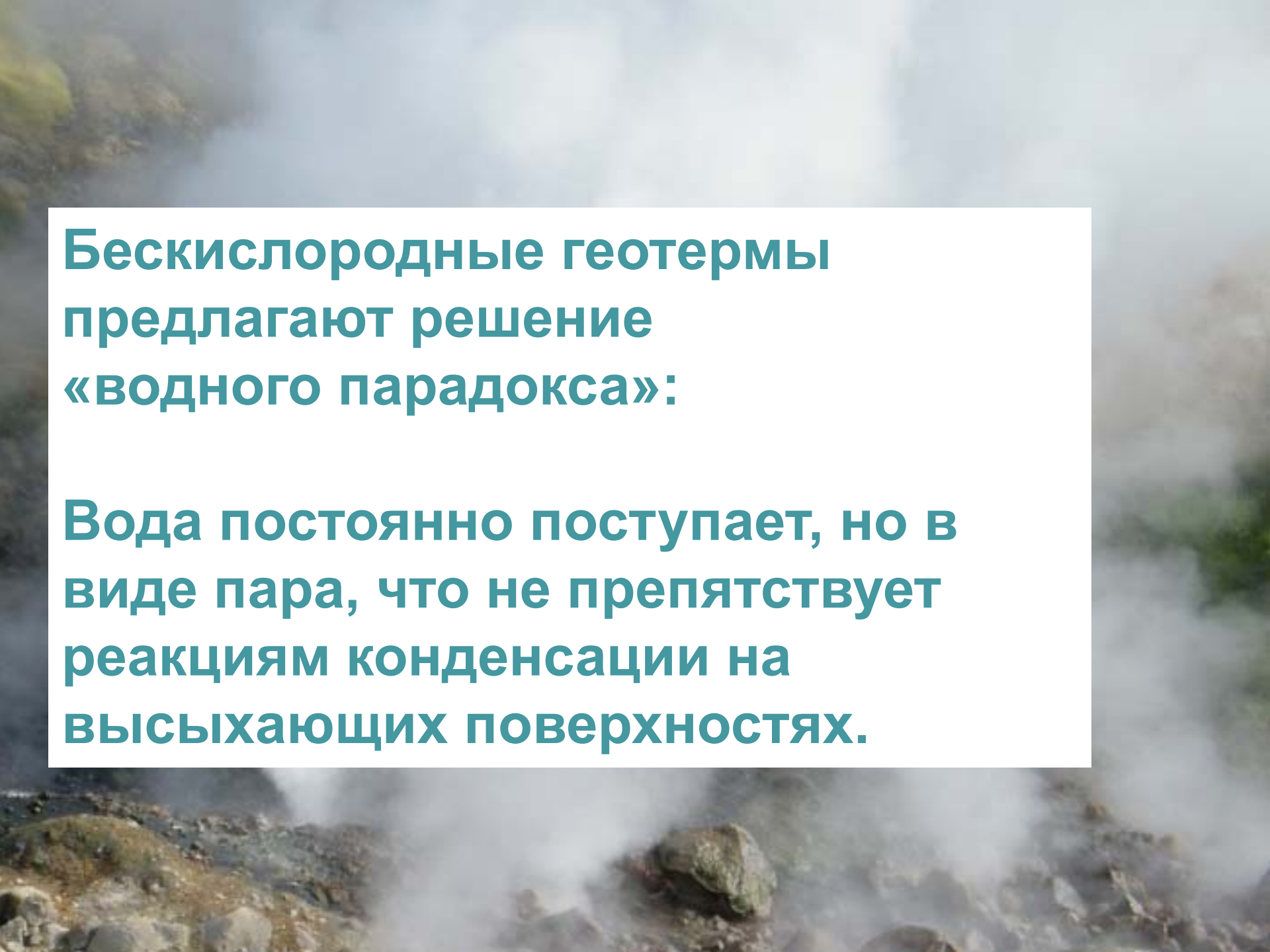
Пористые, содержащие сульфиды металлов отложения должны были иметь слоистую структуру.

Верхние слои могли катализировать фотохимические реакции и, поглощая УФ-кванты, защищать обитателей нижних слоев от жесткого ультрафиолета.

Сообщества фототрофных микроорганизмов и поныне устроены подобным образом.



Микробный мат



**Бескислородные геотермы
предлагают решение
«водного парадокса»:**

**Вода постоянно поступает, но в
виде пара, что не препятствует
реакциям конденсации на
высыхающих поверхностях.**

Независимость от климата

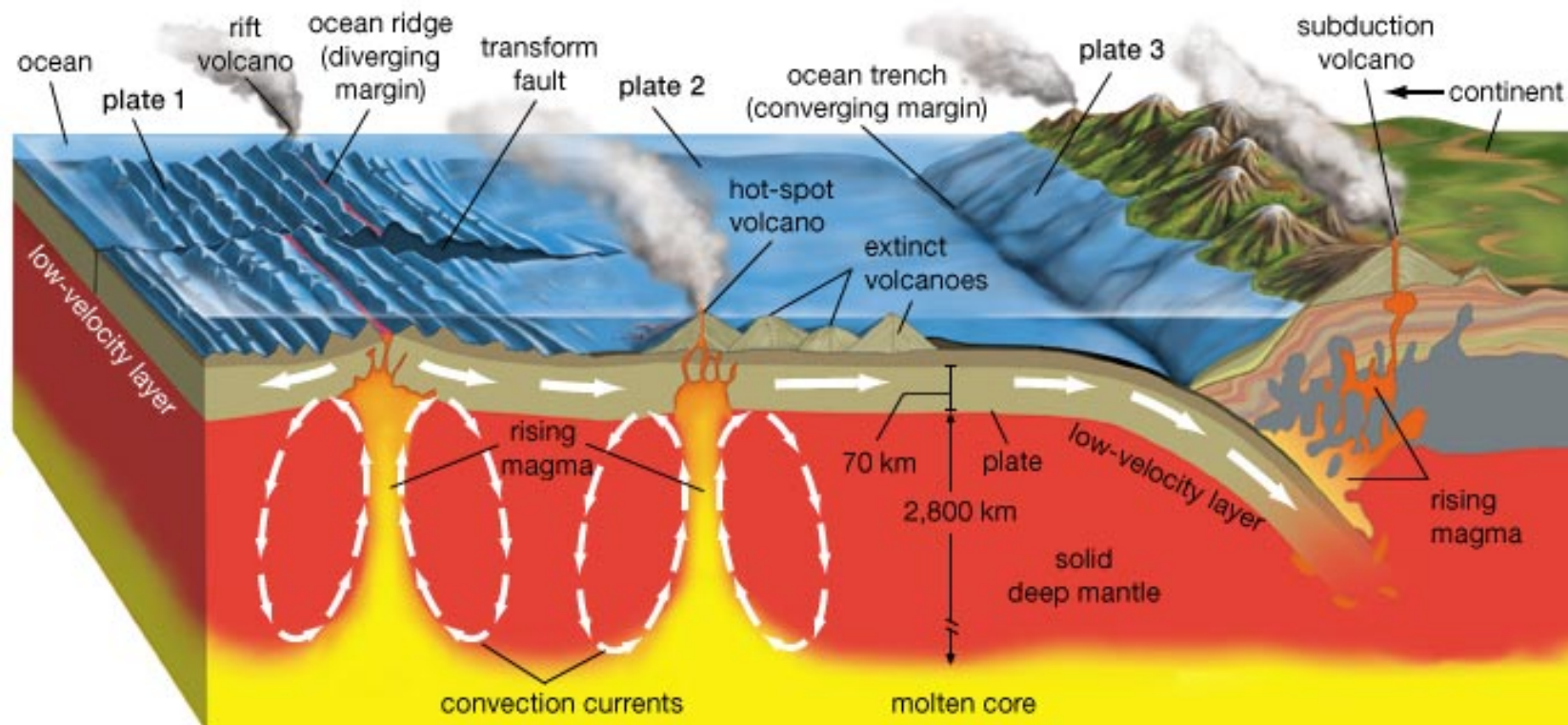
На геотермальных полях поддерживалась, как в инкубаторе, постоянная среда, не зависящая от смены времен года.



С учетом того, что «светимость» солнца должна была составлять 70% от современной, на геотермальных полях могло быть прохладно, что должно было способствовать «Миру РНК».

Image: Dominique Decobecq

Геотермальные системы способны существовать многие миллионы лет; за это время первые организмы могли обзавестись непроницаемыми для ионов мембранами и суметь заселить океан.



Источник рисунка: www.nasa.gov

Геотермы *versus* **глубоководные курильщики:**

Бескислородные геотермальные поля обладали всеми преимуществами глубоководных курильщиков – неорганическими компартментами, катализаторами и источниками органики - и помимо этого...

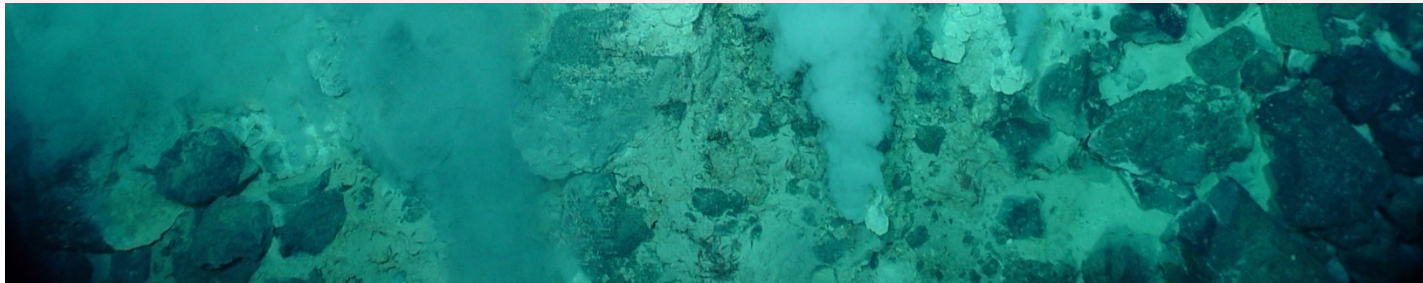
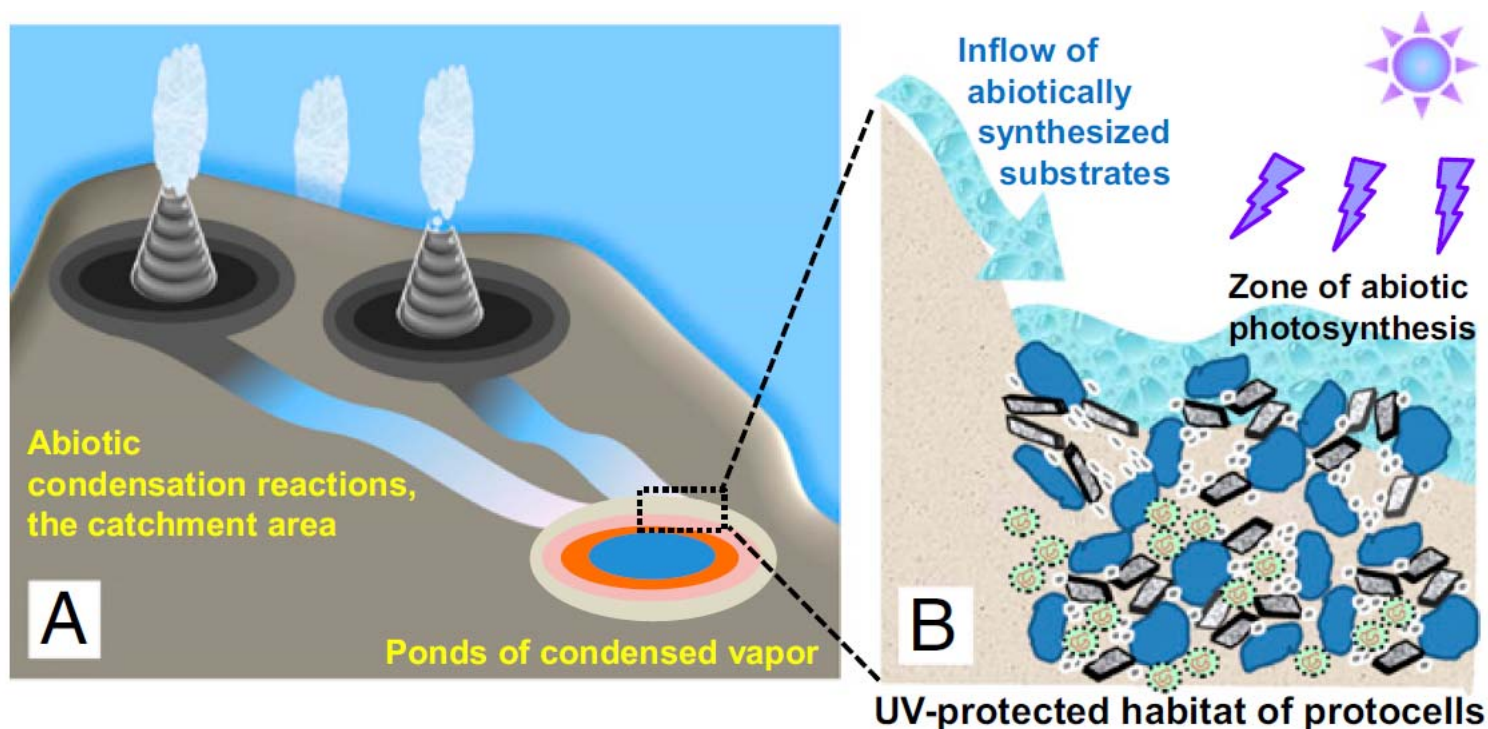


Image: Wikipedia

Геотермальные поля обеспечивали:

- 1) Источник органических и фосфорных соединений,
- 2) Пористые структуры, выстланные мощными (фото)катализаторами, такими как **ZnS** and **MnS**,
- 3) Возможность концентрации реагентов при испарении,
- 4) Водоемы с химическим составом, похожим на цитоплазму.

**Экспериментальное моделирование
(фото)химических процессов на
бескислородных геотермальных полях
может прояснить ранние этапы эволюции.**

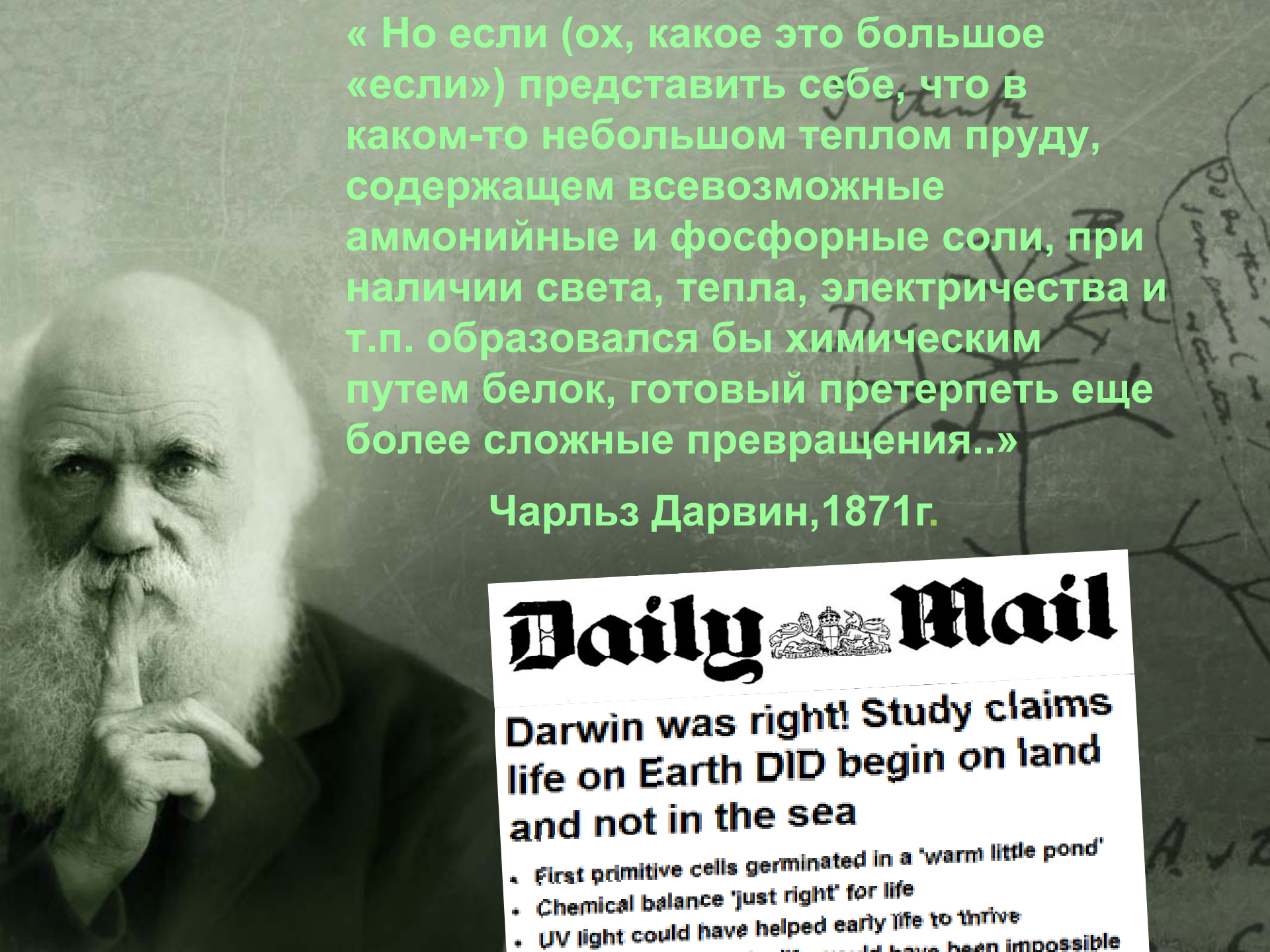


Согласно Опарину и Холдейну жизнь возникла в «первичном бульоне»

Густой раствор
органических
молекул мог
существовать
только в
ограниченном
объеме жидкости...



Image credit: Bill Sanderson / Science Photo Library



« Но если (ох, какое это большое «если») представить себе, что в каком-то небольшом теплом пруду, содержащем всевозможные аммонийные и фосфорные соли, при наличии света, тепла, электричества и т.п. образовался бы химическим путем белок, готовый претерпеть еще более сложные превращения..»

Чарльз Дарвин, 1871г.

Daily Mail

Darwin was right! Study claims life on Earth DID begin on land and not in the sea

- First primitive cells germinated in a 'warm little pond'
- Chemical balance 'just right' for life
- UV light could have helped early life to thrive
- ... would have been impossible