

АСТРОНОМИЧЕСКОЕ ОБЩЕСТВО



Космические факторы эволюции биосферы и геосферы

Междисциплинарный коллоквиум

МОСКВА

21–23 мая 2014 года

СБОРНИК СТАТЕЙ

Санкт-Петербург
2014

Сборник содержит доклады, представленные на коллоквиуме, состоявшемся 21–23 мая 2014 года в помещении Государственного астрономического института имени П.К. Штернберга. Тематика докладов посвящена рассмотрению основных этапов эволюции Солнца и звезд, а также влиянию Солнца на процессы на Земле.

Оргкомитет коллоквиума:

Обридко Владимир Нухимович, сопредседатель Астрономического Общества, ИЗМИРАН – председатель оргкомитета

Самусь Николай Николаевич, сопредседатель Астрономического Общества, ИНАСАН

Гасанов Сафар Алиевич, исполнительный директор Астрономического Общества, ГАИШ МГУ, заместитель председателя оргкомитета

Чепурова Валентина Михайловна – ученый секретарь Астрономического Общества, ГАИШ МГУ

Карицкая Евгения Алексеевна – ИНАСАН

Мохов Игорь Иванович, ИФА РАН

Гиндилис Лев Миронович, ГАИШ МГУ

Бочкарев Николай Геннадиевич, ГАИШ МГУ

Штаерман Вера Львовна – секретарь оргкомитета

Ответственный редактор – В.Н. Обридко

Технический редактор Е.Л. Терёхина

Компьютерная вёрстка Е.Л. Терёхиной

СОДЕРЖАНИЕ

Обридко В.Н.

Введение. Связь с проектом SKOSTEP “Солнечная переменность и ее воздействие на Землю» 5

Гиндилис Л.М.

Обзор представлений о происхождении жизни: от античности до наших дней 9

Щекинов Ю.А., Сафонова М., Мерфи Дж.

Космологические аспекты обитаемости экзопланет 23

Бусарев В.В.

Каменно-ледяные тела как возможные инкубаторы первичной жизни 32

Бочкарев Н.Г.

Миграция молекул и пыли во Вселенной. Пределы панспермии 39

Адушкин В.В., Витязев А.В., Глазачев О.Д., Печерникова Г.В.

Астрофизика и слабая форма гипотезы панспермии и экзогенные факторы в эволюции Земли 50

Кацова М.М., Лившиц М.А.

Активность молодого Солнца 67

Соколов Д.Д.

Маундеровский минимум – основные характеристики, гипотезы возникновения 81

Ишков В.Н.

Солнечные вспышечные суперсобытия: когда они могут происходить и энергетические пределы их реализации 85

Porfir'eva G. and Yakunina G.

Active processes on the Sun and their geoeffectiveness 99

Якушев А.В., Чурилин Н., Соина В.С., Воробьёва Е.А., Мергелов Н.С.

Особенности функционирования бактериальных экосистем в условиях Антарктиды 109

<i>Печерский Д.М.</i> Переполюсовки геомагнитного поля и жизнь на Земле в фанерозое	117
<i>Елисеев А.В.</i> Роль взаимодействия климата и экосистем в климатическом отклике на внешние воздействия	131
<i>Ковадло П.Г., Язев С.А.</i> Полярный лед и климат Земли	146
<i>Смольков Г.Я., Баркин Ю.В.</i> К системному и междисциплинарному изучению солнечно-земных связей	162
<i>Мирошниченко Л.И.</i> Космические лучи – фактор эволюции биосферы	180
<i>Belisheva N.K.</i> Biological effectiveness of cosmic rays near the Earth surface	187
<i>Текуцкая Е.Е., Барышев М.Г., Вишневский В.В.</i> Воздействие электромагнитного излучения низкой частоты на ДНК тестовых клеточных структур	203
<i>Самсонов С.Н., Маныкина В.И., Паршина С.С.</i> Отклик сердечно-сосудистой системы людей с различным состоянием адаптационной системы на изменения параметров космической погоды	209
<i>Рагульская М.В.</i> Адаптация живых организмов к действию космических факторов – проблемы и перспективы исследований	219
Список авторов	231

ВВЕДЕНИЕ.
**СВЯЗЬ С ПРОЕКТОМ СКОСТЕП “СОЛНЕЧНАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ
И ЕЕ ВОЗДЕЙСТВИЕ НА ЗЕМЛЮ»**

Обридко В.Н.
ИЗМИРАН, Троицк, Москва

Предлагаемый вашему вниманию сборник представляет собой публикацию докладов, представленных на Коллоквиуме «Космические факторы в эволюции биосферы и геосферы», проведенном Астрономическим обществом в мае 2014 г. Этот коллоквиум был уже третьим в серии коллоквиумов, посвященных анализу эволюции и циклических вариаций Солнца и звезд. Первый состоялся 18–19 декабря 2009 г. и был посвящен теме «Циклы активности на Солнце и звездах». Следующий коллоквиум был проведен 17–18 декабря 2010 г. на тему «Активность звезд и Солнца на разных стадиях их эволюции». Несмотря на то, что, как уже было сказано, все коллоквиумы объединяются единой темой эволюции Солнца и звезд, нынешний имеет особое значение. Становится все более ясно, что внешние космические факторы определенным образом влияют также и на эволюцию планет, в частности, Земли. В связи с этим определенный акцент был сделан на воздействие космических факторов на биосферу Земли, вопросы зарождения жизни, изменения земного магнитного поля и климата. Это существенно расширяет тематику и требует привлечения не только астрономов, но и биологов, медиков, археологов, палеонтологов.

Интерес к такой постановке вопроса возник достаточно давно. В частности, огромное количество публикаций связано с проблемой панспермии. Мы признательны академикам Э.М. Галимову и А.Ю. Розанову за поддержку наших исследований. Следует отметить еще, что обсуждаемые на коллоквиуме вопросы имеют прямое отношение к новой научной программе Международного научного комитета по солнечно-земной физике (СКОСТЕП) на 2014–2018 гг. (Variability of the Sun and Its Terrestrial Impact –VarSITI).

К сожалению, по разным причинам в сборник включены не все доклады, сделанные на коллоквиуме. С полной программой, абстрактами и некоторыми презентациями Вы можно ознакомиться на сайте астрономического Общества http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/confs/cosmic-factors_1.htm.

Краткий отчет о проведенном коллоквиуме опубликован также в Астрокурьере от **21 июня 2014г. (6-ой информационный выпуск 2014 года)** <http://www.sai.msu.su/EAAS/rus/astrocourier/210614.htm>

Проект СКОСТЕП

«Солнечная переменность и ее воздействие на Землю»

Решение о проведении этого проекта было принято СКОСТЕП в начале 2014 года. Он состоит из четырех подпроектов. Первый из них – Эволюция Солнца и экстремальные события (Solar Evolution and Extrema – SEE) – наиболее тесно связан с тематикой нашего коллоквиума.

Основные задачи проекта:

1. Реконструкция параметров солнечной цикличности по прямым наблюдениям и косвенным данным.
2. Дальнейшее развитие динамо моделей солнечной активности с учетом реконструированных данных на разных временных интервалах.
3. Реконструкция данных о спектральной и корпускулярных агентах воздействия активности Солнца в течение истории Земли.
4. Определение мощности и частоты повторения особо мощных солнечных событий, таких как солнечные вспышки и корональные выбросы массы.
5. Определение перспективы развития солнечной активности на ближайшие годы. Можно ли утверждать, что мы находимся накануне длительного понижения активности (гранд-минимума)?
6. Можем ли мы на современном уровне понимания эволюции солнечной светимости и потока массы решить Парадокс «Слабого молодого Солнца»? Каковы другие возможные решения?

Структура коллоквиума

Стандартная модель эволюции звезд утверждает, что приблизительно 4.5 млрд. лет назад светимость Солнца была на 30% ниже, чем сегодня. Это означает, что температура Земли была на 20 градусов ниже, и Земля должна была быть полностью замершей («Земля как снежок»). В дальнейшем светимость Солнца постепенно увеличивалась, но только 2 млрд. лет назад температура Земли стала выше температуры таяния льда, то есть все это время на Земле не должно было быть свободной воды. Это резко противоречит данным археологии, палеонтологии и геологии, которые убедительно доказывают, что на Земле была свободная вода и существовали простейшие живые организмы. Обнаружены кристаллы циркона с возрастом 4.4 млрд. лет, которые убедительно доказывают, что Земля в этот период уже имел и литосферу и гидросферу. Более того, есть основания полагать, что свободная вода была и на Марсе, для которого этот эффект ледяной планеты еще более трудно разрешим.

Решение этого парадокса пока не получено. Эту задачу можно решить только совместными усилиями палеоклиматологов, геологов, биологов, гелиофизиков, астрофизиков и специалистов по физике атмосферы. В принципе, здесь может быть несколько решений.

Наиболее распространенное объяснение того, что Земля не превратилась в ледяную планету, связано с парниковым эффектом. Атмосфера, состоящая из двуокиси углерода и метана, могла бы дать такой эффект. Однако точные расчеты пока наталкиваются на очень большие неопределенности в значениях входящих параметров. Нас особо интересует астрофизическое решение. Дело в том, что количество энергии, получаемой Землей, зависит от массы Солнца как шестая степень. Поэтому если Солнце в момент зарождения было на 4–5% более массивно, чем сегодня, это практически решает проблему. Однако тогда нужно сильно увеличить отток массы по сравнению с сегодняшним. Нужно обеспечить средний отток порядка одного процента в миллиард лет. Сегодня отток массы в 300 раз меньше. Правда, молодое Солнце было значительно более активно, чем сегодня. Поток излучения во всех длинах волн и поток солнечного ветра, по видимому, был на 2–3 порядка выше, чем современный. Однако хватает ли этого для решения проблемы, пока не ясно.

Проблема молодого Солнца важна еще и с другой стороны. Ведь мы до сих пор не знаем, как возникла жизнь на Земле. В то же время первые простейшие организмы (микрофоссилии) имеют возраст около 3.5 млрд. лет, что тоже соответствует относительно молодому Солнцу. Конечно, есть много оснований полагать, что жизнь вообще возникла не на Земле, и только попав на Землю, эти зерна жизни получили благоприятные условия для своего существования. Тогда тем более важно знать, каковы были эти благоприятные условия, и какова была в это время солнечная активность.

При дальнейшем развитии жизни на Земле периоды относительно медленной эволюции сменялись скачкообразным изменением или даже катастрофами. В принципе, такое неравномерное развитие может быть объяснено внутренними закономерностями эволюционно процесса. Однако, с другой стороны, некоторые моменты в неравномерном развитии биосферы совпадают с некоторыми резкими изменениями космических факторов, таких как поток космических лучей, переполюсовки земного магнитного поля, метеоритные бомбардировки.

С точки зрения солнечной активности расчеты показывают, что 11-летние циклы, существенно более высокие, чем наблюдавшийся в XX веке 19-ый цикл (около 200 единиц в системе чисел Вольфа), крайне маловероятны. Можно с некоторой степенью уверенности допустить, что циклы с высотой 260–280 единиц могут происходить раз в 1000 лет. Еще более мощные циклы, скорее всего, запрещены с точки зрения современных представлений о механизмах генерации магнитных полей на Солнце.

С точки зрения оценки предельной мощности вспышек на Солнце ситуация не намного лучше. Самая мощная вспышка, о которой у нас есть достоверные сведения, произошла в 1859 году (так называемая Кэррингтоновская вспышка) и имела мощность несколько единиц на 10^{32} эрг (правда, оценки несколько различаются у разных авторов). Трудно сказать,

насколько более мощные вспышки могут наблюдаться на современном Солнце. Если взять для оценки предельные параметры активных областей и магнитного поля в них, когда-либо наблюдавшиеся инструментальными методами, мы получим полную магнитную энергию около 10^{36} эрг. Представить себе, что вся эта энергия разом выделилась во время вспышки невозможно. Поэтому наиболее разумной представляется оценка 10^{34} эрг, причем крайне редко, скорее всего, раз в 1000 лет.

Другое дело, что на молодых звездах (и в частности, на Солнце, когда оно было молодым) могут наблюдаться значительно более мощные вспышки. По последним оценкам японских исследователей, раз в 5000 лет может происходить супервспышка с энергией 10^{35} эрг. Это дает основание еще для одной гипотезы, согласно которой вспышки из облака околосолнечных звезд могут быть основой потока космических лучей мягких энергий, и они могут существенно влиять на темпы эволюции биосферы.

Еще одним из внешних факторов, которые могут влиять на эволюцию биосферы, являются периодические переполюсовки земного магнитного поля. Если бы в период переполюсовки (а она продолжается несколько сотен лет) геомагнитное поле вообще обращалось в нуль, и Земля оказывалась бы беззащитной перед лицом мощного потока электромагнитной и корпускулярной радиации Солнца, это могло бы безоговорочно иметь катастрофические воздействие на жизнь на Земле. К счастью, теперь ясно, что в период переполюсовки происходит смена полюсов, но поле остается достаточно значительным, не менее трети от его стандартного значения. С другой стороны, мы не знаем, как меняется структура магнитосферы Земли в период переполюсовки, и сохраняет ли магнитосфера свои защитные свойства.

Природа самих переполюсовок пока не ясна. И поэтому не существует строго обоснованных методов предсказания очередной переполюсовки. Если же ориентироваться на среднее время между переполюсовками, можно ожидать, что очередная переполюсовка может произойти во вполне обозримое время. Во всяком случае, последнее время средний квадрат магнитного поля неуклонно уменьшается и за 400 лет уменьшился на 30%.

Еще два аспекта проблемы – это воздействие космических факторов на биосферу и климат. Собственно это столь объемные темы, что каждой из них обычно посвящаются крупные симпозиумы. Мы отобрали несколько докладов, посвященных непосредственно экспериментальным аспектам проблемы. Кроме того, обсуждается также важная с глобально-эволюционной стороны гипотеза об адаптационной роли космических факторов.

Проведение коллоквиума было поддержано программами РФФИ 14-02-06018 и 14-02-90424 и Программой фундаментальных исследований № 28 Президиума Российской академии наук «Проблемы происхождения жизни и становления биосферы» (направление 5 «Геобиология в эволюции биосферы»).

ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О ПРОИСХОЖДЕНИИ ЖИЗНИ: ОТ АНТИЧНОСТИ ДО НАШИХ ДНЕЙ

Гиндилис Л.М.

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

1. От теории самозарождения до эволюции жизни

Научные представления о происхождении жизни на Земле менялись с течением времени. Длительное время, начиная с античности, господствовали представления о непрерывном самопроизвольном возникновении живых организмов из неживой материи – теория *самозарождения жизни*. Считалось, что черви, насекомые, жабы и другие существа возникают из грязи и гниющих продуктов, а мыши рождаются из пшеничных зерен. Заметим, что эти представления были основаны на наблюдениях (разумеется, неправильно истолкованных) и просуществовали около 2 тысяч лет, со времен Аристотеля вплоть до эпохи Возрождения, когда точными опытами (Франческо Ричи и др.) была доказана их полная несостоятельность.

Вновь эта идея возродилась после открытия микроорганизмов (XVII в.). Считалось, что микроорганизмы представляют собой промежуточное звено между живой и неживой природой и могут самопроизвольно возникать из неживого. Специально поставленные опыты с нагреванием питательной среды показали, что уничтоженные при кипячении микроорганизмы через несколько дней возрождались вновь. Обнаружить методическую ошибку в этих опытах удалось не сразу. Дискуссия о возможности самозарождения жизни на уровне микроорганизмов растянулась более чем на столетие (в ней принимали участие Ж.Л. Гей-Люссак, Г. Гельмгольц, Дж. Тиндаль и др.). И только блестяще выполненные эксперименты Луи Пастера позволили поставить точку в этом вековом споре. Пастер доказал, что причиной, вызывающей рост микроорганизмов в стерильном бульоне, являются те же самые микроорганизмы, переносимые частицами пыли. Тем самым, он показал, что в мире микробов, как и среди высших организмов, **любая форма жизни ведет свое происхождение от родительской формы.**

Тогда возникает вопрос – как же появились первые организмы, как возникла жизнь на Земле? Если оставаться в рамках научной методологии, исключая акт Творения, то приходится признать, что всё многообразие живых организмов на Земле возникло *в процессе эволюции из неких первичных простейших форм*, скажем, одноклеточных прокариотов. Действительно, исследование земных пород показывает, что чем дальше продвигаемся мы вглубь геологической истории, тем более простые организмы встречаются в земных породах. Древнейшие породы содержат лишь следы

простейших микроорганизмов. Отсюда возникает естественная мысль, что *жизнь на Земле появилась в какой-то момент ее истории*. По современным данным это случилось вскоре после формирования Земли как самостоятельного планетного тела, вероятно, в первые сотни миллионов лет ее развития (от 4,1 до 3,9 миллиардов лет назад). Но имеются также данные о том, что когда закончился процесс формирования Земли, на ней *уже присутствовала* простейшая бактериальная жизнь. И вот тут вновь возникает вопрос: хорошо, жизнь на Земле развилась в процессе эволюции из простейших форм, а как появились эти простейшие формы?

2. Три возможности

Существуют три возможности:

- 1) случайное происхождение жизнеспособной формы (вероятностное чудо), нашей Земле просто повезло;
- 2) простейшие организмы были занесены на Землю из Космоса (гипотеза панспермии);
- 3) они образовались на ранней Земле в процессе предбиологической химической эволюции.

Могут иметь место и сочетания этих возможностей.

3. Предбиологическая эволюция на Земле

Для начала химической эволюции, прежде всего, необходимы органические соединения и вода. Вода на Земле появилась около 4 млрд. лет назад. Считается, что она была доставлена на Землю кометами. Согласно Брэдлею и др. [1], источником воды может быть и космическая пыль. Пузырьки воды обнаружены в частицах IDP. Они образуются под действием солнечного ветра (при взаимодействии солнечного ветра с силикатами, входящими в состав пыли, образуется свободный кислород, который немедленно вступает в реакцию с ионами водорода H^+ , образуя молекулы воды). Что касается органики, то, как показали эксперименты (начиная с классических опытов Г. Юри и его аспирантки С. Миллер), органические соединения в первобытной атмосфере Земли могли легко образоваться под действием УФ-излучения, ударных волн, радиоактивного распада и других источников энергии. При этом образуются достаточно сложные биологически активные соединения, такие как аминокислоты, сахара и азотистые основания РНК. Другим источником образования органических соединений могут быть подводные вулканы и, наконец, еще одним источником – кометы и метеориты. В упомянутой работе Брэдлея [1] говорится, что частицы пыли могут быть источником не только воды, но и органических соединений.

Органические вещества в изобилии имеются в межзвездной среде, они входят в состав комет, а также некоторых типов метеоритов. Таким образом, формирование *мономеров* – основных строительных блоков биохимии

мии, из которых строятся макромолекулы, – не представляет собою проблемы. Что касается следующих шагов предбиологической эволюции, то здесь пока нет ясности. И.С. Шкловский выделяет следующие этапы в процессе образования жизни [2]:

- 1) эволюция малых молекул (образование мономеров);
- 2) образование полимеров;
- 3) возникновение каталитических функций;
- 4) самосборка молекулы;
- 5) возникновение мембран и доклеточная организация;
- 6) возникновение механизма наследственности;
- 7) возникновение живой клетки.

В настоящее время мы достаточно ясно представляем себе только первый этап и, в какой-то мере, приблизились к пониманию второго, наметился прогресс в понимании возникновения каталитических функций. Остальное остается пока неясным.

Одной из серьезных проблем является нарушение симметрии – гомохиральность. В этом плане представляет интерес работа Г.Г. Манагадзе, в которой показано, как может возникнуть хиральность в плазменном факеле ударной волны, возникающей при метеоритном ударе [3] (см. его статью в настоящем сборнике).

Надо сказать, что современные представления о возникновении жизни радикально отличаются от тех, которые имели место пару десятилетий тому назад. Тем более, в середине XX века. Первое отличие состоит в представлении о том, *когда* возникла жизнь на Земле. В середине прошлого века господствовало представление, что после формирования Земли, она в течение 2 млрд. лет оставалась безжизненной. Считалось, что в течение этого времени на Земле шел процесс предбиологической химической эволюции, и лишь спустя 2 млрд. лет на Земле появились первые микроорганизмы. Однако более поздние исследования показали, что одноклеточные организмы появились на Земле около 4-х миллиардов лет тому назад, сразу после образования Земли как самостоятельного планетного тела [4] (см. также статью А.В. Маркова в настоящем сборнике). Другое отличие состоит в том, *где* возникала жизнь. В середине прошлого века господствовало представление, что жизнь возникла в первобытном океане, теперь считается, что она возникала в небольших водоемах. Важным элементом современных представлений о происхождении жизни является гипотеза о существовании древнего мира РНК как возможного предшественника жизни на Земле.

4. Мир РНК

Как отмечает А.С. Спириин [5], в течение длительного времени господствовало представление о том, что биохимический катализ осуществляется только белками-ферментами. Поэтому все теории происхождения жизни

вынуждены были исходить из того, что первичными в этом процессе являются белки, поскольку без них невозможен биохимический метаболизм. Но в 80-х годах прошлого столетия были открыты каталитические функции РНК, и это перевернуло все прежние представления не только об исключительной роли белков в происхождении жизни, но и в понимании самого феномена жизни. Были открыты и другие функции РНК, в том числе способность, подобно белкам, образовывать пространственные структуры. Таким образом, оказалось, что РНК являются уникальными биополимерами, которым свойственны как функции ДНК (кодирование), так и функции белков. Конечно, отмечает Спириин, белки делают это более эффективно, но они, в принципе, не способны к самовоспроизведению. В то время как РНК содержит все необходимые предпосылки для точного воспроизведения ее собственной структуры. Следовательно, молекулы РНК могли существовать и самовоспроизводиться на древней Земле или других космических объектах до появления клеточных форм жизни. Представление о том, что жизнь началась с молекул РНК и их ансамблей, в настоящее время, как отмечает Спириин, является «почти общепринятым». В древнем мире РНК не было ни белков, ни ДНК, а лишь ансамбли различных молекул РНК, выполняющих разные функции, которые эволюционировали в клеточные формы жизни. Спириин описывает, как мог протекать этот процесс. Океанов на Земле в то время еще не было. Процесс протекал в небольших водоемах, так называемых «дарвиновских лужах». При этом существенную роль играл циклический процесс: периодическое подсушивание и затопление этих водоемов. Вопрос о том, как в «дарвиновских лужах» могла возникнуть первая РНК остается открытым. Весь путь эволюции, включая образование молекул РНК, и далее от колоний РНК до индивидуальных организмов с клеточной структурой, ДНК и современным аппаратом белкового синтеза должен был быть пройден за промежуток времени от формирования Земли, как планеты (4,6–4,5 млрд. лет) до окончания метеоритной бомбардировки и появления первых клеточных организмов (3,9–3,8 млрд. лет назад). Спириин не исключает того, что примитивные клеточные формы жизни могли быть занесены на Землю из ближнего или дальнего космоса.

В этом плане большой интерес представляют данные о наличии следов бактериальной жизни в метеоритах. Они представляют собой фосилизированные (окаменевшие) формы, в которых органика замещена веществом окружающей породы с сохранением тончайших морфологических структур замещаемых бактерий. Эти данные были получены в Палеонтологическом институте РАН под руководством академика А.Ю. Розанова и в НАСА Р. Гувером. Пример подобных структур приведен на рис. 1. Окаменевшие структуры в метеоритах вполне подобны тем, которые обнаруживаются в земной коре, что облегчает их идентификацию как окаменевших бактерий. Обнаруженные остатки относятся к прокариотам, но есть

намеки на то, что среди них могут быть и эвкариоты. Обнаруживаются они только в углистых хондритах, в других типах метеоритов их нет. Поскольку возраст углистых хондритов превышает возраст Земли, это, по мнению А.Ю. Розанова [6], указывает на то, что, по крайней мере, прокариотная (а возможно и эвкариотная) жизнь существовала в Солнечной системе еще до образования Земли. А мир РНК должен быть еще более древним. В этом смысле представляет интерес данные о происхождении жизни в процессе эволюции протопланетного диска.

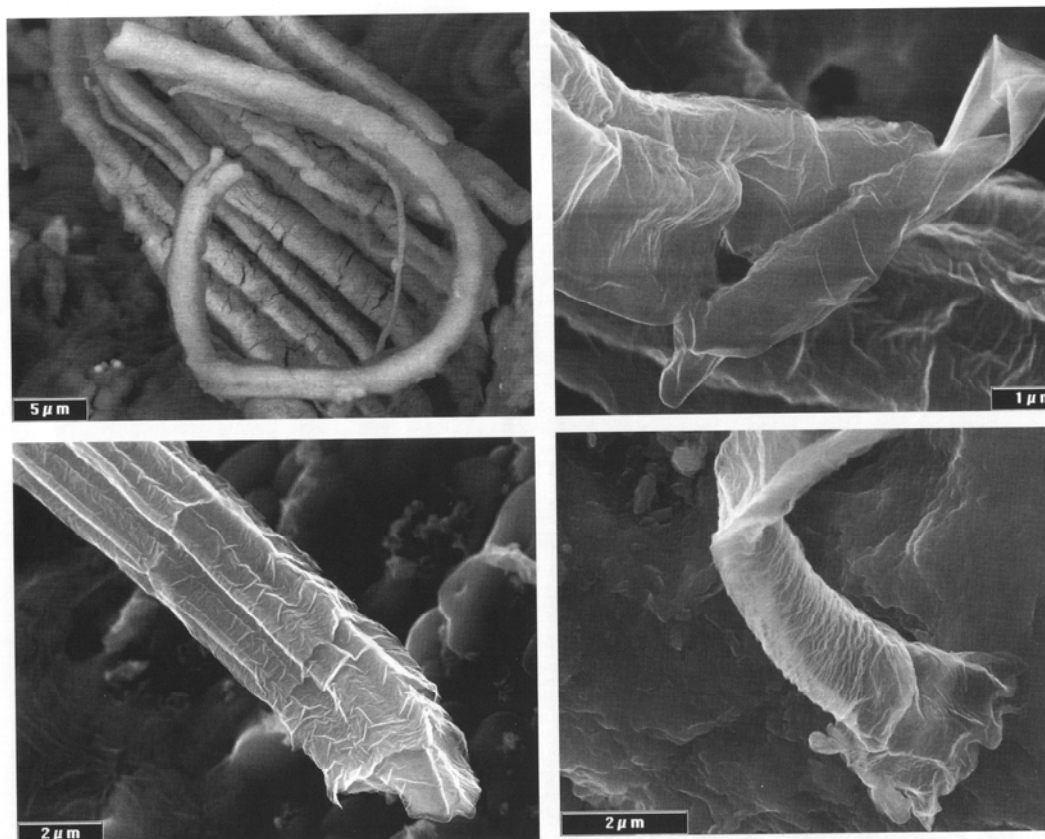


Рис. 1. Псевдоморфозы по бактериальным нитям и цианобактериальным чехлам в метеорите Оргей по А.Ю. Розанову [6].

5. Эволюция протопланетного диска и происхождение жизни

Сценарий В.Н. Снытникова [7]. Известно, что протопланетные диски формируются в молекулярных газопылевых облаках. Основная часть вещества в них принадлежит молекулярному водороду H_2 и гелию. Доля органических соединений, согласно Снытникову, составляет 1% по массе, а доля неорганических соединений – 1/10 от массы органики. При этом имеется относительно высокое содержание молекул воды H_2O . Вращающееся облако сжимается, образуя центральное тело (протозвезду) и окружающий слой газа и пыли – протопланетный диск.

Сжатие газа в диск ведет к повышению температуры газа и повышению концентрации пылинок. Такая среда с активными органическими со-

единениями и с наночастицами космической пыли, согласно Снытникову, благоприятна для синтеза минералов, входящих в состав углистых хондри-тов, а также для синтеза слоистых силикатов и глин, которые являются эффективными катализаторами при синтезе органических соединений. Катализаторами выступают и металлорганические соединения, а также сами органические молекулы. То есть, в диске на этом этапе идет каталитический синтез органических соединений и самих катализаторов. Снытников называет этот процесс *астрокатализом*. В дальнейшем, когда диск теряет газовую компоненту и превращается в тонкий субдиск, в нем идет синтез высокомолекулярных соединений. Возникают условия максимально благоприятные для синтеза предбиологических соединений, который заканчивается образованием «мира РНК». Дальнейшая эволюция протопланетного диска приводит к условиям, при которых начинает преобладать деструкция

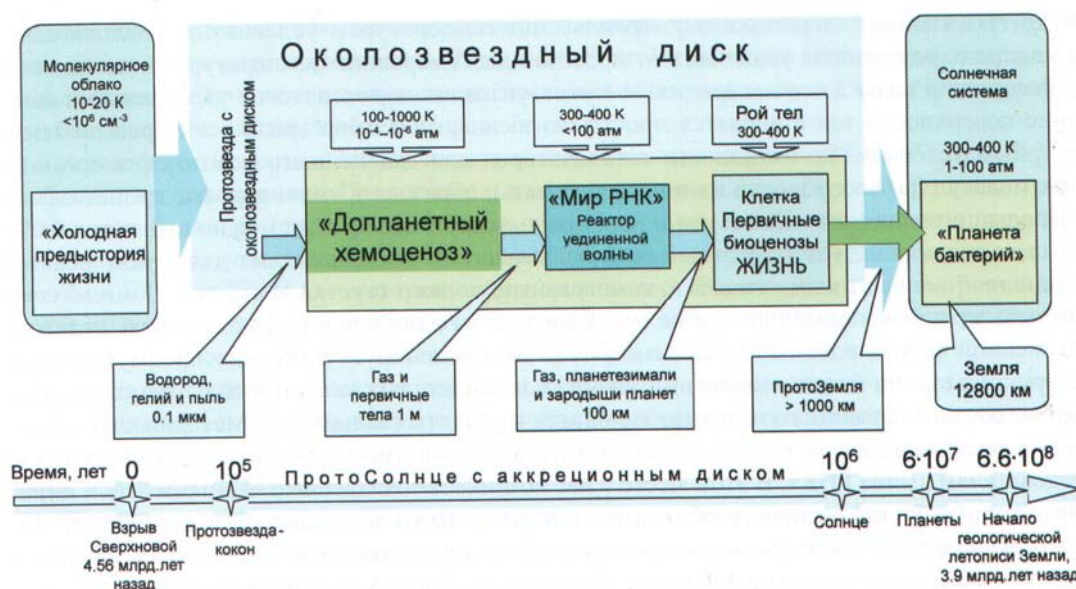


Рис. 2. Сценарий происхождения жизни по В.Н. Снытникову [7].

органических веществ. В этих условиях могли сохраниться только те соединения на поверхности тел, которые изолировались полимерной оболочкой. Весь биохимический процесс и его детали, признается Снытников, малопонятны, но это и есть стадия зарождения клетки. Клетки захватывали в своем размножении основную часть доступных органических соединений и формировали свои первичные сообщества для получения пищи. Возникла *допланетная биосфера*, распространившаяся от Юпитера до Венеры. Свидетельством этого этапа, по мнению Снытникова, могут быть микрофоссилии (окаменелости) бактерий, обнаруженные в метеоритах. На последнем этапе в протопланетном диске идет окончательное формирование планет. Оно заканчивается периодом интенсивной метеоритной бомбардировки, который для Земли длился около 600 млн. лет. В период бомбардировки органические вещества разрушаются, представители биосферы

гибнут. В этих жестких неблагоприятных условиях смогли выжить только те микроорганизмы, которые сформировали биоценозы, адаптирующиеся к изменяющимся внешним условиям. Период бомбардировки заканчивается для Земли образованием «планеты бактерий» к 3,9 миллиардам лет тому назад. С этого времени начинается геологически документированная история Земли. (См. рис. 2.)

В.В. Бусарев обращает внимание, что процесс происхождения жизни, который мог начаться в межзвездной среде, для своего завершения нуждается в защите от жестких космических факторов, а также в наличии необходимых условий для появления жидкой воды и катализаторов. Такие условия могли реализоваться на планетных (или протопланетных) телах и/или в их недрах. Такими объектами в ранней солнечной системе могли быть каменно-ледяные тела. В их недрах происходил распад короткоживущих изотопов, в первую очередь ^{26}Al , что явилось основным энергетическим источником для образования внутренней водной среды, в которой было возможно появление жизни. Подобные ранние процессы образования внутреннего водного океана, водной дифференциации и образования силикатно-органических ядер, по мнению Бусарева, должны были протекать на всех крупных каменно-ледяных телах Солнечной системы за границей конденсации водяного пара, в частности, в зоне формирования Юпитера. В дальнейшем проникновение во внутренние области Солнечной системы происходило за счет взаимодействия с астероидами главного пояса (столкновения, дробление и т.п.) [8] (см. также его статью в настоящем сборнике).

В работе [9] подчеркивается, что Солнце вместе с окружающим его газопылевым диском сформировалось в гигантском молекулярном облаке, рядом с молодыми горячими звездами. При этом содержащая органику межзвездная пыль вошла в состав протопланетного диска. Часть этой пыли вошла в состав первых планетезималий. Это произошло в первые несколько миллионов лет, то есть, до того как Солнце вышло на главную последовательность. Важным представляется вытекающий отсюда вывод о том, что анаэробную жизнь можно искать в кометных ядрах.

Упомянем также важные результаты, полученные российско-итальянской группой (Лаборатория радиационной биологии ОИЯИ, Дубна и ряд итальянских университетов), о которых Эрнесто ди Мауро и Е.А. Красавин рассказали на пресс-конференции в Итальянском посольстве в Москве 19 февраля 2014 г. (см. также [10, 11]). Известно, что в основе химических реакций, ведущих к предбиологическим соединениям, лежит молекула цианитроводородной кислоты HCN , широко распространенная в межзвездной среде. Следующим шагом является производный от нее и воды формамид NH_2CONH_2 , также широко распространенный в межзвездной среде. В проведенных экспериментах формамид подвергался облучению протонами, имитирующему воздействию галактических космических лучей. При этом были получены разнообразные соединения, важные для предбиологиче-

ской эволюции. Существенно, что при этом в едином процессе одновременно были синтезированы соединения, необходимые для осуществления генетических и метаболических циклов. Тем самым, как подчеркнул ди Маури, было показано, что генетика и метаболизм имеют общее происхождение, они используют одну и ту же химическую схему и возникают одновременно в одних и тех же физико-химических условиях. Было также установлено, что вещество метеоритов является активным катализатором этих процессов. Очевидно, таким катализатором может служить и космическая пыль.

Хотя в теории предбиологической эволюции достигнуты определенные локальные успехи, в целом, проблема далека от решения. Важным является понимание того, что эволюция могла происходить не обязательно на Земле или планетах земного типа, но и в межпланетной среде и в объектах раннего протопланетного диска.

6. Панспермия

Идея заселения Земли из Космоса возникла под впечатлением крушения теории самозарождения. В XIX веке считалось, что жизнь никогда и нигде не возникает, она существует вечно, наподобие материи или энергии. «Зародыши жизни», блуждая в мировом пространстве, время от времени попадают на подходящую по условиям планету, и там они дают начало биологической эволюции (Г. Гельмгольц и У. Томсон). В начале XX века теория панспермии была развита Сванте Аррениусом (1859–1927). Вскоре она подверглась суровой критике, т.к. считалось, что споры и микроорганизмы должны погибать в межзвездной среде под действием таких факторов, как ультрафиолетовое излучение, жесткая (рентгеновская) радиация и космические лучи. В течение длительного времени (примерно с 1924 по 1974 гг.) теория панспермии считалась похороненной. Однако более детальное изучение показало, что споры и микроорганизмы могут сохраняться в центре межзвездных пылинок, не говоря уже о внутренних частях метеорных тел и комет. Еще более устойчивыми являются вирусы и вириды. Это привело в последней четверти XX века к возрождению теории панспермии, чему способствовали и трудности, с которыми сталкивается теория происхождения жизни путем химической эволюции.

Большой вклад в теорию панспермии внесли Ф. Хойл и Ч. Викрамасинг. Еще в середине прошлого века, основываясь на наблюдаемых спектрах межзвездной пыли, они выдвинули гипотезу, что межзвездная пыль в значительной мере состоит из бактерий. Подобно тугоплавким ядрам пылинок, бактерии окружаются «шубой» из грязного льда, которая предохраняет их от разрушения. Согласно новым идеям Викрамасинга (Viva Pan-spermia!, 2011), это не живые бактерии, а их обломки. Викрамасинг считает, что каждая обитаемая планета выбрасывает в межзвездное пространство огромное число микроорганизмов, большинство из которых погибает,

и лишь ничтожная доля порядка 10^{-24} достигает подходящих планет и дает начало жизни на них. Большинство же разрушаются, и их обломки входят в состав межзвездной пыли. В противоположность господствующим представлениям о том, что органические соединения в межзвездной среде шаг за шагом воспроизводят шаги, ведущие к жизни – от простейших соединений до более сложных типа полициклических ароматических углеводов (ПАУ) – Викрамасинг считает, что всё обстоит как раз наоборот. Органические соединения в межзвездной среде можно выстроить в ряд от обломков бактерий, вирусов и вироидов до соединений типа ПАУ и более простых. Представляется, что, скорее всего, в межзвездной среде протекают оба процесса: синтез органических соединений и распад микроорганизмов, вынесенных за пределы обитаемых планетных систем.

Теория панспермии не решает проблему происхождения жизни, а лишь переносит ее с Земли на другие планеты. Как возникла жизнь на этих планетах, остается за рамками теории. В XIX веке такой вопрос не возникал, ибо тогда считалось, что Вселенная является вечной и неизменной. Отдельные миры в ней могут образовываться и разрушаться, но сама Вселенная остается неизменной. Поэтому в ней вечно (на тех или иных мирах) может существовать жизнь, откуда она и переносится на другие планеты. Исходя из современных представлений об эволюции горячей Вселенной и ее возникновении из сингулярного состояния, жизнь (по крайней мере, в ее молекулярной форме) не могла существовать в ранней Вселенной. Следовательно, если даже теория панспермии может объяснить происхождение жизни на той или иной планете (например, на Земле), она оставляет открытым вопрос о том, как же первоначально возникла жизнь во Вселенной – на каких-то первомирах, откуда она начала потом свое распространение. Сторонники теории панспермии говорят, что *где-то* во Вселенной жизнь *могла* возникнуть из неживой материи. Маловероятно, что это произошло именно на Земле, но на одной из миллиардов планет такой процесс мог бы иметь место.

По сути, речь идет о *случайном* происхождении некоей жизнеспособной формы где-то во Вселенной. Наиболее полный анализ выполнен В.А. Мазуром [12]. Пусть в первобытном океане или «дарвиновской луже» возник концентрированный раствор органических молекул – моносахаридов, липидов, аминокислот и нуклеотидов. Хаотическое тепловое движение этих мономеров привело к случайному синтезу первичной биологической макромолекулы, обладавшей способностью к саморепликации. Это запустило процесс возникновения клеточной жизни. Какова вероятность случайного образования такой молекулы? Простые расчеты показывают, что она ничтожно мала. Причем ничтожно мала не только в масштабах Земли, но и в масштабах всей видимой Вселенной за все время ее существования. Однако, согласно инфляционной космологии, видимая часть Вселенной составляет очень малую часть домена, образовавшегося в пер-

воначальную эпоху экспоненциально быстрого раздувания Вселенной. Чрезвычайно большие размеры домена приводят к тому, что вероятность указанного синтеза *на одной из планет* в масштабах всего домена практически равна единице. Среднее расстояние между обитаемыми планетами в домене много меньше размера домена, но много больше размера горизонта видимой Вселенной. Поэтому вероятность того, что в видимой части Вселенной возникла еще одна первичная макромолекула, практически равна нулю. Означает ли это, что Земля является одной из тех редких планет в домене, где возникла жизнь, и других обитаемых планет внутри горизонта Вселенной не существует? Такой вывод противоречил бы принципу Коперника-Бруно. Но если справедлива гипотеза панспермии, отмечает Мазур, то обитаемых планет внутри горизонта видимости может быть много. Все они, в том числе и жизнь на Земле, должны быть продуктом панспермии одной, первоначально возникшей жизни. Все они, очевидно, должны быть идентичны на молекулярном уровне. Неясным остается вопрос, как может происходить перенос жизни на расстояниях, намного превышающих горизонт Вселенной. По-видимому, единственный способ – использовать кротовые норы.

Против панспермии свидетельствуют так называемые *следовые элементы*. В состав земных организмов помимо основных элементов (Н, С, N, P, S) входят в совершенно ничтожном количестве «следовые» элементы: Mo, Mn, Si, F, Cu, Zn и др. Концентрация их в бактериях, грибах, растениях и сухопутных животных тесно коррелирует с их концентрацией в морской воде. По мнению ряда ученых (Д. Голдсмит, Т. Оуэн и др.), это указывает на то, что жизнь на нашей планете возникла в земных морях, а не была занесена из Космоса. Проблема следовых элементов снимается, если панспермия происходит на уровне продуктов предбиологической эволюции.

Этот процесс рассматривался А.Д. Пановым [13]. Он исходит из того, что жизнь на Земле возникла практически сразу после ее формирования, и времени на предбиологическую эволюцию было слишком мало. Отсюда он делает вывод (выдвигает гипотезу), что предбиологическая эволюция началась давно и протекала на других планетах земного типа около звезд много старше Солнца, а затем продукты предбиологической эволюции были перенесены на Землю в процессе панспермии. Основным источником продуктов предбиологической эволюции, согласно Панову, может быть порода, выбиваемая метеоритами с поверхности планеты, на которой протекает предбиологическая эволюция. Перенос таких продуктов осуществляется проще, чем перенос живых бактерий и они менее подвержены действию разрушающих факторов. Панов рассчитал время, в течение которого продукты предбиологической эволюции, за счет панспермии, распространяются на всю Галактику. Оно оказалось порядка 400 млн. лет (два галактических года – см. рис. 3). Если на некоей планете в результате химической эволюции возникает удачная конкурентоспособная система, то за

время порядка 400 млн. лет она распространится на все планетные системы Галактики. И если на какой-то из них начался свой процесс химической эволюции, продукты его будут подавлены занесенной из Космоса более конкурентоспособной системой – своего рода естественный отбор на уровне продуктов предбиологической эволюции. Эта модель приводит к увеличению вероятности происхождения жизни на много порядков по сравнению с предбиологической эволюцией на любой изолированной планете. Более того, в этой модели жизнь возникает *практически одновременно* на всех планетах, где созрели подходящие условия, и она возникает *на одной молекулярной основе, с единым генетическим кодом и с одной хиральностью*.

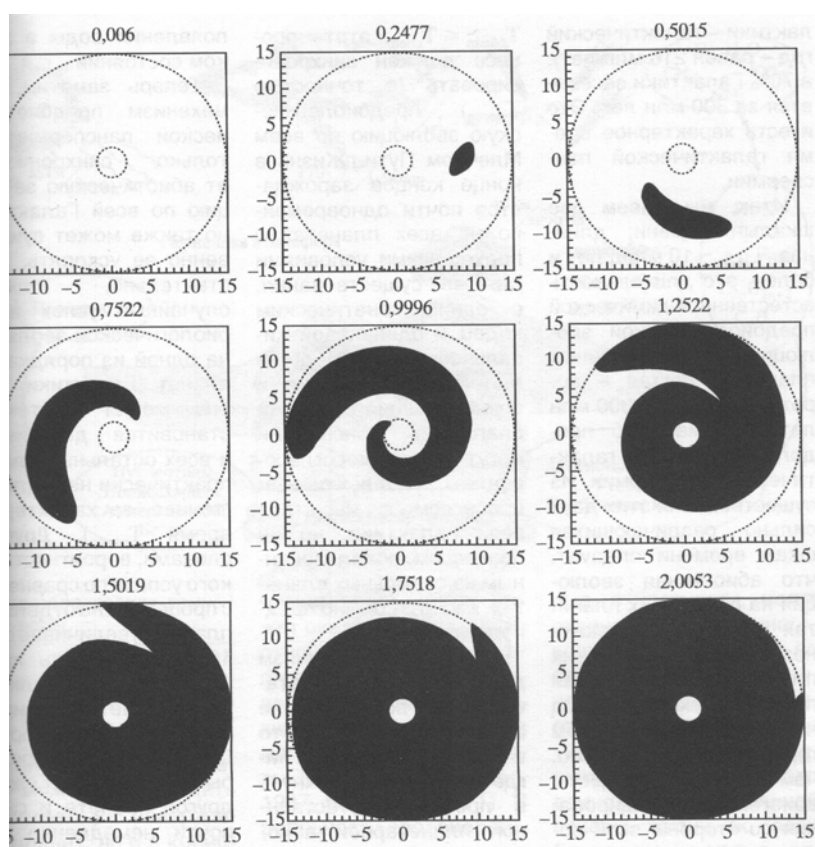


Рис. 3. Модель распространения волны панспермии по диску Галактики по А.Д. Панову [13]. Время, соответствующее приведенным фазам эволюции, указано в галактических годах наверху каждого квадрата.

Гипотеза об одновременном однократном происхождении жизни в Галактике была высказана В.С. Троицким в 1981 году. Затем он вновь вернулся к этой проблеме в статье, которая была опубликована уже после его ухода из жизни [14]. Соображения Троицкого весьма интересны, но они носят чисто умозрительный характер. В работе Панова гипотеза об одновременном самосогласованном происхождении жизни в Галактике обосновывается более строго и совсем из иных соображений. Панов обращает также внимание на то, что синтез сложных органических соединений мо-

жет происходить не только на планетах, но и в молекулярных газопылевых облаках. Реальная предбиологическая эволюция, согласно Панову, может быть результатом сложного взаимодействия процессов, происходящих в открытом космосе и на планетах. Поскольку продукты химической эволюции, как им было показано, достаточно быстро разносятся по всей Галактике, то предбиологическая эволюция в молекулярных облаках также будет самосогласованной.

Для полноты картины упомянем о *направленной панспермии* Крика и Оргела [15]. Согласно этой гипотезе, жизнь занесена на Землю из Космоса, но не в результате естественного процесса, а в результате сознательной деятельности высокоразвитых внеземных существ.

7. Заключение

1. Идея случайного происхождения жизни на Земле (вероятностное чудо!) не имеет оснований и должна быть оставлена.

2. В противоборстве идей панспермии и химической эволюции ни у той, ни у другой нет решающего перевеса. В плане предбиологической эволюции очень важной является концепция возникновения Мира РНК. Но механизм образования первой молекулы РНК и дальнейшие шаги к клеточным структурам пока не ясны. Представляется (субъективная точка зрения автора), что чаша весов склоняется в пользу космического происхождения жизни. По крайней мере, если говорить о происхождении жизни на Земле.

3. Возможно, панспермия осуществляется на уровне продуктов предбиологической эволюции, которая начинается на одной из планет Галактики (или в межзвездной среде) и завершается на других планетах.

Литература

1. *Bradley et al.* Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals – PNAS preprint, 2014.
2. *Шкловский И.С.* Вселенная, жизнь, разум – 5-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, 1980.
3. *Манагадзе Г.Г.* Плазменный факел метеоритного удара – космический фактор нарушения зеркальной симметрии аминокислот // Коллоквиум «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова 21–23 мая 2014. Программа и резюме докладов. М., 2014. С. 17–19.
4. Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. 258 с.
5. *Спирин А.С.* Древний мир РНК // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. С. 43–59.
6. *Розанов А.Ю.* Псевдоморфозы по микробам в метеоритах // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. С. 158–165.
7. *Снытников В.Н.* Астрокатализ – абиогенный синтез и химическая эволюция на догеологических этапах формирования Земли // Проблемы происхождения жизни. М.: ПИН РАН, 2009. С. 79–101.
8. *Бусарев В.В.* Каменно-ледяные тела как возможные инкубаторы первичной жизни // Коллоквиум «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», ГАИШ

- МГУ им. М.В. Ломоносова 21–23 мая 2014. Программа и резюме докладов. М., 2014. С. 10–12.
9. Адушкин В.В., Витязев А.В., Глазачев Д.О., Печерникова Г.В. Экзогенные факторы эволюции Земли, Астрофизика и слабая форма гипотезы панспермии // Коллоквиум «Космические факторы эволюции биосферы и геосферы», ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова 21–23 мая 2014. Программа и резюме докладов. М., 2014. С. 5–6.
 10. Pino S. et al. Entropy. 2013. V.15. P. 5362–5383.
 11. Saladino L. et al. (2012) Chem. Soc. Rev. DO: 10.1039/c2cs35066a.
 12. Мазур В.А. Инфляционная космология и гипотеза случайного самозарождения жизни // ДАН, 2010. Т.431. № 2. С. 183–187.
 13. Панов А.Д. Шкала времени предбиологической эволюции и гипотеза самосогласованного галактического происхождения жизни // Универсальная эволюция и проблема поиска внеземного разума. М.: URSS, Изд. ЛКИ, 2008. С.41-54. Он же. Панспермия и механизмы возникновения жизни во Вселенной // Земля и Вселенная, 2014. № 1. С. 75–82.
 14. Троицкий В.С. Внеземные цивилизации и опыт // Астрономия и современная картина мира. – М.: ИФРАН. 1995. С. 232–246.
 15. Crick F.H.C., Orgel L.E. Directed panspermia // Icarus. 1973. V.19, 3. p. 341–346.

A REVIEW OF IDEAS CONCERNING LIFE ORIGIN: FROM ANCIENT TIMES TO THE PRESENT DAY

Gindilis L.M.

*Sternberg State Astronomical Institute of
Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Since the times of Antiquity the and for a long time the idea of self-origination of life was the dominant one. It reappeared again after microorganisms were discovered (XVII century). The possibility of abiogenesis at microbial level was discussed for more than a century. Pateur demonstrated that spontaneous origination of microorganisms in sterile broth was due to those same microorganisms transported by dust particles. Thus proving that every form of life originates from the parental life form. So the question arises: how did the first microorganisms appear on the Earth. There are three possible versions: 1) accidental origination of a viable form; 2) primal organisms were transported to the Earth from outer space; 3) they were formed on the Earth in the process of prebiotic chemical evolution.

We discuss the problems of prebiotic evolution from simple monomers up to living cells. An important item of nowadays conceptions of life origination is the hypothesis of the ancient world of RNA as possible precursor of life on Earth. The discovery in carbonaceous chondrites of traces of bacterial life evidences the existence of life in the Solar System even before the formation of the Earth.

The idea of life as brought to the Earth out of Cosmos originated under the impression of self-origination hypothesis downfall. It went through several stages (Helmholtz, W. Thompson, XIX century; Arrhenius, early XX century; Hoyle and Wickramasinghe, second half of XX century) and presently evokes constantly growing interest. The panspermia theory does not solve the problem of origination of life, only moves it onto other planets. According to V.A. Mazur, the probability of accidental formation of RNA molecule is negligible not only on the Earth, but in the whole Universe over all the time span of its existence. But it is practically equal to unit in the domain formed at the inflation stage of the evolution of the Universe.

A.D. Panov considered panspermia in the Galaxy at the level of prebiotic evolution products. The quantitative model he has brought forward increases life origination probability by many orders of magnitude in comparison with any isolated planet. In this model the life to originates simultaneously on all the planets with proper conditions on the same molecular basis, one and the same genetic code and the same chirality.

КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ОБИТАЕМОСТИ ЭКЗОПЛАНЕТ

Щекинов Ю.А.¹, Сафонова М.², Мерфи Дж.²

¹ Южный Федеральный Университет, Ростов на Дону

² Индийский Институт Астрофизики, Бангалор, Индия

Введение

Обитаемость планет (английский термин *habitability*) может быть определена как мера способности планеты положить начало жизни и поддерживать ее [1]. Общепринятое требование для того, чтобы планета могла удовлетворять критерию обитаемости с точки зрения жизни, которую мы знаем, – земной жизни – состоит в том, чтобы планета в зоне обитаемости вокруг центральной звезды была твердой, имела бы массу в пределах от 0.1 до 10 масс Земли и имела жидкую воду на поверхности. Другие требования, такие как присутствие на планете углерода, кислорода, азота, фосфора, серы – химических элементов, принципиально важных для построения основанной на углероде жизни, – не являются необходимыми, поскольку весь ряд этих элементов производится звездами, как правило, одновременно, и поэтому требование наличия на поверхности планеты жидкой воды подразумевает присутствия на ней всех перечисленных элементов.

В последние годы были предприняты выдающие усилия для обнаружения и исследования планет в других звездных системах – экзопланет. Наиболее впечатляющие результаты специализированной обсерватории Kepler. В настоящее время обнаружено и подтверждено несколько (около 30) планетных систем с планетами земного типа, находящимися в зонах обитаемости и являющимися, поэтому, потенциальными кандидатами для обнаружения на них жизни. Существенным обстоятельством является то, что обсерватория Kepler была направлена на обнаружение планет в сравнительно близкой окрестности Солнца – в пределах 700 пк, поэтому подавляющая часть "кеплеровских" планет может относиться к молодому населению – населению I типа. Поэтому ожидаемым оказалось то обстоятельство, что среди подтвержденных обитаемых планет примерно половина имеет возраст меньше 3 млрд. лет [2]. Если так, то вполне возможны разочаровывающие отрицательные результаты будущего поиска признаков жизни на планетах этого списка. Фактор возраста планетной системы оказывается, таким образом, чрезвычайно существенным и заслуживающим пристального внимания. Можно, по-видимому, говорить, что возраст планетной системы является столь же важным фактором ее обитаемости, как и наличие жидкой воды на поверхности планеты.

"Эффект металличности"

Общепринято мнение, основанное по существу на интуитивных представлениях, что только звезды населения I с достаточно высоким содержанием "металлов" – тяжелых элементов, могут иметь планетные системы. Действительно, если говорить о планетах земного типа, то тяжелые элементы нужны просто для их "строительства". Не менее важным является и то обстоятельство, что тяжелые элементы определяют термодинамику газа на протозвездных и протопланетных стадиях эволюции, поскольку являются наиболее мощными агентами радиационного остывания газа. При металличности ниже некоторой критической – на 5–6 порядков меньше солнечной – вклад в охлаждение от металлов становится пренебрежимо малым, единственным охладителем оказывается молекулярный водород и его изотопные аналоги, и образование даже маломассивных звезд становится невозможным [3].

На это обстоятельство – возможность существования планетных систем только у звезд с достаточно высоким содержанием тяжелых элементов, – указывает и так называемый "эффект металличности", описанный ранее в [4]. Он проявляется в явном доминировании среди таких планетных систем, центральные звезды которых имеют высокую металличность, как это показано на рис. 1, [5]. Вместе с тем, доля планетных систем с металличностью ниже солнечной составляет около 50% [6]. Более того, обнаружено несколько планетных систем вокруг старых звезд населения II с металличностью на два порядка меньшей солнечного значения и с возрастом, близким к хаббловскому: в 12–13 млрд. лет (см. Табл. 1 в [5]). Доля этих планет по сравнению с планетами в окрестности звезд с нормальной (солнечной) металличностью примерно равна доле звезд населения II в окрестности Солнца: 1.5% по сравнению с 1%, соответственно, [5].

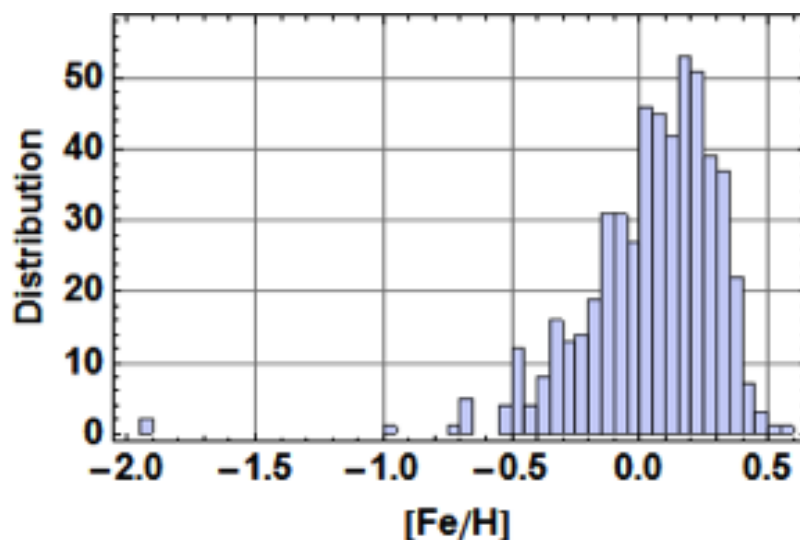


Рис. 1. Распределение звезд, несущих планеты по металличности [5].
В список включены 535 планет из базы данных Extrasolar Planets Encyclopedia (at exoplanets.org).

Это может в принципе означать, что планетные системы распространены в старом звездном населении II также часто, как и среди молодых звезд. В этом смысле "эффект металличности" может быть связан только с наблюдательной селекцией, обусловленной ограниченной чувствительностью обнаружения планет как фотометрическим, так и доплеровским методом – планеты малых масс вносят меньшее возмущение как в вариации блеска центральных звезд, так и в их скорости орбитального вращения. В [5] приведены аргументы в пользу того, что в условиях низкой металличности существуют механизмы селективного разделения пыли и газа за счет центробежных сил с накоплением пыли в кольцевых структурах, которые могут далее давать начало формированию планет. Даже при низкой металличности, например, на 2 порядка меньше солнечного значения, полная масса тяжелых элементов вполне достаточна для формирования планет земного типа вокруг звезд.

Следует отметить в этой связи одно обстоятельство, важное с точки зрения влияния фактора возраста планетных систем на их способность нести жизнь. В последние несколько лет стало понятно, что металличность звезд и галактик является монотонно растущей функцией времени лишь в среднем в больших масштабах. Это связано с неполным перемешиванием вещества в галактиках и межгалактической среде. Впервые на это было обращено внимание в численных исследованиях перемешивания тяжелых элементов в межгалактической среде [7]. Последующие наблюдения подтвердили этот результат для окологалактической среды [8] на красных смещениях около 2 и для межзвездной среды в ранних галактиках [9] в интервале красных смещений от 1 до 5, где вариации металличности могут достигать двух-трех порядков величины. В настоящее время этот вывод подтвержден и для межзвездной среды нашей Галактики [10] с меньшей по величине амплитудой вариаций металличности, которые остаются неперемешанными на временах, способных достигать млрд. лет [11]. Эти результаты, таким образом, показывают, что даже на ранних стадиях эволюции галактик в их межзвездной среде с металличностью в среднем меньшей, чем в современных условиях, могут встречаться "мешки" с высокой распространенностью тяжелых элементов, сравнимой или даже превышающей солнечную. Это означает, что среди старого звездного населения могут встречаться звезды с достаточно высокой, возможно солнечной, металличностью. Образование звезд и планет в таких, аномальных с точки зрения традиционной картины химической эволюции Вселенной, условиях могут протекать так же, как это происходит и на современной стадии эволюции галактик. Это позволяет сделать вывод о том, что в нашей Галактике можно ожидать существования старых планетных систем земного типа с космологическим возрастом.

Фактор возраста для обитаемости планет

Впервые на важность возраста для обитаемости планет было указано в работе [12] и затем в неявной форме его значение подчеркнуто в [13] в связи с обсуждением идеи панспермии. Значение возраста для обитаемости планеты следует из того факта, что в системе химических реакций, критически важных для возникновения живых систем по необходимости присутствуют эндотермические реакции с порогом. Если равновесная температура на планете заметно меньше порога энергии хотя бы одной такой реакции, что даже относительно небольшие вариации температуры могут вызвать в таких условиях сильные вариации характерного времени реакции, поскольку скорости пороговых реакций описываются экспоненциальной зависимостью [2]. Если говорить более конкретно, то можно остановиться на цепочке реакций, приведших к формированию кислородной атмосферы на Земле.

Один из важных элементов, определяющих этот процесс, является фотосинтез. В целом, температурная зависимость совокупности реакций, вовлеченных в этот процесс довольно сложна и чувствительна к внешним условиям [14] с эффективной энергией активации в несколько десятков кДж, что существенно превышает типичную равновесную температуру планет в зонах обитаемости. В таких условиях, как показано в [2], уменьшение равновесной температуры вследствие вариаций физических условий в зоне обитаемости или на самой планете всего на 5% может привести к увеличению характерного времени протекания процесса фотосинтеза в полтора-два раза. В результате этого, если принять для характерного времени формирования кислородной атмосферы на Земле 2 млрд. лет, то в случае уменьшения равновесной температуры на 5% процесс может сместиться на 1–2 млрд. лет вперед. Если принять образование кислородной атмосферы как один из индикаторов биологической эволюции в целом, то такой сдвиг может означать, что возникновение более сложных форм жизни, которые следовали за возникновением на Земле кислородной атмосферы в ее современном виде, будут так же сдвинуты вперед, и таким образом биологическая эволюция в целом затянется. С этой точки зрения следует делать различие между потенциальной обитаемостью и просто обитаемостью. Если, например, следуя [1], характеризовать обитаемость количественно как отношение текущих количественных характеристик жизненно важных физических параметров на планете к таковым на Земле, то может оказаться, что индекс обитаемости будет близким или равным 1, откуда может следовать вывод о почти безусловном существовании жизни на такой планете, как это неявно полагалось первоначально для планеты Gliese 581g. Однако если возраст такой планеты окажется меньше 1–2 млрд. лет, то такой вывод будет просто ошибочным.

Это обстоятельство принципиально важно не только для классификации планет по признаку их обитаемости, но и с практической точки зрения,

если говорить о планировании активных космических экспериментов по обнаружению планет, несущих на себе жизнь в той или иной форме. Например, если говорить о планируемых миссиях EChO (Exoplanetary Characterization Observatory) [15] и FINESSE (Far Infrared Exoplanet Spectroscopy Survey Explorer) [16], следует принимать во внимание, что планетные системы с возрастом центральной звезды меньше 2–3 млрд. лет – минимальный возраст, необходимый для появления первых прокариот, – вряд ли могут демонстрировать следы сколь-нибудь развитой жизни (например, существование протяженной кислородной атмосферы). Если же речь идет о поисках сложной жизни с наблюдаемым в настоящее время на Земле многообразием форм, то начало развития такой жизни на Земле заняло около 4 млрд. лет – этот возраст может приниматься как характерный при планировании стратегии исследования планет с развитой жизнью.

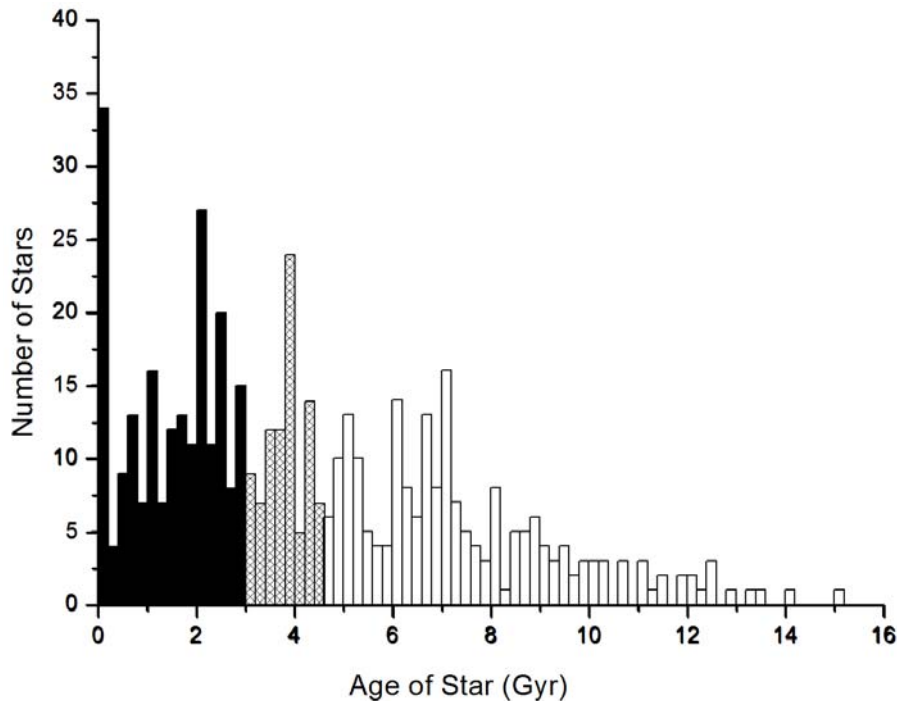


Рис. 2. Распределение звезд, имеющих планетные системы по возрастам.

Черным показаны звезды с возрастом меньше 3 млрд. лет, мелкой штриховкой – звезды с возрастными интервалами от 3 до 4.5 млрд. лет; соотношение числа звезд в трех различных возрастных интервалах 0.43:0.17:0.4 от меньших к большим возрастам; на основе базы данных Extrasolar Planets Encyclopedia (at exoplanets.org).

С этой точки зрения подавляющая часть обнаруженных в зонах обитаемости планет может рассматриваться лишь как потенциально способные нести жизнь, но не достигшие еще минимального критического возраста, когда жизнь действительно начинает развиваться. Это хорошо видно из рис. 2, где приведено распределение звезд с планетными системами по возрастам: 60% из них имеют возраст меньше 4 млрд. лет, а 43% – меньше 3 млрд. лет [2]. Если же говорить о планетах с подтвержденным статусом

планет в зонах обитаемости, то примерно половина из них имеет возраст меньше 3 млрд. лет и поэтому могут рассматриваться лишь как потенциально способные быть обитаемыми [2].

Старые планетные системы

Критерию большого (больше 10 млрд. лет) возраста заведомо удовлетворяют планетные системы вокруг звезд населения II типа. С этой точки зрения именно такие планеты могли бы уверенно нести жизнь, при условии, что они существуют в достаточном количестве и что удовлетворяют основным признакам обитаемости: твердая поверхность и существование жидкой воды на ней.

Тот факт, что они существуют в нашей Галактике в достаточном количестве, следует из простой статистики: относительное количество планетных систем вокруг старых звезд с низкой металличностью в солнечной окрестности, то есть в пределах 600 пк, примерно равно относительному количеству звезд населения II типа в тех же пределах. Если так, то таких старых планетных систем в Галактике по меньшей мере столько же, сколько и молодых планетных систем (в действительности, возможно больше, если принять более высокий темп звездообразования на ранних стадиях эволюции Галактики, см. обсуждение в [2]). Механизмы формирования протопланетных дисков и выделения в них планет земного типа открыт. В работе [5] были обсуждены два механизма, которые могут способствовать выделению планет в условиях низкой (на два порядка меньшей солнечной) металличности: один связан с центробежной селекцией пыли в кольцевые структуры и последующей их гравитационной фрагментацией, другой – с так называемой "мнимой гравитацией", связанной с действием радиационного давления на пылевые частицы и развитие неустойчивости типа Релея-Тейлора. С точки зрения возможного образования планет оба механизма действуют только при низкой металличности.

Следующий вопрос в том, может ли элементный химический состав на таких планетах удовлетворять требованиям, необходимым для формирования твердых планет и воды на их поверхности. Источники тяжелых элементов как на ранних, так и на современных стадиях эволюции Галактики – это взрывы массивных звезд в виде сверхновых. Природа самых первых звезд во Вселенной и в Галактике не до конца понятна, однако, по видимому, эти звезды имели большие массы, чем современные "предсверхновые". К настоящему времени несколько групп провели детальные численные исследования продуктов нуклеосинтеза таких вспышек. Источником наблюдательных данных о химическом составе вещества первых эпизодов обогащения в Галактике могут быть так называемые звезды с экстремально низкой металличностью (например, [17]). Особенностью химического состава этих звезд является избыток в них элементов CNO цикла [18, 19], но в целом их элементный состав близок (с незначительными

отличиями) к элементному составу земной коры и человеческого тела (см. обсуждение в [2]). Такого же типа химический состав предсказан в численных расчетах и для взрывов звезд населения III типа в виде сверхновых [20]. С этой точки зрения планетные системы вокруг старых звезд вполне могут удовлетворять всем критериям обитаемости, хотя в настоящее время планетные системы этого класса не исследовались.

Возможности наблюдательного исследования старых планетных систем

Кажется практически невозможным обнаружить планету с достаточно высоким показателем обитаемости среди планетных систем вокруг звезд населения II. В самом деле, как уже было сказано, число таких планетных систем в солнечной окрестности, которая в настоящее время (и, по-видимому, в близком будущем) только и доступна для исследования планетных систем, составляет около 1–2%. С другой стороны, среди всех установленных планетных систем число планет в зонах обитаемости составляет около 5% (в любом случае, по-видимому, вряд ли заметно больше). Поэтому вероятность обнаружения планеты в зоне обитаемости вокруг старой звезды около 0.1%. Учитывая ограниченную чувствительность современных наблюдательных подходов, обнаружение планеты земного типа кажется почти невероятным.

Вместе с тем, ситуация не кажется полностью безнадежной (см. подробное обсуждение в [2]). Если рассмотреть возможность существования планетных систем вокруг звезд населения II (или даже более старого промежуточного между II и III типами) с экстремально низкой металличностью, то можно говорить (хотя на современном уровне – это скорее фантазии) о прямых спектральных наблюдениях планет вокруг таких звезд. Дело в том, что эти звезды – звезды с экстремально низкой металличностью – являются звездами малых масс. Это M и K карлики с массами около 0.5–0.8 солнечных масс, поэтому, если вокруг такой звезды обращается сверх-Земля, то есть планета с массой в 5 масс Земли, то поток излучения от нее в ближней инфракрасной области может быть всего в 300 раз меньше потока от центральной звезды. Обнаружение такого потока, разумеется, вряд ли возможно, но есть одно обстоятельство, которое делает прямые наблюдения таких планетных систем, тем не менее, возможным. Оно связано с тем, что если на планете (сверх-Земле) уже возник и достаточно хорошо развился биогенезис, то в ее атмосфере будут присутствовать молекулы метаболитических циклов, в том числе, например, кислород и метан. В атмосфере звезды, если это не холодная и плотная атмосфера красного гиганта, молекулы не образуются. Поэтому эмиссия в молекулярных полосах молекулярного кислорода, озона, воды, метана или других молекул метаболитического цикла в спектре звезды-карлика населения II может свидетель-

ствовать о существовании вокруг нее планеты с уже протекающим на ней биогенезом.

Количество таких звезд в солнечной окрестности в 500 пк оценивается величиной 250 000 [18], поэтому расстояние от Солнца до ближайшей такой звезды может составлять около 10 пк. В таком случае величина потока от такой планеты сверх-земли в ближней инфракрасной области (вблизи 10 мкм) может составлять около 1 милли Янского [2], что позволяет оценивать возможности их прямого наблюдения достаточно оптимистично.

Литература

1. *Schulze-Makuch, D., Méndez, A., Fairén, A.D., von Paris, P., Turse, C., Boyer, G., Davila, A.F., de Sousa António, M.R., Catling, D., and Irwin, L.N.* *Astrobiology*, 11, 1041 (2011).
2. *Shchekinov Yu., Safonova M., Murthy J.*, *Astrophys. Space Sci.* (2014) submitted.
3. *Udri S., Santos N.C.*, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.*, 45, 397 (2007).
4. *Omukai K., Tsuribe T., Schneider R., Ferrara A.*, *Astrophys. J.*, 626, 627 (2005).
5. *Shchekinov Yu., Safonova M., Murthy J.*, *Astrophys. Space Sci.*, 346, 31 (2013).
6. *Setiawan J., Roccatagliata V., Fedele D., et al.*, *Astron. and Astrophys.*, (2012).
7. *Дедиков С.Ю., Щеквинов Ю.А.*, *Астрон. ж.*, (2004).
8. *Simcoe R.A., Sargent W.L.W., Rauch M., Becker G.*, *Astrophys. J.*, 637, 648 (2006).
9. *Savaglio S.*, in: *Hunt L.K., Madden S., Schneider R.*, eds. *Proc. IAU*, p. 119 (2008).
10. *Luck R.E., Kovtyukh V.V., Andrievsky S.M.*, *Astron. J.*, 132, 902 (2006).
11. *Karitskaya E.A., Bochkarev N.G., Shimansky V.V., Galazutdinov G.A.*, *Astron. Soc. Pacif. Conf.*, 445, 335 (2011).
12. *Huang S.-S.*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, 71, 421 (1959).
13. *Crick F.H.C., Orgel L.E.*, *Icarus*, 19, 341 (1973).
14. *Hikosaka K., Ishikawa K., Borjigidai A., Muller O., Onoda Y.*, *J. Exper. Botany*. 57, 291 (2006).
15. *Drossart P., Hartogh P., Isaak K., et al.*, *AAS/Division for Planetary Science Meeting Abstracts*, 45, # 211.25 (2013).
16. *Swain M.R.*, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 42, 1064 (2010)
17. *Beers T.C., Christlieb N.*, *Annu. Rev. Astron. Astroph.*, 43, 531 (2005).
18. *Aoki W., et al.*, *Astrophys. J.*, 639, 897 (2006).
19. *Ito H., et al.*, *Astrophys. J.*, 773, 33 (2013).
20. *Umeda H., Nomoto K.*, *Astrophys. J.*, 619, 427 (2007).

COSMOLOGICAL ASPECTS OF HABITABILITY OF EXOPLANETS

Shchekinov Yu.A.¹, Safonova M.² and Murphy J.²

¹*Southern Federal University, Russia*

²*Indian Institute of Astrophysics, India*

Habitable zone (HZ) defines the region around a star within which planets may support liquid water at their surfaces, which is supposed to be the necessary factor for origination and development of life on the planet. Currently we know about 30 planets inside HZ. The most interesting question is that of possibility of existence of complex life on the planets. As several space-based project aimed at searching of traces of life at exoplanets are presently being

worked out, the problem of elaboration of criteria for selection out of the list of planets inside HZ those which most probably host life acquires supreme importance.

It is usually implicitly assumed that planets inside HZ may host life, not taking into consideration such an important factor as the planet age. On the other hand the crucial importance of the factor meets the eye immediately. In fact, if we consider a life similar to that on the Earth, it is obvious, that planets younger than 1 Gyr can hardly bear even primitive life-forms because life needs time to originate and develop.

Moreover, as a part of biochemical and metabolic processes are endothermic, and, therefore, threshold, the process of life origination may prove extremely sensitive even to tiny HZ parameter variations. Still a most of the discovered planets are known to orbit young stars (stellar population I), no older than several millions of years. So a considerable number of planets sure HZ inhabitants may prove too young to be really inhabitable.

On the other hand, 12–13 Gyr old planetary systems (population II) may happen to be more probable bearers of life. In spite of the fact that such systems are, in the average more distant from us than the population I stars, estimations of possibility of direct detection of traces of metabolism on those systems are quite optimistic, if we bear in mind planetary systems of old low-mass K-stars.

КАМЕННО-ЛЕДЯНЫЕ ТЕЛА КАК ВОЗМОЖНЫЕ ИНКУБАТОРЫ ПЕРВИЧНОЙ ЖИЗНИ

Бусарев В.В.

*Государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный Астрономический Институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия*

Только что опубликованы сенсационные результаты исследований условий возникновения жизни, выполненные российско-итальянской группой по радиационной биологии в ОИЯИ (г. Дубна) [1]. Их суть в том, что широко распространенные в межзвездной среде трехатомные молекулы – цианистоводородная кислота HCN и вода H₂O, а также производный от них формамид (NH₂COH) – лежат в основе зарождения жизни. Изучение химии формамида в пребиотической среде (при наличии катализаторов), в условиях, совместимых с земными, показало, что происходит одновременный синтез соединений, представляющих потенциал для развития прегенетики (на основе РНК и ДНК) и преметаболизма, на которых базируется земная форма жизни. Важно подчеркнуть, что такой синтез является абиотическим и происходит в одной и той же химической среде [1, 2]. Значительная распространенность формамида в Космосе делает такие условия практически универсальными. Установлению этих фактов способствовало изучение и использование наблюдательных характеристик формамида, таких как его диагностические полосы поглощения в инфракрасном (у 4 и 6 мкм) и в миллиметровом (у 1, 2 и 3 мм, 65–280 GHz) диапазонах (напр., [3, 4]).

Однако очевидно, что обозначенный путь возникновения внеземной жизни в открытой межзвездной среде не мог достичь своего логического конца. Последующие этапы предполагаемого биологического синтеза нуждались в защите от жестких космических факторов и наличия температурных условий для появления жидкой воды, катализаторов (напр., глинистых и других соединений) и т. п. (напр. [5]). Такие условия могли реализоваться только на планетных телах и/или в их недрах. На основе наблюдений [6, 7] и расчетов [8] автором было показано, что такими объектами в ранней Солнечной системе, где в течение первых нескольких миллионов лет могли возникнуть перечисленные условия для внеземного самозарождения жизни, были каменно-ледяные тела, точнее – их недра. Распад короткоживущих изотопов (в первую очередь ²⁶Al) в силикатной компоненте вещества стал основным энергетическим источником для образования на таких телах внутренней водной среды или даже водного океана [8], где было возможно появление первичной жизни. Подобные ранние процессы образования внутреннего водного океана, водной дифференциации и образования силикатно-органических ядер должны были протекать на всех

крупных каменно-ледяных телах Солнечной системы за границей конденсации водяного льда, в частности, в зоне формирования Юпитера. Причем, с учетом более высокого содержания силикатов и, следовательно, ^{26}Al можно предполагать, что в силикатно-органических ядрах тел юпитерианской зоны были более высокие температуры и имелись более благоприятные условия для образования и аккумуляции не только гидросиликатов и простейшего органического вещества (типа керогена или битума), но и возникновения предбиологических соединений, например, аминокислот, или даже простейших биологических структур. Последовательность ранней тепловой эволюции рассматриваемых тел при распаде ^{26}Al можно себе представлять как постепенный разогрев каменно-ледяных тел, который должен был начаться еще в первичных бесформенных, но гравитационно-связанных планетезималиях. На рисунке 1а изображен одного из таких тел, с размерами от метрового до километрового размера, аккреция которых привела к формированию последовательности более крупных объектов, вплоть до протопланетных.

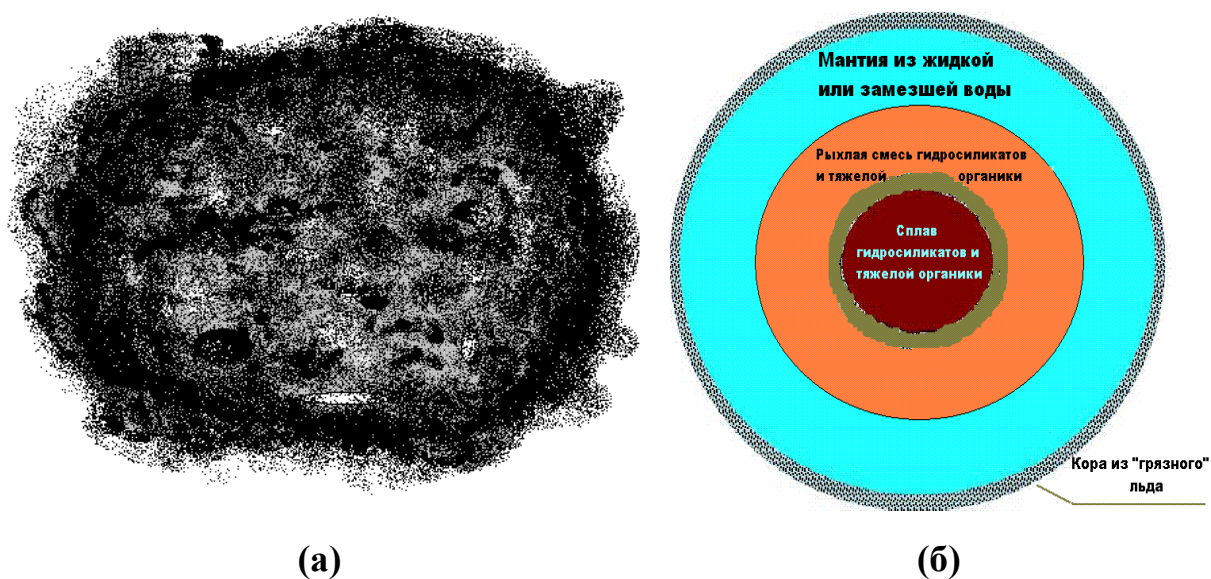


Рисунок 1.

В то же время, разогрев вещества таких тел радиогенным источником тепла должен был привести к внутренним структурным изменениям. При накоплении достаточного количества тепла в недрах этих тел, вероятно, произошло относительно быстрое таяние пористого аморфного льда и образование обильной внутренней водной среды, что, в свою очередь, должно было привести к разделению тяжелой (минеральной, металлической и пр.) и легкой водяной и углеродистой фракций вещества (Рис. 1б). В качестве проявления таких структурных изменений можно считать образование сфероидальной формы у крупнейших из сохранившихся родительских тел

астероидов примитивных типов, таких как Веста, Паллада и некоторых других (напр., [9]).

Примерно в тот же период масса ядра прото-Юпитера должна была достичь ~5–10 масс Земли и аккреция им каменно-ледяных тел сменилась их преобладающим выбросом за пределы его зоны формирования – как во внешнюю, так и во внутреннюю части Солнечной системы [10, 11]. Диапазон относительных скоростей тел, проникавших в зону астероидов, оценивается примерно от 2–3 км/с до 30 км/с [11]. Их прямые столкновения с самыми высокими скоростями с родительскими телами астероидов должны были приводить к практически полному «выметанию» последних из Главного пояса. Такой предельный случай ударного взаимодействия тел расценивался как основной механизм удаления преобладающей массы вещества из зоны астероидов [10, 11]. Но как показывают расчеты и эксперименты, при любых вариантах столкновений тел в окрестности эпицентра удара всегда остается какая-то часть материала как "мишени", так и "ударника". Это означает, что наряду с удалением вещества из зоны астероидов при столкновениях тел происходила и его доставка. Под «доставленным веществом» мы понимаем раздробленное вещество тел из зоны Юпитера (от крупных фрагментов до пыли, включая водяной лед), оставшееся в зоне астероидов после столкновений. Очевидно, что доля «доставленного вещества» должна была быть наибольшей в случаях столкновений рассматриваемых тел при минимальных скоростях. Кроме того, относительно невысокие скорости столкновений были более благоприятны и для сохранения низкотемпературных материалов типа водяного льда, гидросиликатов и органики. Здесь важно подчеркнуть, что тела из зоны Юпитера, которые проникали в Главный пояс с минимальными скоростями, имели наибольшую вероятность столкновений с родительскими телами астероидов, поскольку двигались по орбитам с меньшими эксцентриситетами и могли чаще и большее количество раз сближаться с астероидными телами, чем те из них, что обладали высокими скоростями и перемещались по более вытянутым орбитам.

Сохранившиеся после катастрофических ударов крупные фрагменты тел из зоны Юпитера в случае потери большей части кинетической энергии могли остаться в Главном поясе и пополнить число примитивных астероидов (С-, В-, F- и других типов), имеющих низкотемпературную минералогию. А их частично переработанные в ударном процессе пыль и более мелкие осколки (ледяного и углистого состава, включающего гидросиликаты) могли выпасть на ближайшие родительские тела астероидов или их фрагменты. Отметим, что на этом сценарии основана наша гипотеза образования астероидов С-типа и формирования вещества, подобного углистым хондритам [12]. Отметим ряд наиболее важных свойств углистых хондритов, которые подтверждают нашу гипотезу об их происхождении. Подчеркнем, что в соответствии с основными результатами исследований,

углистые хондриты химических групп CI и CM – это самые примитивные геологические соединения Солнечной системы, температуры которых никогда не превосходили 150°C [13]. Они и имеют солнечный состав (без учета H и He) [14]. В матрице CI углистых хондритов нет хондр (более высокотемпературных округлых включений субсантиметровых размеров), и она состоит только из водно-измененных аморфных гидросиликатов, которые могли образоваться в обильной водной среде [13]. Следуя гипотезе Юри [15], мы полагаем, что хондры в углистых хондритах возникли при ударных событиях, как капли ударно-расплавленного вещества, затвердевшие во время свободного полета до падения на поверхность ближайшего небесного тела. Это предположение подтверждается и результатами последних работ (напр., [16]). Еще одной важной особенностью является малое число аминокислот в углистых хондритах группы CI, что согласуется с их предельной примитивностью. В то же время CM углистые хондриты содержат до 80 видов аминокислот [17], которые можно рассматривать как продукты дальнейшего усложнения предбиологических соединений в родительских телах этих метеоритов, а именно астероидах C- и близких к ним B-, F- и G-типов. Кроме того, аминокислоты в CI-CM углистых хондритах имеют признаки частичной гомохиральности, что их сближает с биологическими структурами. Выдвигается предположение, что гомохиральность органических соединений в углистых хондритах может быть результатом воздействия водной среды [18]. В то же время имеются экспериментальные доказательства возникновения частичной гомохиральности в органике ударного происхождения в результате воздействия однонаправленного магнитного поля в плазменном факеле ударного взрыва при столкновениях тел примитивного состава со скоростями порядка нескольких км/с, типичных для столкновений тел астероидных размеров [19].

Таким образом, как следует из нашей гипотезы формирования углистых хондритов и астероидов C-типа [12], наиболее примитивные группы CI могут быть фрагментами каменно-ледяных тел из зоны роста Юпитера, а углистые хондриты CM- и других типов, возможно, представляют собой более переработанные фрагменты того же исходного углистого вещества из зоны роста Юпитера или вещества с периферии Главного пояса астероидов, включающего водяной лед. Следует отметить, что процесс водных изменений мог продолжиться уже на астероидах, в случае захоронения в их недрах водяного льда после периода их интенсивных столкновений с каменно-ледяными телами. На основании хорошего совпадения спектров отражения почти всех астероидов C-B-F-G-типов и спектров отражения тех или иных образцов углистых хондритов можно утверждать, что последние являются фрагментами первых (напр., [20, 21]).

Численное моделирование показало, что реакция серпентинизации или преобразования безводных силикатов типа пироксенов и оливинов в гидросиликаты типа серпентинов является экзотермической, то есть,

начавшись, происходит при выделении такого количества тепла, которое достаточно для полного таяния имеющегося водяного льда. Кроме того, в этом процессе происходит значительное выделение газов (CH_4 и H_2), что могло привести при их накоплении в недрах к взрыву и разрушению эволюционирующих планетных тел [22, 23]. На рисунке 2 схематически представлен процесс последовательных водных изменений изначально безводного вещества астероида в случае ударного захоронения в его недрах водяного льда и его последующего таяния при выделении радиогенного тепла.

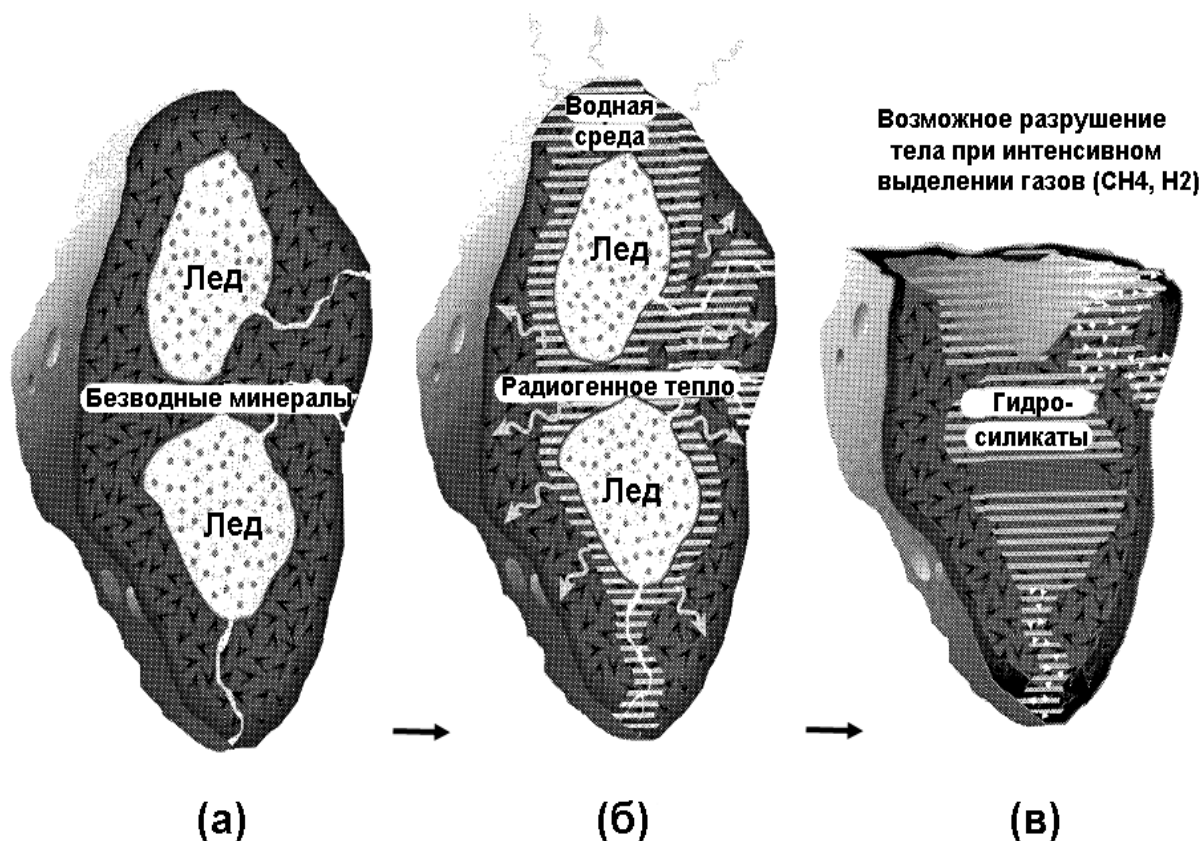


Рисунок 2.

Необходимо подчеркнуть, что возможность наличия сохранившегося захороненного льда в недрах астероидов подтверждается обнаружениями кометной активности на нескольких астероидах Главного пояса (напр., [24–26]).

В соответствии с законом сохранения количества движения преобладающая масса фрагментов тел из юпитерианской зоны должна была двигаться в направлении к центру Солнечной системы и, вероятно, достигла планет земной группы. Эффекты Пойнтинга-Робертсона и Ярковского по-видимому, были основными факторами переноса такого раздробленного вещества в центральном направлении. Интенсивность потока раздробленного примитивного вещества, направленного к протопланетам земной группы, возможно, была максимальной в период проникновения в Глав-

ный пояс астероидов водно-дифференцированных каменно-ледяных тел из зоны формирования Юпитера (в пределах первых ~10 млн. лет). Но очевидно, что по причине продолжающихся интенсивных взаимных столкновений астероидных тел процесс переноса вещества каменно-ледяных тел внутрь Солнечной системы мог растянуться на десятки и даже сотни миллионов лет. Таким образом, развитие предполагаемой простейшей жизни, начавшееся в недрах каменно-ледяных тел, могло продолжиться на более крупных планетных телах земного типа с подходящими условиями.

Литература

1. *Саладино Р., Ботта Дж., Дельфино М., Ди Мауро Э., Капралов М., Тимошенко Г., Красавин Е., Розанов А.* Образование пребиотических соединений формамида при облучении ускоренными частицами высоких энергий // *Новости ОИЯИ* [ISSN 0134-4811], http://www1.jinr.ru/News/News_4_2013.
2. *Saladino R., Botta G., Pino S., Costanzo G., Di Mauro E.* Genetics First or Metabolism First? The Formamide Clue // *Chemical Society Review*. 2012. V. 41. P. 5526–5565.
3. *Rubin R.H., Benson R.C., Tigelaar H.L., Flygare W.H.* Microwave detection of interstellar formamide // *Mémoires Soc. Royale des Sci. de Liège*. 1972. T. III. P. 471–474.
4. *Halfen D.T., Ilyushin V., Ziurys L.M.* (2011) Formation of peptide bonds in space: A comprehensive study of formamide and acetamide in Sgr B2(N) // *Astrophys. J.*, 743: 60 (12 pp.).
5. *Мухин Л.М.* Условия на поверхности Земли 4–4,6 млрд. лет назад. Первичные синтезы / В сб.: Проблемы происхождения жизни (Под ред. А.И. Григорьева и др.), М.: ПИН РАН, 2009. С. 120–130.
6. *Бусарев В.В.* Гидратированные силикаты на астероидах М-, S- и E- типов как возможные следы столкновений с телами из зоны роста Юпитера // *Астрон. вестн.* 2002. Т. 36. С. 39–47.
7. *Бусарев В.В.* Спектрофотометрия астероидов и ее приложения / Саарбрюккен: LAP LAMBERT Acad. Publish. GmbH & Co. KG, 2011.
8. *Busarev V.V., Dorofeeva V.A., Makalkin A.B.* Hydrated silicates on Edgeworth-Kuiper objects – probable ways of formation // *Earth, Moon and Planets*. 2003. V. 92. P. 345–357.
9. *Thomas P.C., Parker J.Wm., McFadden L.A., Russell C.T., Stern S.A., Sykes M.V., Young E.F.* Differentiation of the asteroid Ceres as revealed by its shape // *Nature*. 2005. V. 437. P. 224–226.
10. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет / М.: Наука, 1969.
11. *Сафронов В.С., Зиглина И.Н.* Происхождение пояса астероидов // *Астрон. вестн.* 1991. Т. 25. С. 190–199.
12. *Бусарев В.В.* Гипотеза о происхождении углистых хондритов на малых телах и ее подтверждения // *Вестн. Сиб. гос. аэрокосмического ун-та*. 2011. №6(39). С. 70–76.
13. *Zolensky M., Barrett R., Browning L.* Mineralogy and composition of matrix and chondrule rims in carbonaceous chondrites // *Geochim. & Cosmochim. Acta*. 1993. V. 57. P. 3123–3148.
14. *Anders E., Grevesse N.* Abundance of the elements: Meteoritic and solar // *Geochim. & Cosmochim. Acta*. 1989. V. 53. P. 197–214.
15. *Urey H.C.* Chemical fractionation in the meteorites and the abundance of the elements // *Geochim. & Cosmochim. Acta*. 1952. V. 2. P. 269–282.

16. Fedkin A.V., Grossman L. Vapor saturation of sodium: Key to unlocking the origin of chondrules // *Geochim. & Cosmochim. Acta*. 2013. V. 112. P. 226–250.
17. Pizzarello S., Cooper G.W., Flynn G.J. (2006) The nature and distribution of the organic material in carbonaceous chondrites and interplanetary dust particles // *Meteorites and the early solar system II* / Eds Lauretta D. S. and McSween H. Y. Jr., Tucson: University of Arizona Press, p. 625–651.
18. Aponte J.C., Tarozo R., Alexandre M.R., Alexander C. M.O'D., Charnley S.B., Hallmann C., Summons R.E., Huang Y. Chirality of meteoritic free and IOM-derived monocarboxylic acids and implications for prebiotic organic synthesis // *Geochim. & Cosmochim. Acta*. 2014. V. 131. P. 1–12.
19. Managadze G.G. The synthesis of organic molecules in laser plasma similar to the plasma that emerges in hypervelocity collisions of matter at the early evolutionary stage of the Earth and interstellar clouds // *J. Exp. Theor. Phys.* 2003. V. 97. P. 49–60.
20. Gaffey M.J., Bell J.F., Cruikshank D.P. (1989) Reflectance spectroscopy and asteroid surface mineralogy // *Asteroids II* / Eds Binzel R.P., Gehrels T. and Matthews M. S. Tucson: Univ. of Arizona Press. P. 98–127.
21. Clark B.E., Binzel R.P., Howell E.S. and 12 co-authors. Asteroid (101955) 1999 RQ36: Spectroscopy from 0.4 to 2.4 μm and meteorite analogs // *Icarus*. 2011. V. 216. P. 462–475.
22. Zolensky M.E., Bourcier W.L., Gooding J.L. (1989) Aqueous alteration on the hydrous asteroids: Results of EQ3/6 computer simulations // *Icarus*, v. 78, p. 411–425.
23. Brearley A.J. (2006) The action of water // *Meteorites and the early solar system II* / Eds Lauretta D. S. and McSween H.Y. Jr., Tucson: Univ. of Arizona Press, p. 587–624.
24. Rivkin A.S., Emery J.P. Detection of ice and organics on an asteroid surface // *Nature* 2010. V. 464. P. 1322–1323.
25. Rivkin A.S., Emery J.P., Howell E.S. Ice on low albedo asteroids. More widespread than previously thought? // *Asteroids, comets, Meteors* (2012), 2012. Abstract #6082.
26. Jewitt D., Guilbert-Lepoutre A. Limits to ice on asteroids (24) Themis and (65) Cybele // *Astron. J.* 2012. 143. 21 (8 pp.).

STONE-ICE BODIES AS POSSIBLE INCUBATORS OF A PRIMARY LIFE

Busarev V.V.

Moscow State University, Sternberg Astronomical Institute, Russia

Widespread in the interstellar medium three-atomic molecules of HCN and H₂O and derivative formamid (NH₂COH) are the basis for the origin of life. It is shown that irradiation of formamid by protons in the presence of terrestrial mineral and meteoritic catalysts in conditions compatible with terrestrial leads to simultaneous synthesis of a wide range of compounds (amino acids, heterocycles, alcohols, amides, sugars, etc.) having potential to develop as genetics (based on RNA and DNA), and metabolism underlying terrestrial life forms [1, 2]. However, the intended path of extraterrestrial origin of life in the open interstellar medium could not reach its logical end. The subsequent stages of the assumed biological synthesis needed protection from the harsh cosmic factors and presence of liquid water, catalysts, etc. (e.g., [3]). Such conditions could be realized only on planetary bodies and/or in their interiors. On the basis of observations and calculations, the author suggested that the objects were in the early Solar system. Such could be stone-ice bodies.

МИГРАЦИЯ МОЛЕКУЛ И ПЫЛИ ВО ВСЕЛЕННОЙ. ПРЕДЕЛЫ ПАНСПЕРМИИ

Бочкарев Н.Г.

ГАИШ МГУ им. М.В. Ломоносова

Перечислены типы астрономических объектов, в которых можно ожидать присутствия молекул. Конспективно изложено, как могут перемещаться молекулы вне планетных систем. Описаны свойства межзвездных молекулярных облаков, строение межзвездных пылинок, наблюдаемые проявления полициклических ароматических углеводородов и фуллеренов, эволюция космических пылинок, пылевая компонента межзвездного ветра, возможные механизмы миграции молекул и пылинок в масштабах от планетной системы до галактик, гипотеза Хойла-Викрамасингха о биологической природе некоторых пылинок и пределы миграции молекул и пылинок во Вселенной, верхний предел области, в которой может иметь место панспермия.

Об универсальности химических процессов в космосе

В лабораторных экспериментах по химии межзвездной среды (МЗ) при любых источниках энергии (нагрев, жесткое излучение, электрические разряды) образуются похожие наборы молекул подобные найденным в МЗ облаках.

Вероятно, сама структура электронных оболочек атомов, обильно представленных во Вселенной, такова, что практически при любых неравновесных условиях в широком диапазоне температур и плотностей, характерных как для МЗ среды, так и для планет, образуются предбиологические соединения на углеродной основе. По-видимому, углеродная основа жизни заложена в структуре атомов.

Где можно ожидать присутствие сложных молекул?

- на планетах и их спутниках, имеющих атмосферы;
- в кометах;
- в астероидах и спутниках планет с теплыми жидкими ядрами;
- в протопланетных дисках;
- в оттекающих околозвездных оболочках;
- в газовой компоненте молекулярных облаков;
- внутри и на поверхности межзвездных пылинок;
- в атмосферах наиболее холодных звезд:
 - маломассивных коричневых карликов;
 - остывших до $T = 300\text{--}500\text{ K}$ белых карликов;
 - холодных нейтронных звезд (?).

Как могут перемещаться сложные молекулы вне планетных систем?

Молекулы, кроме наиболее устойчивых, быстро (за 10–10000 лет) разрушаются УФ излучением звезд.

Нужны «транспортные средства», защищающие их. Какие они?:

- Внутри молекулярного облака молекулы могут медленно мигрировать вместе с облаками к центру галактики.
- Внутри МЗ пылинок (защита не сильная).
- Внутри метеоритных тел, комет и т.д. – вместе с телами этого типа «блуждающими» между планетными системами.
- Вместе с блуждающими между галактиками звездами (с их планетными системами) и звездными скоплениями (их мало?).
- Вместе с галактиками при взаимодействии их др. с др.: при гравитационных возмущениях, столкновениях и слияниях галактик (очень интенсивный процесс!).
- А может быть и через гипотетические «кротовые норы»? [1].

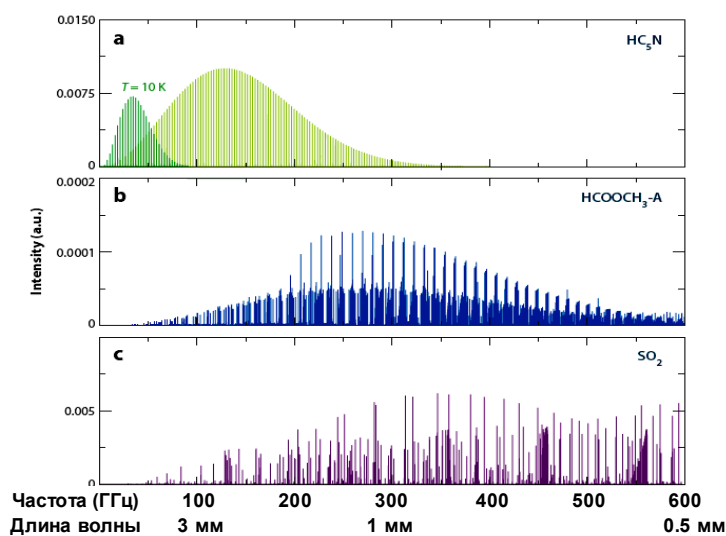


Рис. 1. Спектры излучения молекул ($T = 150\text{ K}$). На верхней части рисунка также показан спектр излучения молекулы HC_5N при температуре $T = 10\text{ K}$.

Молекулярные облака межзвездной среды галактик:

- содержат основную часть молекул Вселенной (по массе и по наблюдаемому астрономическими методами разнообразию);
- состоят из газа (атомы, молекулы, их ионы – 99% массы), пыли (1%) + магнитных полей, космических лучей (КЛ), электромагнитного излучения;
- холодные (10–30 K, внешние части – до 150 K), поэтому они излучают в миллиметровых и субмиллиметровых *вращательных линиях молекул* (Рис. 1), наблюдения которых является основным методом изучения межзвездных молекул и их изотопических вариантов;

- очень разрежены (плотность 10^{-18} – 10^{-22} г/см³, концентрация частиц 10^2 – 10^6 см⁻³).

Очень сильное отличие физических условий в молекулярных облаках от лабораторных приводит к тому, что в них преобладают химические процессы, отличающиеся от лабораторных.

Строение межзвездных пылинок

Они состоят из (рис. 2):

1. мелких кристаллических или аморфных тугоплавких плотных ядер;
2. намерзших на них оболочек т.н. «грязного льда»: молекул воды, метана, формальдегида и др. летучих соединений;
3. пленки высокомолекулярных соединений, которые могут образовываться из «грязного льда» при реакциях полимеризации происходящих при температуре пыли $T \sim 20$ К за счет явления квантовомеханического туннелирования [2, 3].

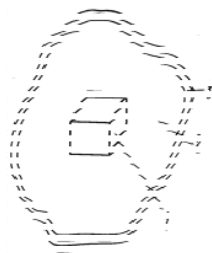


Рис. 2. Схема, показывающая строение межзвездной пылинки:
1 – кристаллическое ядрышко размером сотые доли мкм;
2 – оболочка грязного льда;
3 – пленка из высокомолекулярных соединений.

Характерный размер ядрышек 0.01–0.05 мкм, а рыхлой оболочки грязного льда $\sim 0,1$ мкм.

Полициклические ароматические углеводороды (ПАУ)

ПАУ – это плоские молекулы, состоящие из нескольких (рис. 3) или многих (рис. 5) бензольных колец или иными словами фрагменты пленок графена.

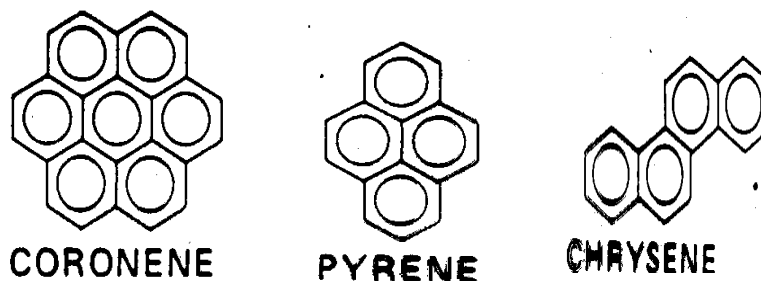


Рис. 3. Примеры простых ПАУ.

ПАУ обнаружены по повторяющимся в различных туманностях инфракрасным (ИК) линиям поглощения или излучения (рис. 4).

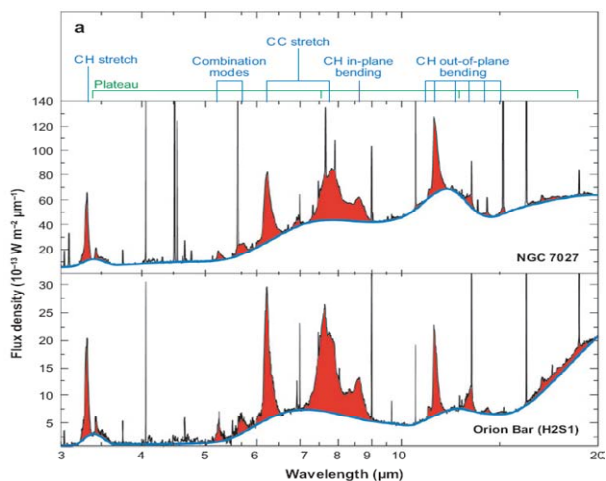


Рис. 4. Инфракрасные спектры двух туманностей. Красным выделены детали, отождествляемые с ПАУ.

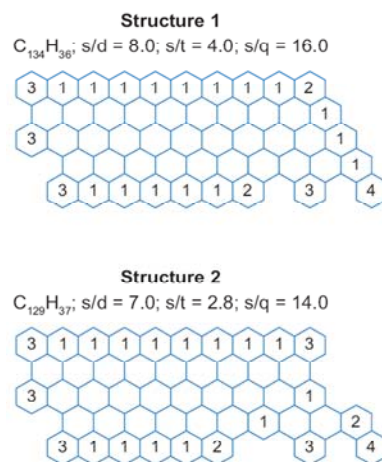


Рис. 5. Примеры структур ПАУ, изгибные колебания которых воспроизводят наблюдаемое многообразие профилей межзвездных ИК полос 11.2 и 12.7 мкм.

На долю ПАУ приходится около 4% массы всей пыли в галактиках богатых тяжелыми элементами.

Спектральные линии, принадлежащие ПАУ, являются широкими, что приводит к тому, что невозможно точно установить какие именно ПАУ формируют наблюдаемые ИК полосы.

Примеры структур ПАУ, изгибные колебания которых воспроизводят наблюдаемые профили межзвездных ИК полос 11.2 и 12.7 мкм показаны на рис. 5.

За счет водородных связей молекулы ПАУ образуют кластеры, которые слипаясь между собой, создают наночастицы аморфного углерода (рис. 6).

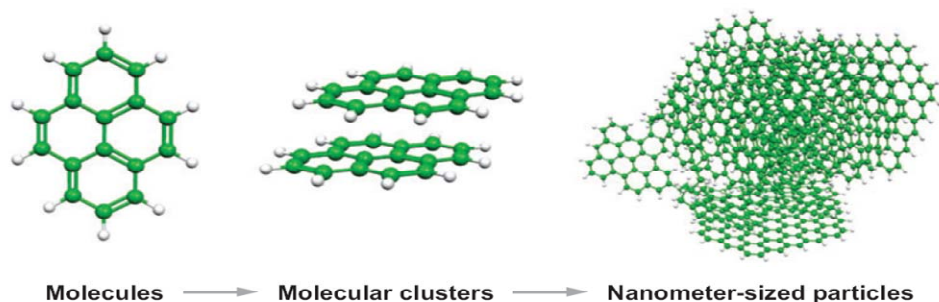


Рис. 6. Кластеры ПАУ – мост между молекулами и наночастицами аморфного углерода.

Фуллерены

Другим типом многоатомных молекул распространенных в МЗ среде являются фуллерены – сферические оболочки, состоящие из атомов углерода (рис. 7).

За открытие (1985 г.) и изучение фуллеренов R. Crul, H. Kroto, R. Smalley получили Нобелевскую премию по химии 1996 г. Надежное сви-

детельство присутствия фуллеренов C_{60} и C_{70} в МЗ среде получено в 2012 году, когда в спектре одной из туманностей были отождествлены по 4 ИК спектральные линии каждого из них (рис. 8).

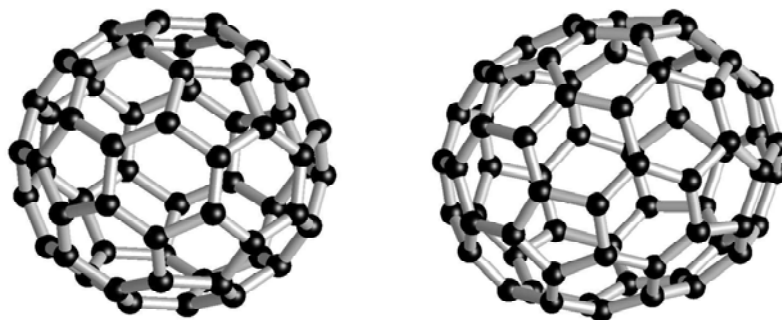


Рис. 7. Молекулярная структура фуллеренов C_{60} и C_{70} , найденных в МЗ среде.

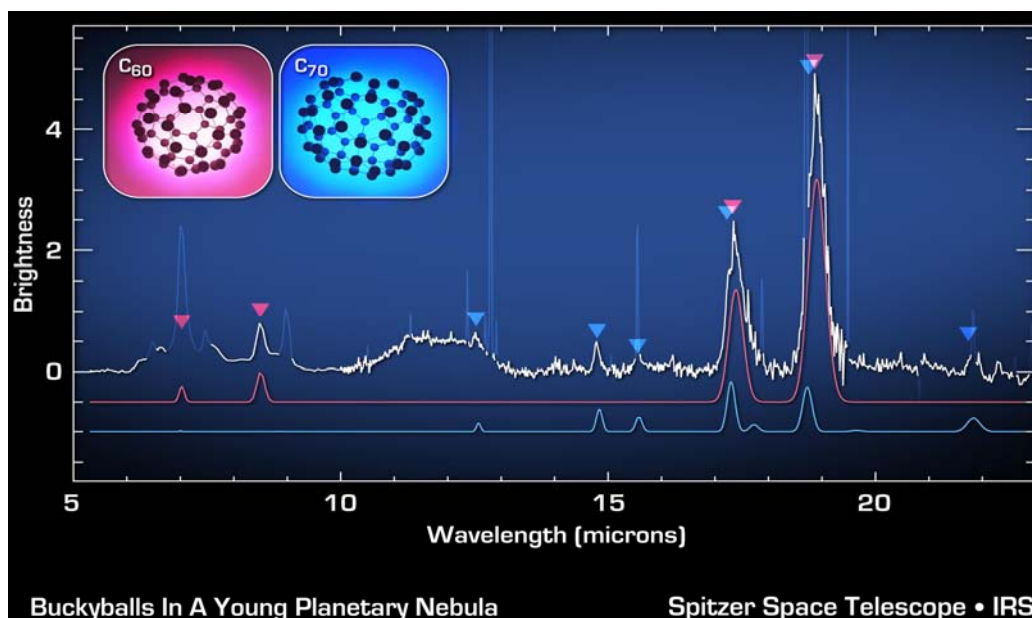


Рис. 8. Спектральные линии фуллеренов C_{60} и C_{70} в излучении МЗ туманности (вверху) и в лабораторных спектрах (нижние кривые).

Фуллерены:

- образуются в оттекающих атмосферах красных гигантов – ядрах планетарных туманностей;
- имеют устойчивые ионы: от C_{60-6} до C_{60+2} ;
- могут образовывать:
 - полимеры;
 - кубические кристаллы, которые сохраняют колебательный спектр молекул;
- связываются с водой до $C_{60}@(H_2O)_{24}$;
- образуют соединения с металлами (М) типа M_3C_{60} , которые
 - ферромагнитны ($T < 16$ К),
 - сверхпроводны ($T < 40$ К);

- во внутренней полости могут содержать молекулы H_2 , атомы He и др. – свойства таких образований не изучены.

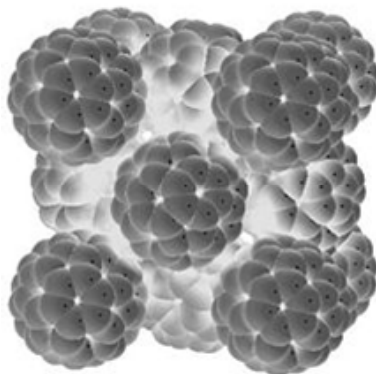


Рис. 9. Кристалл, образованный молекулами C_{60} .

Эволюция космических пылинок

- Образование тугоплавких ядер пылинок, ПАУ, а также фуллеренов происходит главным образом в оттекающих околозвездных оболочках старых звезд.
- Нарастание оболочки «грязного льда» – в молекулярных облаках на протяжении десятков млн. лет.
- Разрушение ледяных оболочек (рис. 10) в областях звездообразования (каждые ~100 млн. лет).

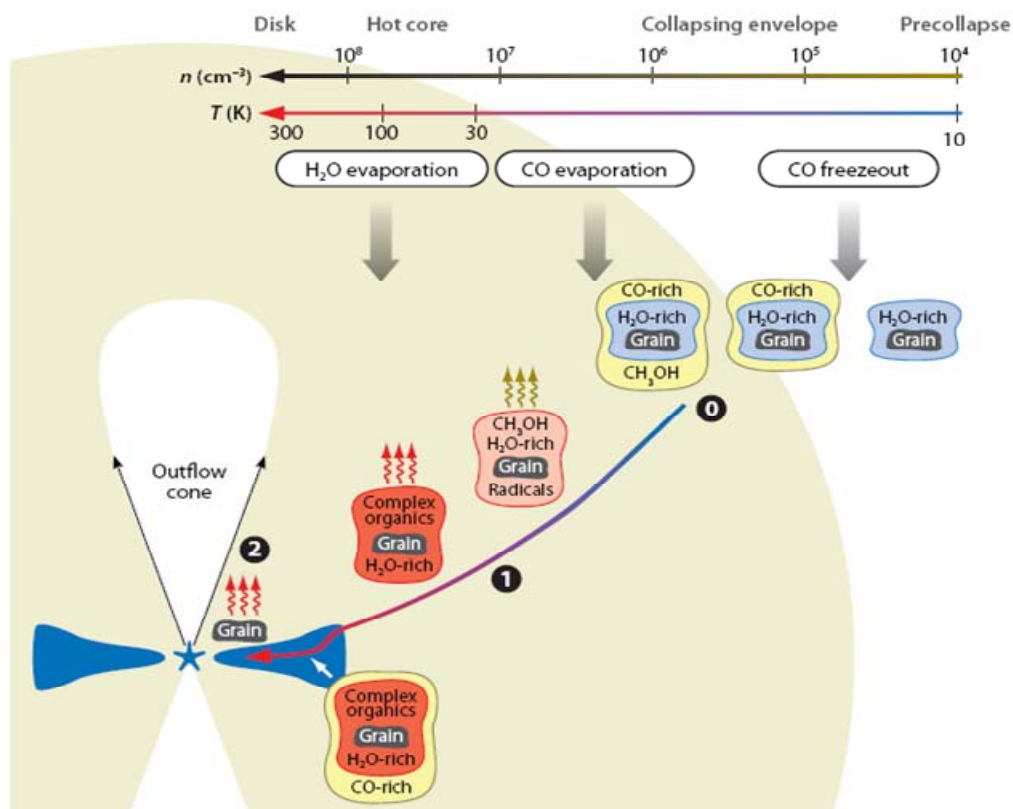


Рис. 10. Изменения, происходящие в ледяных оболочках пылинок при эволюции протозвездного сгустка в протопланетный диск.

- Разрушение ядер пылинок (в ударной волне от взрыва сверхновой или при попадании внутрь рождающейся звезды) – время жизни ядер пылинок более 10 млрд. лет (порядка возраста Вселенной!).
- Слипание пылинок при медленных столкновениях в протопланетных дисках – рост размера пылинок (рис. 11) вплоть до размера ядер комет, планетезималей и т.д.

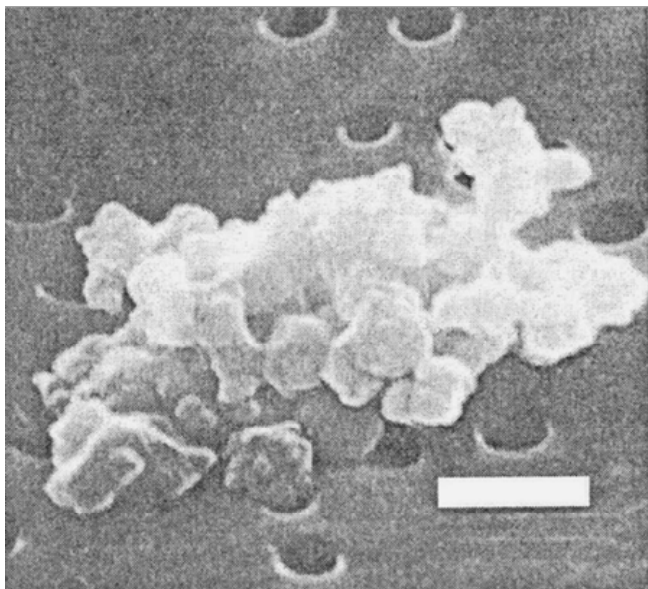
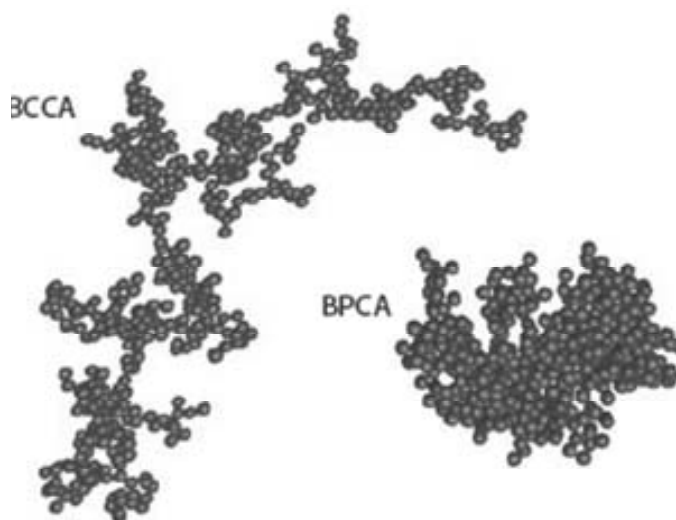


Рис. 11. Фото межпланетной пылинки, найденной в стратосфере Земли – агрегат зерен МЗ пыли. Светлая полоска указывает масштаб (1 мкм).

Рис. 12. Фрактальные агрегаты МЗ пылинок, возникающие в протопланетном диске при медленных столкновениях их с пылевым кластером (ВРСА) и кластеров друг с другом (ВССА) [4].



Пылевая компонента межзвездного ветра в Солнечной системе

Солнечная система движется относительно МЗ вещества, т.е. обдувается МЗ ветром.

- МЗ газ и пыль непрерывно влетают в нее и изучаются:
- газ – по фону неба в спектральных линиях Ляльфа (1216А) и HeI (584А) [открыто В.Г. Куртом в 1962 г.];
- пыль – с помощью космических аппаратов Ulysses (с 1996 г.) и других на расстоянии – 1–5 а.е. от Солнца.

Движение Солнца относительно МЗ среды (МЗ ветер) создает двух-слойную ударную волну (Пикельнер 1969). Гелиопауза отделяет область размером ~ 100 а.е., заполненную солнечным ветром, от МЗ среды. Регистрация пылинок космическими аппаратами Ulysses и др. на расстояниях 1-5 а.е. от Солнца позволила установить

параметры частиц МЗ пыли в Солнечной системе [4]:

масса пылинки	$10^{-16} - 10^{-8}$ г,
размер пылинок	0.02–10 мкм,
средняя скорость	26 км/с,
поток пылинок	$1.5 \cdot 10^{-4} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Самая мелкая пыль не достигает орбиты Земли, т.к. выметается давлением излучения Солнца. Ядра пылинок размером до $\sim 1.5 - 5$ мкм тормозятся в атмосфере Земли почти не нагреваясь и оседают на Землю. Рыхлые агрегаты пыли дробятся в атмосфере на кластеры.

Миграция вещества внутри Солнечной Системы

- «Транспортными средствами» для миграции молекул могут служить пылинки, метеорные и метеоритные тела (размером ~ 0.1 мм – 10 м), кометы, астероиды, планеты.
- Источники межпланетной пыли:
 - -- «реликтовая» межпланетная пыль (слипшиеся ядрышки МЗ пылинок);
 - -- испарение комет около Солнца;
 - -- столкновения малых тел (астероиды, метеорные тела) друг с другом;
 - -- пылинки МЗ ветра.
- Расход пыли при: выметании излучением и испарении около Солнца.
- Ядра комет приходят из облака Оорта, где края протопланетного диска взаимодействуют с МЗ средой, и несут оттуда вещество внутрь планетной системы.
- Внутри планетной системы комета испытывает гравитационные возмущения от планет-гигантов (Юпитера) и, либо теряет энергию и остается в планетной системе, либо приобретает энергию и покидает Солнечную систему и может попасть в др. планетные системы.

Как могут перемещаться молекулы из одной галактики в др.?

- Вместе с блуждающими между галактиками звездами (с их планетными системами) и звездными скоплениями (их мало?).
- Вместе с галактиками при взаимодействии их др. с др.: при гравитационных возмущениях, столкновениях и слияниях галактик (очень интенсивный процесс!).
- А Не противоречит наблюдениям;

- может быть и через гипотетические «кротовые норы»? (И.Д. Новиков, Н.С. Кардашев и А.А. Шацкий 2007 [1]).

Гипотеза Хойла и Викрамасинга

Хойл и Викрамасинг ок. 50 лет назад высказали предположение, что часть МЗ пылинок могут быть одноклеточными организмами [5, 6].

Эта гипотеза:

- не противоречит наблюдениям;
- явилась базой для современных представлений о возможности панспермии.
- По оценке авторов для переноса жизни достаточно, чтобы выжила только 10–24 часть организмов.
- Такие «пылинки» также как тугоплавкие ядра обычных МЗ пылинок:
- могут обростать ледяными оболочками;
- могут пережить эпохи испарения оболочек (нагрев до 100–200 К). Однако они НЕ могут пережить нагрев до ~1000 К, как тугоплавкие ядра обычных пылинок.
- Разорванные ДНК способны восстанавливаться!

Движение пылинок внутри галактик:

- В основном двигаются вместе с МЗ газом.
- Из-за неоднородности распределения светового давления могут иметь скорость до 2–10 км/с относительно газа.
- В некоторых случаях могут ускоряться бетатронным механизмом до ~30–100 км/с.
- В галактиках с бурным звездообразованием выносятся вместе с газом в гало галактики (т.н. галактические фонтаны, рис. 13б) и даже в межгалактическое пространство (рис. 13а).

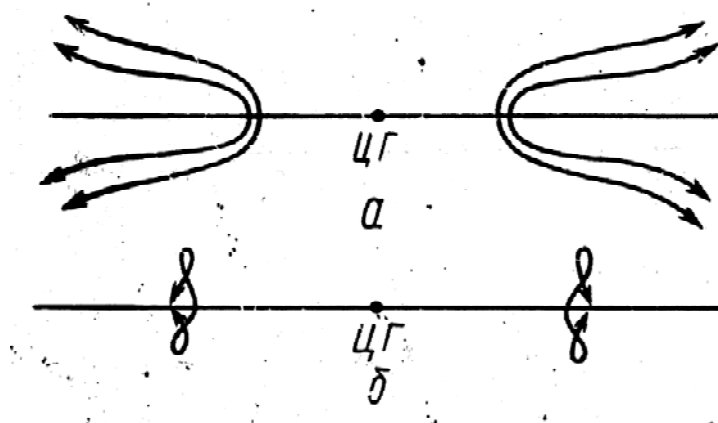


Рис. 13. Траектория выноса газа и пыли из плоскости спиральной галактики при бурном звездообразовании: (а) в межгалактическую среду («галактический ветер»); (б) в гало галактики («галактический фонтан»), когда газ не имеет достаточной энергии чтобы покинуть галактику. Горизонтальная черта – галактическая плоскость. ЦГ – центр галактики.

Движение пылинок между галактиками

В галактиках с бурным звездообразованием могут выноситься вместе

- с газом в межгалактическое пространство.
- Если пылинки оказываются внутри плотного скопления галактик, то разрушаются горячим ($T \sim 10^8$ К) межгалактическим газом, иначе
- могут через ~ 1 млрд. лет попасть в др. галактику на периферии скопления галактик.

Регистрация межгалактической метеорной частицы

28 июля 2006 г. на 6-м телескопе Афанасьев, Калениченко и Караченцев [7] случайно зарегистрировали спектр слабого метеора. Выполненный ими анализ показал, что:

- уверенно отождествляются линии FeI и MgI, OI, NI и полосы молекулярного азота N₂ характерные для метеоров;
- скорость вторжения метеорного тела в атмосферу Земли, оцененная по лучевой скорости, составила 300 км/с, т.е. близка или превышает скорость убегания из Галактики;
- размер тела составлял десятые доли миллиметра, что совпадает с размерами хондр в углистых хондритах;
- радиант траектории метеора совпадает с положением апекса движения Солнечной системы к центру Местной группы галактик.

Проведенные дополнительные наблюдения слабых спорадических метеоров на широкоугольной телевизионной ПЗС-камере FAVOR подтвердили радиант с уровнем значимости более 96%.

В [7] сделан вывод, что, вероятно, эта метеорная частица имеет внегалактическое происхождение.

Гипотеза о релятивистских пылинках

В научной литературе иногда обсуждается вопрос о возможности ускорения пылевых частиц до релятивистских, то есть, близких к скорости света, скоростей (см., например, Dasgupta (1980) [8]). Такие пылинки могли бы переносить содержащиеся в них молекулы на еще большие расстояния.

Но даже если процесс ускорения сможет произойти плавно, то механизмов плавного торможения таких гипотетических пылевых частиц не найдено. Они погибают, врезаясь в какое-нибудь препятствие. В этом случае они полностью разрушаются до уровня элементарных частиц. Поэтому вероятность сохранения возможно имеющих в этих пылинках молекул равна нулю.

Вероятные пределы миграции

Пекулярные скорости, как галактик, так и выбрасываемых из них фрагментов, содержащих звезды и межзвездное вещество, не превышает ~ 3000 км/с = 1% скорости света.

Поэтому за время существования галактик (10–13 млрд. лет) обмен органическим веществом мог произойти на расстояниях не превышающих ~ 100 млн. световых лет, т.е. $\sim 1\%$ радиуса наблюдаемой части Вселенной.

Такой объем содержит примерно $1/10^6$ часть всех галактик, т.е. $\sim 10^5$ галактик. **Это, по-видимому, верхний предел области, в которой может происходить панспермия.**

Т.о., перенос зародышей жизни с одной планеты на другую ограничен $\sim 10^{15}$ – 10^{16} планетными системами.

Однако высокая эффективность может осуществляться лишь в пределах одного скопления галактик, т.е., между 100-10000 галактиками, содержащими 10^{12} – 10^{14} планетных систем.

Наша Галактика не является членом скопления, поэтому частичный обмен веществом мог, вероятно, охватывать область, не превышающую объем Местной группы галактик (10^{11} – 10^{12} планетных систем).

Итак, возможность «заражения Земли жизнью» может облегчить проблему малой вероятности спонтанного зарождения жизни, но, видимо, не более чем в $\sim 10^{16}$ раз.

Литература

1. Новиков И.Д., Кардашев Н.С., Шацкий А.А., 2007, Успехи физ. наук, т. 177, с. 1017.
2. Гольданский В.И., 1975, Успехи химии, т. 44, с. 2121.
3. Гольданский В.И., 1977, Доклады Акад. наук, т. 235, с. 1053.
4. Mann I., 2010, Ann. Rev. Astron. & Astrophys., v. 48, p. 173.
5. Hoyle, F.; Wickramasinghe C., 1979, Astrophys. Space Sci., v. 66, p. 77.
6. Hoyle, F.; Wickramasinghe C., 1980, Astrophys. Space Sci., v. 68, p. 499.
7. Афанасьев В.Л., Калениченко В.В., Караченцев И.Д., 2007, Астрофиз. Бюлл., т. 62, с. 319.
8. Dasgupta A.K., 1980, Astrophys. Space Sci. v. 67, p. 247.

MIGRATION OF MOLECULES AND DUST IN THE UNIVERSE. LIMITATIONS OF PANSPERMIA

Bochkarev N.G.

P.K. Sternberg Astronomical Institute of M.V. Lomonosov Moscow State University

Types of astronomical objects that may contain molecules are listed. Possible forms of migration of molecules are briefly described. Also described are: properties of interstellar molecular clouds, structure of interstellar dust grains, observational manifestations of polycyclic aromatic hydrocarbons and fullerenes, evolution of cosmic dust grains, the dust component of interstellar wind, possible mechanisms of migration of molecules and dust on scale from planetary systems to galaxies, Hoyle and Wickramasinghe hypothesis about the biological nature of some dust grains and the limitations of the area of possible panspermia.

АСТРОФИЗИКА И СЛАБАЯ ФОРМА ГИПОТЕЗЫ ПАНСПЕРМИИ И ЭКЗОГЕННЫЕ ФАКТОРЫ В ЭВОЛЮЦИИ ЗЕМЛИ

Адушкин В.В., Витязев А.В., Глазачев Д.О., Печерникова Г.В.

Институт динамики геосфер (ИДГ РАН), г. Москва, Россия

Введение

Работа состоит из двух частей, связанных ключевой ролью кометных тел.

I. Проблемы происхождения Земли и жизни на ней являются фундаментальными проблемами в современной науке. На основании астрофизических данных по большому космосу, полученных за последние 30–50 лет, и последних результатов по изучению малых тел Солнечной системы (в частности, комет) мы пытаемся наметить новое направление поиска – сшить старую идею о панспермии в расширенном смысле и поиски основ жизни на ранней Земле на базе теоретических и лабораторных данных по эволюции Земли.

Идеи панспермии (греческое наименование panspermia – смесь всяких семян, от *pan* – весь, всякий и *spérma* – семя) – гипотезы о появлении жизни на Земле в результате переноса с других планет каких-либо «зародышей жизни» – восходят к временам Анаксгора из Клазомен (V век до нашей эры): его «ничто не рождается из ничего» и идеи о «семенах жизни». Начиная со времен Берцеллиуса, Гельмогольца и Кельвина, обсуждается проблема панспермии – привноса жизни на Землю из космоса. После гипотезы академика Опарина о первичном бульоне и знаменитых опытов Миллера возникла вторая гипотеза – об автономном происхождении жизни на самой Земле. Прошедшие пятьдесят лет позволяют взглянуть на эти гипотезы с новой точки зрения [1].

После падения метеорита Алленде (1969 г.) и исследования его кальций-алюминиевых включений (CAI) получено веское доказательство в пользу образования Солнечной системы (СС) в плотной звездной ассоциации с присутствием массивных звезд. Однако последствия такого совместного рождения планетных систем для нашей Солнечной системы, по сути, остаются не исследованными. Если Солнечная система формировалась в подобном комплексе, то где она располагалась – вблизи центра в области горячих голубых гигантов или на периферии в значительном удалении от массивных звезд? Какие космохимические следствия тесного звездного окружения могли быть для молодой Солнечной системы? Насколько велика была плотность звезд вблизи зарождающейся Солнечной системы?

Предполагается, что Солнце и окружавший его газопылевой диск сформировались в гигантском молекулярном облаке рядом с молодыми гигантами – голубыми O-B-звездами. Часть межзвездной пыли на расстояни-

ях более 3–4 а.е. оставалась холодной и затем вошла в первые планетезимали. В первые 3–4 млн. лет органика после плавления недр этих планетезималей в результате нагрева короткоживущими ^{26}Al и ^{60}Fe в виде керогенов опустилась в ядро. По-видимому, следует искать в кометах анаэробную жизнь.

II. Роль комет важна не только при формировании Земли, но и на протяжении всей ее эволюции. Земля, как открытая система, рассматривается давно: потоки излучения от Солнца и солнечный ветер, галактические космические лучи, падения крупных космических тел и потоки метеоритного вещества на Землю, внутренняя энергия Земли, частично поглощаемая приповерхностной биосферой и теряемая в виде ИК-излучения, потеря атмосферных газов и взаимодействие магнитных полей Земли и Солнца.

Во многих областях наук о Земле проводятся исследования по обнаружению цикличности в процессах, происходящих на Земле и в космосе, и корреляционных связей между отдельными из них, для определения возможных эволюционных треков суперсистемы по имени Земля. Сейчас можно сказать, что две главные тенденции определяли эволюцию всей Земли и земной коры в частности – направленность, необратимость этой эволюции в целом, и многопорядковая цикличность, выражающаяся во временной, частичной обратимости этой эволюции и периодических изменениях ее темпа и интенсивности во времени.

Геологические циклы – самая крупная единица установленной ритмики на Земле. Они отразились в смене режимов осадконакопления, вулканизма и магматизма; эпохах расчленения и выравнивания рельефа; периодах формирования кор выветривания, в изменении палеоклимата планеты и содержания основных газов атмосферы – CO_2 и O_2 ; в чередовании ледниковых периодов, изменении облика Земли и оставили свой след в палеонтологических находках.

В начале XX века В.И. Вернадский, А.Л. Чижевский, М. Миланкович и др. показали, что одних эндогенных факторов для объяснения происходящих на Земле процессов недостаточно. Наряду с ними следует также учитывать влияние на нашу планету процессов в Солнечной системе: колебания солнечной активности, движение Земли и планет вокруг Солнца и всей Солнечной системы в Галактике, вращение Луны, падение на Землю астероидных тел и др.

Формирование комет и кометных субъядер

Первичные кометные ядра – своего рода «ледяные астероиды» – образовались в области планет-гигантов. В стандартном сценарии происхождения Солнечной системы (см., например, [2, 3] и соответствующие обзоры в [4]) считается, что 4.6 млрд. лет назад около молодого Солнца существовал газопылевой диск с массой 0.03–0.07 M_{\odot} (M_{\odot} – масса Солнца). После затухания турбулентности пыль опускается к центральной плоскости газового

диска, образуя пылевой субдиск. При достижении в нем критической плотности порядка двойной «размазанной» плотности Солнца на данном расстоянии R от Солнца ($\rho_{cr} \geq 6M_{\odot}/4\pi R^3$) развивается гравитационная неустойчивость и происходит его распад на пылевые сгущения. Характерные размеры первичных сгущений были порядка сотен километров, их плотности на порядок превышали ρ_{cr} ($\delta_0 \sim 10^{-5}$ г/см³ для зоны Земли, $\delta_0 \sim 10^{-7}$ г/см³ для зоны Юпитера и $\delta_0 \sim 10^{-9}$ г/см³ для зоны Урана). Считается, что за относительно короткие времена (порядка сотни тысяч лет [2], а, возможно, и миллионов лет [3, 5]) система сталкивающихся, разрушающихся и объединяющихся сгущений превратилась в систему тел астероидных размеров, которая затем за времена в десятки млн. лет превратилась в систему планет Солнечной системы. Не вызывает сомнения, что крупнейшие тела астероидного пояса, ядра современных комет в поясах Койпера и Оорта – остатки сохранившихся допланетных тел.

Известно, что из-за большего геометрического сечения рост крупнейших сгущений происходит быстрее твердых тел той же массы [2, 3, 5]. Кроме того, присутствие первичного газа до его диссипации из Солнечной системы снижало относительные скорости и также ускоряло темп роста крупнейших сгущений.

С ростом массивных тел в зоне планет-гигантов относительные скорости тел возросли настолько, что эксцентриситеты и наклоны их орбит достигли критических значений $\sim 1/3$, что, наряду с прохождением звезд вблизи формирующейся Солнечной системы, приводило к выбросу их на периферию СС – т.е. формированию облака Оорта.

Происхождение и эволюция кометных ядер исследовались в ряде работ (см., например, в соответствующих секциях в [4, 6, 7]). Тем не менее, состав и внутренняя структура кометных ядер кажутся неясными на данный момент. Традиционно исследуется тепловая история только одного ледяного тела отдельно от ансамбля подобных тел. Внимание фокусируется на влиянии состава и структуры льда и примеси тугоплавких, значениях коэффициентов теплопроводности и обилиях радиоактивных U, Th, ⁴⁰K, ²⁶Al.

А.В. Витязев в работе [8] исследует комбинированные эффекты столкновений между кометными ядрами, процессов нагревания и охлаждения и возможный массоперенос в недрах кометных ядер с целью контролировать возможность достаточного нагревания и перераспределения примесей в процессе образования пылевых субъядер.

Следует подчеркнуть, что кометные ядра не могут избежать столкновений в процессе формирования. Те из них, которые имели размеры $r > r_{cr}$, могли расти, другие с $r < r_{cr}$ подвергались катастрофическому разрушению и поставляли материал для растущих ядер. Значение критического радиуса r_{cr} определяется размерами r_{max} крупнейших тел в зоне аккумуляции [3].

В работе [8] показано, что для тел размером $r \sim 100$ км, умеренных значений концентрации пылевой примеси, $c \approx 0.2-0.5$, и обычно принимаемых значений обилий U, Th, ^{40}K температуры недр кометных ядер достигают температуры плавления льда T_m после $t \sim 10^8$ лет.

Ситуация меняется радикально в случае свежего ^{26}Al или очень низкой теплопроводности λ , такой как для аморфного льда λ_a , которая на 4–5 порядков меньше [9], чем обычно принимаемые значения λ_0 . В присутствии свежего ^{26}Al даже для кометных ядер радиусом $r \geq 1$ км температура недр $T \sim T_m$ возможна.

Низкие концентрации радиоактивных источников $\dot{\epsilon}$ для материала кометных ядер и низкие начальные температуры во внешней зоне СС были компенсированы низкими значениями температуры плавления льда T_m . Образование жидкой фазы в недрах кометных ядер представляется возможным из-за достаточно толстых теплоизолирующих оболочек.

В работе [8] исследовано формирование кометных ядер, нагревание и остывание их недр в рамках стандартной модели формирования Солнечной системы и показано, что радионуклиды ^{26}Al и ^{60}Fe могли обеспечить нагрев и дифференциацию недр ранних планетезималей в первые 3–4 млн. лет после образования СА1.

В зоне планет-гигантов задолго до образования самих планет в планетезималях с размерами от десятков до сотен километров, образовавшихся из газопылевых сгущений, происходило плавление льдов, дифференциация на оболочки и ядра из опустившейся пыли и ее агрегатов с органикой.

Нагрев и дифференциация крупных (~ 100 км) ледяно-пылевых планетезималей может происходить даже в Койперовском поясе и Облаке Оорта в течение первых 10^8 лет после их образования [8].

О роли комет в зарождении жизни и ее эволюции

I. Уже полстолетия продолжаются поиски многоатомных молекул в молекулярных комплексах. Найдены не только фуллерены, но также и ряд более сложных $\text{C}_n\text{H}_n\text{N}_n$, которые формируют объекты земной биосферы. Молекулы, включающие CHNOSP и входящие в состав протопланетного облака (кроме областей близких к Солнцу), сохраняли структуру и состав.

II. Со времен Пастера известно о хиральности аминокислот и сахаров в земной биосфере. О ней писал Вернадский, обращаясь к выдающимся ученым своей поры, с 50-х годов начались исследования хиральности земной биосферы. Фактически с работы [10] начались поиски хиральности в звездных облаках.

В 2010 году завершилась большая работа под руководством Douglas Whittet по исследованию звездообразования в гигантских молекулярных облаках. В статье T. Fukue с 9-тью соавторами [11] было сообщено о хиральности, измеренной в районе звездного скопления Трапеция туманности Ориона. Наряду с обнаружением слабой хиральности в углистых ме-

теоритах мы имеем нить (пока тонкую), каким образом попали блоки будущей жизни на Землю.

Итак, в Гигантском молекулярном облаке типа Туманности Ориона рождается Солнечная система, близкие О-В звезды обеспечивают поляризацию и слабую хиральность (на 5–15%), там же формируются органические молекулы до глицина $\text{NH}_2\text{CH}_2\text{COOH}$ и дальше. В околосолнечном протопланетном диске образуются первичные планетезимали. В их недрах происходит плавление льда из-за нагревания короткоживущими ^{26}Al и ^{60}Fe . Температуры в зависимости от частоты столкновений планетезималей лежат в интервале между -100°C и 2000°C . Морские температуры $0-150^\circ\text{C}$, $\text{Ph} = 7 \pm 2$, есть металлы и монтмориллониты. Кетоны могли увеличить хиральность до 100%. (Монтмориллонит – глинистый минерал, относящийся к подклассу филлосиликатов, кетóны – органические вещества, в молекулах которых карбонильная группа связана с двумя углеводородными радикалами. Общая формула кетонов: R1-CO-R2). С ростом масс зародышей планет увеличиваются относительные скорости планетезималей в их зонах питания. В зоне планет-гигантов при достижении средней относительной скорости тел предельной величины $v_{\text{cr}} \approx V_{\text{K}}/3$ (V_{K} – кеплеровская круговая скорость на расстоянии R) средняя относительная скорость планетезималей перестает расти из-за выброса “быстрых” планетезималей на периферию СС. Так формируется “хранилище” ядер комет – Облако Оорта.

Мы должны искать LUCA (last universal common ancestor – ближайший общий предок всех ныне живущих на Земле живых организмов) в кометных ядрах и крупных планетезималиях. Может быть, общий предок был не таким уж и общим? Может быть, он был не один?

Эндогенные и экзогенные факторы в истории Земли

В науках о Земле были получены различные банки данных, таких как данные по эндогенной активности Земли, вымираниям биоты и изменениям в биоразнообразии, падениям космических тел, инверсиям магнитного поля, изменениям климата, уровня мирового океана и т.д. Из этих банков данных можно получить временные ряды, отражающие тот или иной процесс. Из-за ошибок измерений или характера большинства геофизических явлений временные ряды представляют собой последовательности квазислучайных величин, поэтому полезная информация должна извлекаться из них методами статистической обработки.

В работе приводятся результаты статистического анализа некоторых из вышеперечисленных рядов различными методами, обсуждаются многопорядковая цикличность и связанность процессов [12].

Эндогенная активность Земли

Оценим периодическую особенность развития эндогенных процессов. Эта особенность развития земной коры и тектоносферы в целом находит

свое наиболее полное отражение в разрезе осадочных толщ. Практически только в осадочных толщах возможно выявление всего спектра циклов от самых крупных, длительностью в сотни миллионов лет, до самых короткопериодических – годовых (ленточные глины), всего 8 порядков.

Важный материал для выявления эндогенной цикличности дает статистика изотопных датировок вулканических, плутонических и метаморфических образований. Для дочетвертичных образований речь может идти в основном об относительно долгопериодических циклах, измеряемых миллионами лет, и только в отношении квартера (четвертичный период) датировка вулкаников позволяет установить проявление циклов длительностью в сотни, даже десятки тысяч лет, а изучение современного вулканизма и сейсмичности – перейти на масштаб в десятки лет, если не годы.

Геологическая цикличность имеет различное происхождение. Наиболее долгопериодические циклы связаны с глубинными процессами, а наиболее короткопериодические имеют астрономическую основу – это классические циклы Миланковича и, возможно, некоторые более крупные циклы эндогенной активности [13]. Впервые понятие о тектонических циклах появилось в работе французского геолога Марселя Бертрана. Он обратил внимание на повторяемость определенного типа литологических формаций в складчатых системах разного возраста, начиная с докембрийских. Эти циклы названы в его честь и имеют продолжительность 150–200 млн. лет. Циклом Вильсона, имеющим продолжительность порядка 650 млн. лет, называют полную циклическую последовательность тектонических событий от раскола континентальной литосферы через раскрытие океанических бассейнов и формирование новой океанической коры, далее через уничтожение океанической коры в результате её погружения в мантию в зонах субдукции, сопровождающееся созданием новой континентальной коры, и до формирования новых крупных континентальных массивов за счет объединения континентальных плит при их столкновении. Далее отмечается проявление в пределах циклов Бертрана фаз тектономагматической активности, в общем отвечающих орогеническим фазам, впервые выделенным Г. Штилле в 1924 г. В фанерозойской истории Земли насчитывают порядка 20 орогенических фаз. Исходя из этого, получается, что они проявляются в среднем примерно через каждые 30 млн. лет.

На рис. 1. показан график, представляющий собой статистическую обработку фундаментального банка данных (более 12000 датировок) по мантийным и коровым породам, которые охватывают весь интервал развития Земли [14]. На графике видны пики суммарной максимальной эндогенной активизации на фоне относительного спокойствия.

Необходимо отметить существование известного факта неточности датировок возраста образцов, возрастающей с их абсолютными возрастами (до десятков млн. лет для многих образцов с возрастами в млрд. лет).

Тектоническая, шире – тектоно-магматическая цикличность, находит свое отражение в цикличности практически всех других геологических процессов [15], как эндогенных, так и экзогенных. Это относится к поведению магнитного поля Земли, к колебаниям уровня Мирового океана, изменениям органического мира – биосферы, в частности, к явлениям массовых вымираний и обновлениям фауны и флоры, к изменениям в масштабе образования различных полезных ископаемых, как рудных, так и нерудных и горючих (уголь, нефть, газ) и смене осадочных формаций вообще.



Рис. 1. Суммарная эндогенная активность для верхней мантии и коры в интервале всего геологического времени (возраст T показан в млрд. лет; N – число датировок) [14].

Вейвлет-спектр ряда суммарной эндогенной активности для верхней мантии и коры в интервале всего геологического времени представлен на рис. 2. Одними из основных достоинств вейвлет анализа являются возможность определения времени появления гармоник и явная видимость других временных особенностей в спектре сигнала.

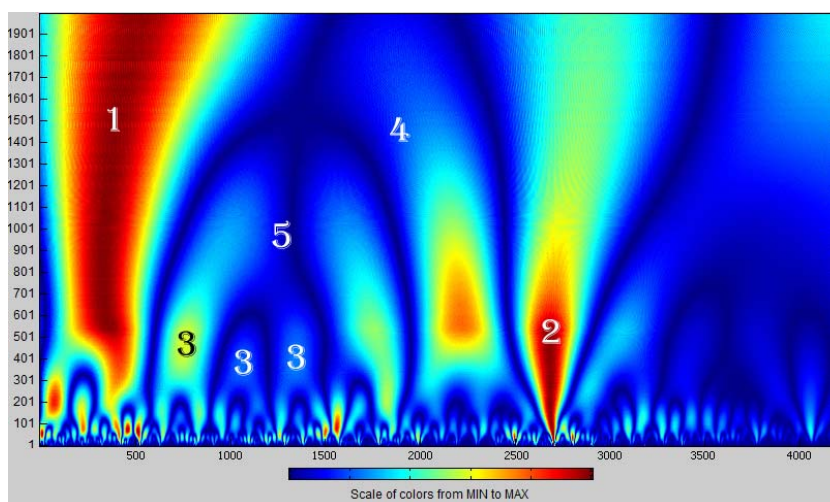


Рис. 2. Скалограмма ряда эндогенной активности.

«Горячая» область «1» на вейвлетных спектрах эндогенной активности связана с тем, что сравнительно молодые породы к настоящему времени хорошо сохранились, в то время как старые уже разрушились. Область

«2» известна как период мощного роста континентальной коры. Вместе с тем на рис. 2 наблюдается особенность расположения областей «5» и «4», длительностью примерно в 1.3 млрд. лет, а расстояние между областями «3» на рис. 2 – 330 млн. лет.

Вымирание морской биоты

Вымирание – явление в биологии и экологии, заключающееся в исчезновении всех представителей определённого биологического вида или таксона. График на рис. 3 демонстрирует долю (не абсолютное число) родов (род в биологической систематике – это уровень в иерархически организованной системе живых организмов, который содержит от одного до большого количества видов) морских животных, вымерших в течение определенных интервалов времени (миллионы лет). Он строится из принципа присутствия следов останков биологического рода до определенного времени и отсутствия после. Данные взяты из [16] и основаны на [17].

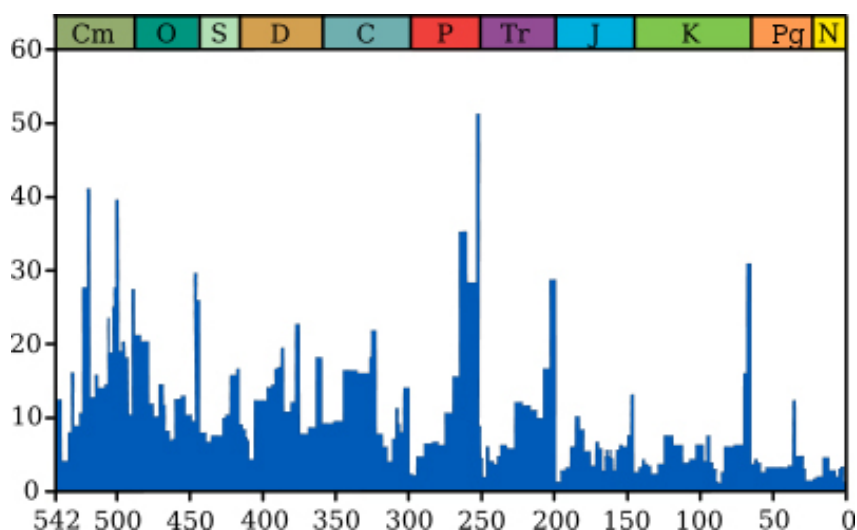


Рис. 3. Интенсивность вымирания морских организмов на временной шкале. По горизонтали отложено время в млн. лет (0 соответствует настоящему времени), по вертикали – доля вымерших родов.

Одним из наиболее ярких проявлений биотических кризисов и их ключевым элементом являются массовые вымирания. Здесь явно выделяются 5 массовых вымираний, называемых Большая Пятерка (The Big Five):

- 440 млн. лет назад – Ордовикско-силурийское вымирание – исчезло более 60 % видов морских беспозвоночных;
- 364 млн. лет назад – Девонское вымирание – численность видов морских организмов сократилась на 50 %;
- 251,4 млн. лет назад – «Великое» пермское вымирание, самое массовое вымирание из всех, приведшее к исчезновению более 95 % видов всех живых существ;

- 199,6 млн. лет назад – Триасовое вымирание – в результате которого вымерла, по меньшей мере, половина известных сейчас видов, живших на Земле в то время;
- 65,5 млн. лет назад – Мел-палеогеновое вымирание – последнее массовое вымирание, уничтожившее шестую часть всех видов, в том числе и динозавров.

Эти вымирания особенно отчетливо видны на вейвлет спектре (рис. 4), за исключением Девонского. В работе [18] показано, что 4 из Большой Пятерки статистически отличаются от фонового уровня вымираний. Это Ордовикско-силурийское, Триасовое, Пермское и Мел-палеогеновое. Девонское вымирание выделяется из фонового уровня, но не является статистически значимым и не проявилось отчетливо на скалограмме рис. 4. Авторы также отметили, что определение специфики массовых вымираний затруднено и часто субъективно из-за таксономических проблем и особенно стратиграфической неточности.

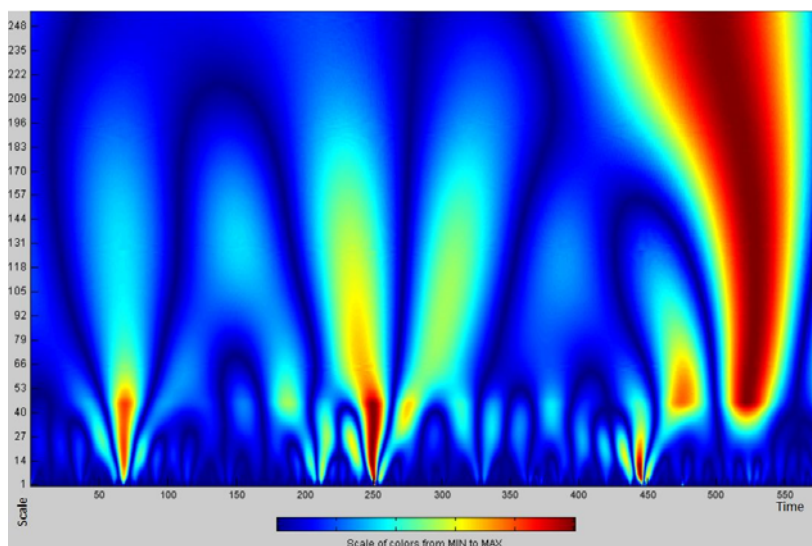


Рис. 4. Скалограмма (МНАТ-вейвлет) ряда интенсивности вымираний морской биоты.

Самая яркая область на скалограмме отвечает явлению, называемому Кембрийским Взрывом (в области 500–540 миллионов лет назад). Явление поистине интересное. О нем мы поговорим чуть дальше.

Вымирания морской биоты, импакты и геологическая активность

Мы ищем взаимосвязь событий в биосфере и геосферах Земли из сопоставления данных по массовым вымираниям морской биоты и импактам (рис. 5а, по сводным данным) и данных по геологической активности (рис. 5б по [14]) за один и тот же период (последние 570 млн. лет).

На рис. 5а можно видеть, что некоторые из ударных кратеров совпадают по времени с пиками вымираний, хотя их взаимосвязь не доказана. Причины пяти наибольших катастроф широко обсуждаются и до конца не

ясны. Причиной первой (около 65 млн. лет назад) предполагается удар астероида (остаток – кратер Чиксулуб).

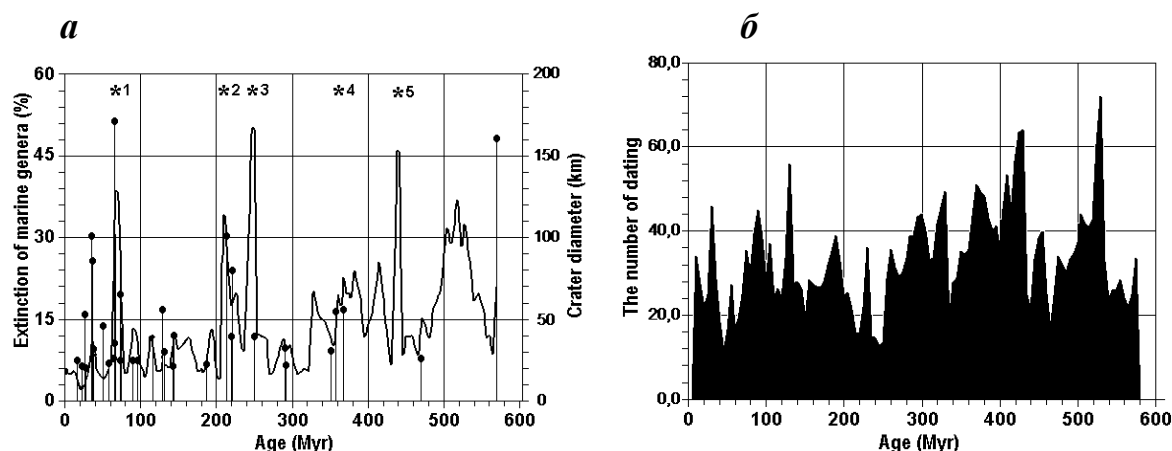


Рис. 5. *а* – сплошной линией показан график вымираний морских видов (в %), точками – ударные кратеры на поверхности Земли, звездочками отмечены пять наибольших вымираний; *б* – суммарная эндогенная активность для верхней мантии и коры в интервале последних 570 млн. лет.



Рис. 6. Наложение графиков с рис. 5а и рис. 5б. График вымираний морской биоты показан синей линией, график эндогенной активности – красной. Можно видеть явно не случайное чередование областей с положительной и отрицательной корреляцией этих графиков, т.е. наличие некоторой связи между вымираниями морских видов и суммарной эндогенной активностью или общих причин, вызывающих эти явления, что требует дальнейших исследований.

Основные результаты

Некоторые результаты спектрального анализа обобщенного (кора и верхняя мантия) ряда представлены далее. На рис. 7а и 7б показаны периодограммы выявленных периодичностей. По оси X отложена величина периода в млн. лет, по оси Y – время локализации окна (0 соответствует настоящему времени) в млн. лет, по оси Z – значения периодограммы (ам-

плитуды спектральных составляющих), показывающие вклад конкретной периодичности в общий ряд.

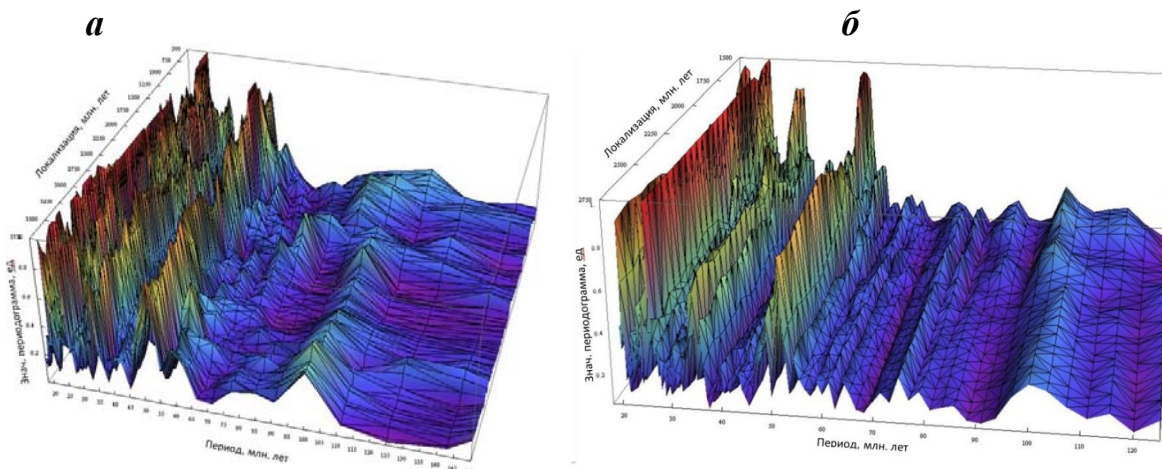


Рис. 7. Результаты оконного спектрального анализа обобщенного (кора и верхняя мантия) ряда. **а** – размер окна 1 млрд. лет, **б** – размер окна 3 млрд. лет.

Методика проведения оконного спектрального анализа: задаем размер окна, далее на части исходного ряда, соответствующего этому окну, проводится спектральный анализ, затем окно смещается и процедура повторяется. Такой подход позволяет проследить участки «работы», мощность вклада и вариацию значения периода цикла в исследуемом ряде.

Можно видеть достаточно устойчивые хребты. Они указывают на то, что соответствующие периодичности (ось Периода в млн. лет) проявляются на всем исследуемом интервале времени.

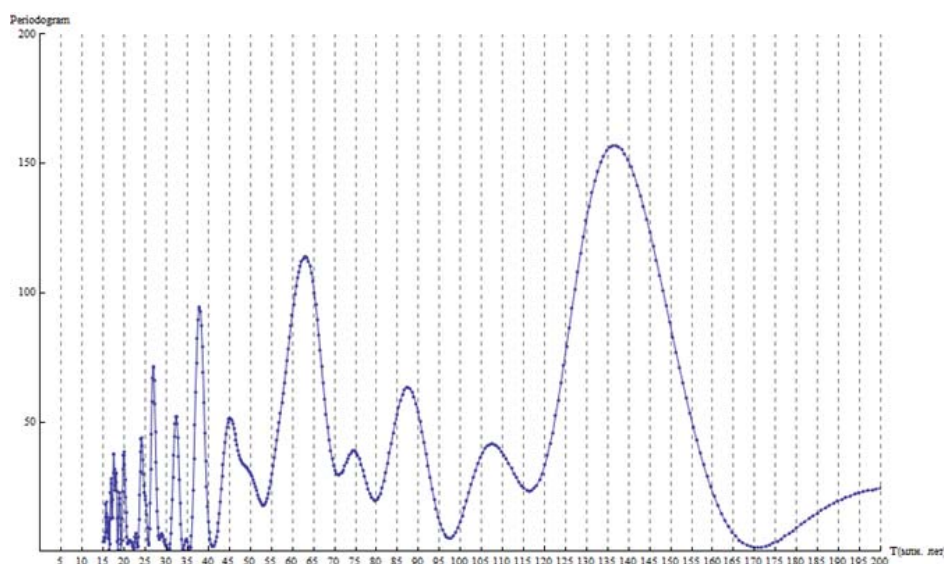


Рис. 8. Периодограмма ряда вымираний морской биоты получена по методике анализа периодических компонент интенсивности точечных процессов [19]. На осях отложены значения периода в млн. лет и приращение логарифмической функции правдоподобия. График показывает насколько «более выгодна» периодическая модель интенсивности по сравнению с чисто случайной моделью.

Для краткости мы здесь не приводим весь набор полученных спектров. Проведенный статистический анализ показывает наличие устойчивых периодичностей в процессах эндогенной активности: 20-35, 50, 100, 120, 135, 160, 175, 195, 220, 270... млн. лет.

Акцентирование на периодичностях порядка десятков млн. лет не позволяет сделать аналогичный оконный спектральный анализ на ряде интенсивности вымираний морской биоты ввиду недостижимости статистической значимости, т.к. длительность ряда составляет всего 550 млн. лет.

Значения периодов: 16, 18, 25–40, 45, 63, 75, 87, 107, 136 млн. лет. Можно видеть, что некоторые из периодов близки по своей длительности к длительностям периодичностей эндогенной активности.

Причины

На возможные причины столь долгих циклов может навести рис. 9 и Таблица 1 разномасштабных циклов. Таблица, естественно, не претендует на полноту и призвана показать порядковые масштабы периодических явлений и причины их вызывающие.

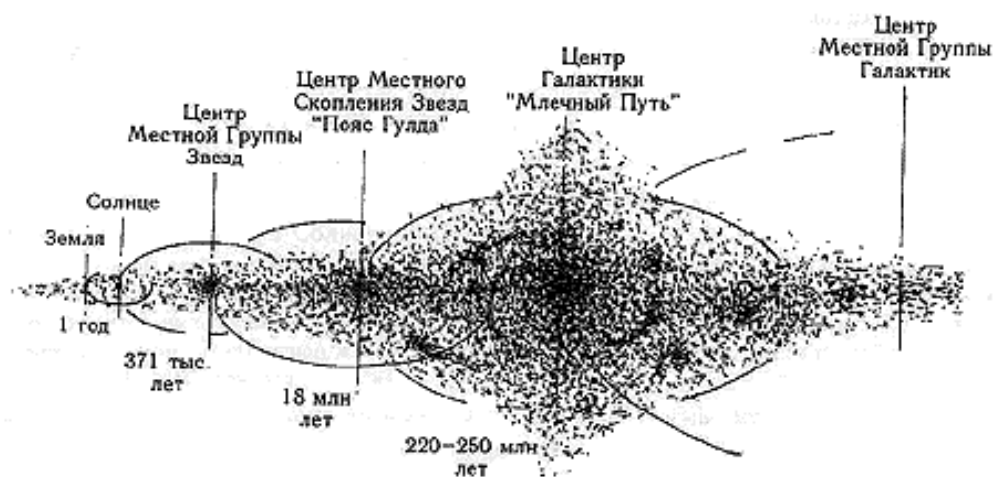


Рис. 9. Спираль на спирали. Спирально - эллиптические траектории различных вращающихся космических объектов.

Итак, возможная причина некоторых циклов связана с процессами галактической природы. Но каков тогда механизм влияния Галактики на протекающие на Земле процессы? Однозначного ответа здесь нет. Так же остается открытым вопрос о причинах остальных циклов.

Так, Ю.И. Стожков [20] полагает, что изменяющиеся со временем потоки космических лучей в земную атмосферу через процесс образования облачности и космическая пыль, ответственная за присутствие большого количества аэрозоля и попадающая в атмосферу из космического пространства, влияют на величину альбедо Земли. Изменения величины альбедо определяют климат Земли.

Таблица 1.

Вариации (периоды)	Источник	Описание
600 млн. лет	Земля (недра)	Циклы Вильсона.
225–250 млн. лет	Орбита Солнечной системы в Галактике	Галактический год.
150-200 млн. лет	Земля (недра)	Циклы Бертрана.
50 млн. лет	Галактика	Период обращения спиральной структуры.
36 млн. лет	Земля (недра)	Циклы Штилле.
15-18 млн. лет	Галактика	Период обращения перемычки.
93 000 лет	Земля, как планета	Цикл Миланковича. Колебания эксцентриситета.
41 000 лет	Земля, как планета	Цикл Миланковича. Долгопериодическая нутация.
25 750 лет	Земля, как планета	Цикл Миланковича. Прецессия.
2 300 лет	Солнце	Цикл Холлстатта.
210 лет	Солнце	Швейцарский цикл и цикл Де Врайеса.
87 лет	Солнце	Цикл Глейшберга.
22 года	Солнце	Цикл Хейла магнитного поля.
18.6 лет	Земля, как планета	Нутация.
11 лет	Солнце	Солнечные пятна.
1 год	Земля, как планета	Один оборот Земли вокруг Солнца.
1 день	Земля, как планета	Один оборот Земли вокруг своей оси.

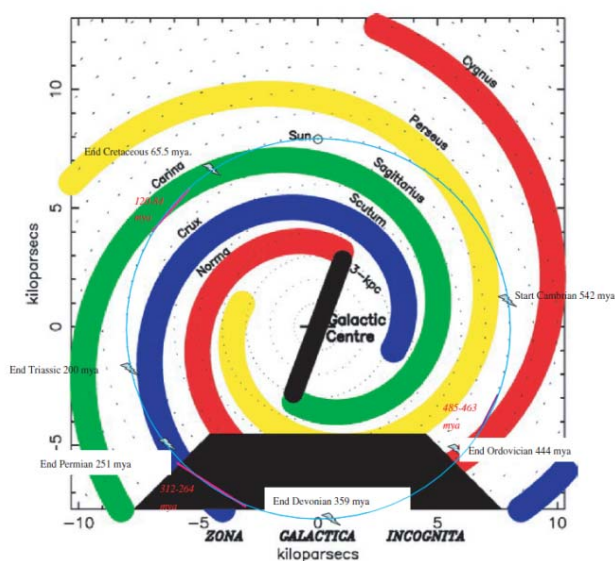


Рис. 10. Схема движения Солнечной системы через Галактические рукава [22]. Текущее положение и орбита Солнечной системы (здесь принимается круговая орбита с радиусом 7,9 килопарсек) обозначена голубой окружностью.

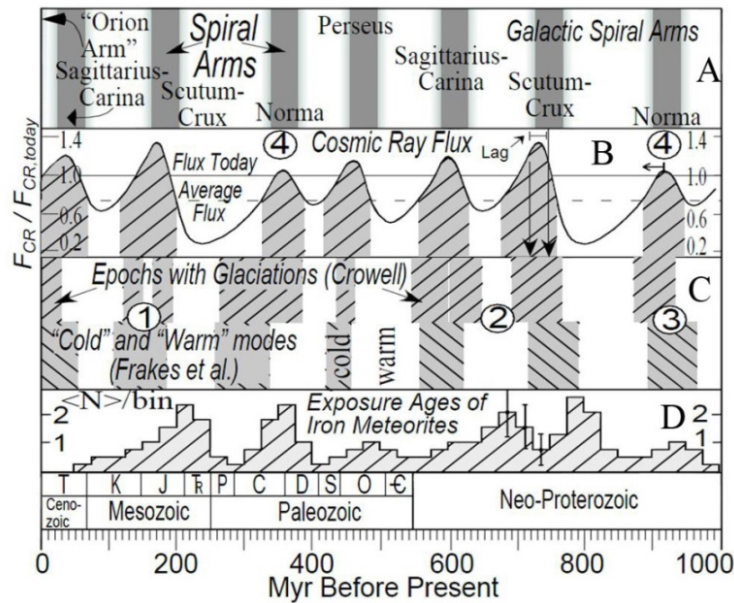


Рис. 11. Последний зон по [23]. Панель А описывает пересечение Солнечной системой галактических рукавов. Панель В описывает достижение потоков космических лучей (CRF) Солнечной системы. Панель С качественно описывает геологические записи по оледенениям. Панель D является усредненной гистограммой возрастов железных метеоритов. Более подробное описание см. в [23, 24].

Другой вариант объяснения наступлений ледниковых периодов резким возрастанием галактического излучения во время прохождения Солнечной системой галактических рукавов предложен в работе [21] (рис. 9). Попадая под ливень заряженных частиц, атмосфера нашей планеты ионизировалась, в ней формировались толстые слои низких грозовых облаков. Облака эти настолько сильно затрудняли проникновение к поверхности планеты солнечного света, что атмосфера охлаждалась, льды росли.

Новый механизм наступления ледниковых периодов, так же связанный с прохождением Солнечной системы через галактические рукава, предложен А.В. Витязевым [25] (см. рис. 12).



Рис. 12. Схема механизма влияния космических факторов на климат Земли.

И в заключение мы обращаемся ко второй загадке эволюции жизни на Земле. Первая – это само ее происхождение. Вторая – «кембрийский взрыв» – так называемая проблема «545» (Ma) [26], когда внезапно возникли многие многоклеточные, и наступила эра фанерозоя. В работе [25] было отмечено, что ливни комет могут привести в зодиакальное облако пыли на порядки больше вещества, чем мы видим сегодня. Но надо было поискать реликты на Земле. Мы рассмотрели литературу по земным карбонатным породам – углеводородные ($^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$) (см. рис. 11), стронциевые и кислородные вариации.

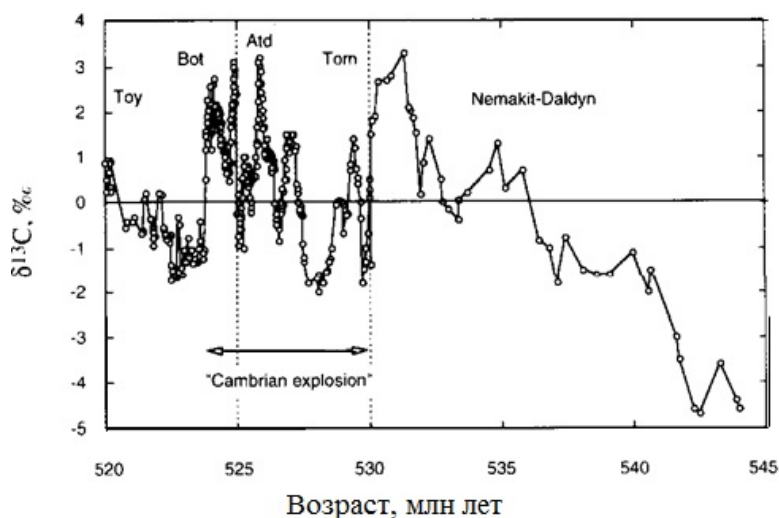


Рис. 13. Данные по углеродным изотопам сибирских карбонатов Нижнего Кембрия – время по работе [27].

Наше предварительное мнение, что на промежутке Tommotian-Atdabanian заметны сильные вариации $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}$, и это объясняется притоком кометного вещества в результате кометных ливней. Хотя массовая доля его незначительна – около одной миллионной массы Земли, но составляет порядка 10 гигатонн пыли, высыпающейся на всю поверхность Земли.

Мы искренне благодарны Оргкомитету за приглашение на интереснейшую конференцию "Космические факторы в эволюции биосферы и геосферы"

Работа выполнена при поддержке исследований Грантом Президента РФ по поддержке ведущих научных школ Российской Федерации (НШ – 3345, 2014.5) и программы Президиума РАН П-28.

Литература

1. *Витязев А.В., Печерникова Г.В.* Астрофизика и слабая форма гипотезы панспермии // Происхождение и эволюция биосферы (ч. 2) / Под ред. Э.М. Галимова. М.: URSS, 2012. С. 93–102.
2. *Сафронов В.С.* Эволюция допланетного облака и образование Земли и планет. М.: Наука, 1969. 244 с.
3. *Витязев А.В., Печерникова Г.В., Сафронов В.С.* Планеты земной группы: происхождение и ранняя эволюция. – М.: Наука, 1990. – 296 с.

4. *Protostars and Planets I, II, III* (Ed. T. Gehrels – vol. I, 1978, Eds. D. Black, M. Matthews – vol. II, 1985, Eds. Levy E.N. and Lunine J.I., vol. III, 1993), Tucson, Arizona: The University of Arizona Press.
5. Печерникова Г.В., Витязев А.В. Эволюция пылевых сгущений в допланетном диске // Астрон. Журн. 1988. Т. 65. Вып. 1. С. 58–72.
6. *Wilkening L.L.* (Ed.), *Comets*. Tucson, Arizona: The University of Arizona Press, 1982.
7. *Rickman H.*, The thermal history and structure of cometary nuclei // *Comets in the Post-Halley Era* (Eds. Newburn Jr., Menegebayer M. and Rahe J.) Kluwer Acad., 1991. 733–760.
8. *Vityazev A.V.* Formation of cometary subnuclei // *Planet. Space Sci.* 1996. Vol. 44. N 9. P. 967–971.
9. *Kouchi A., Greenberg J.M., Yamamoto T. and Mukai T.* Extremely low thermal conductivity of amorphous ice: relevance to comet evolution // *Astrophys. J.* 1992. **388**, L73–L76.
10. *Bailey J., Chrysostomou A., Hough J.H., Gledhill T.M., McCall A., Clark S., Menard F., Tamura M.* Circular polarization in star-formation regions: implications for biomolecular homochirality // *Science*. 1998, 281. P. 672–674.
11. *Fukue T., Tamura M., Kandori R., Kusakabe N., Hough J.H., Bailey J., Whittet D.C.B., Lucas P.W., Nakajima Y. And Hashimoto J.* Extended High Circular Polarization in the Orion Massive Star Forming Region: Implications for the Origin of Homochirality in the Solar System // *Orig. Life Evol. Biosph.* 2010 June; 40(3). P. 335–346.
12. Глазачев Д.О., Печерникова Г.В., Витязев А.В. Активность взаимодействующих коры, мантии, ядра и гео-биологическая эволюция // *Геофизика межгеосферных взаимодействий* / Под ред. В.В. Адушкина – М.: ГЕОС, 2008. С. 105–119.
13. Хаин В.Е. Некоторые философские вопросы современной геологии // *Научные доклады высшей школы* // *Философские науки*. 1958. № 2. С. 148–161.
14. Балашов Ю.А. Концепция времени в геологической истории Земли. // *Геология и полезные ископаемые Кольского полуострова*. Т. 3. Новые подходы к изучению геологических образований. Институт геологии КНЦ, Апатиты, 2002, С. 51–75.
15. Лобковский Л.И., Никишин А.М., Хаин В.Е. Современные проблемы геотектоники и геодинамики. М.: Научный мир, 2004. 5-89176-279-X
16. *Rohde, R.A. & Muller, R.A.* "Cycles in fossil diversity". *Nature*. 2005. 434. 209–210.
17. *Sepkoski, J.* A Compendium of Fossil Marine Animal Genera // Eds. Jablonski, D. & Foote, M. *Bull. Am. Paleontol.* No. 363. Paleontological Research Institution, Ithaca, NY, 2002.
18. *Raup, D. & Sepkoski, J.* "Mass extinctions in the marine fossil record" // *Science* 1982. 215. 1501–1503. DOI:10.1126/science.215.4539.1501.
19. Любушин А.А. Анализ периодических компонент интенсивности точечных процессов. Учебное пособие для старших курсов геофизического факультета. Москва, 2006.
20. Стожков Ю.И. Космические лучи и атмосферные процессы, причины изменения климата // *Труды X Конференции молодых ученых "Современные проблемы в астрофизике и физике космической плазмы"*, БШФФ-2007. Изд-во ИСЗФ СО РАН, Иркутск, 2007.
21. *Shaviv, N.J.* On Climate Response to Changes in the Cosmic Ray Flux and Radiative Budget // *J. Geophys. Res. – Space Phys.* 110 (A8): A08105, Bibcode 2005 JGRA.11008105S, doi:10.1029/2004JA010866
22. *Gillman, Michael and Erenler, Hilary* (2008). The galactic cycle of extinction // *International Journal of Astrobiology*, 7(1), pp. 17–26.

23. *Shaviv, N.J.* Cosmic Ray Diffusion from the Galactic Spiral Arms, Iron Meteorites, and a possible climatic connection? // *Phys. Rev. Lett.* 89:051102, 2002.; Erratum-
ibid.89:089901,2002 DOI:10.1103/PhysRevLett.89.051102
24. *Shaviv, N.J.* The Spiral Structure of the Milky Way, Cosmic-Rays and Ice-Age Epochs on Earth, *New Astronomy* 8: 39, doi:10.1016/S1384-1076(02)00193-8
25. *Адушкин В.В., Витязев А.В., Глазачев Д.О., Печерникова Г.В.* Земля, как открытая система. Космические периодичности // *Межгеосферные взаимодействия* (Москва, 26–27 сентября 2011 г.): материалы семинара-совещания / Ин-т динамики геосфер РАН. М.: ГЕОС. 2011. 138 с. С. 6–14.
26. *Yochelson E.L., Fedonkin MA.* Paleobiology of Climactich-nites, an enigmatic Late Cambrian fossil // *Smithson. Contrib. Paleobiol.* 1993. № 74. 74 p.
27. *Derry L.A., Brasier M.D., Corfield R.M., Rozanov A.Yu., Zhuravlev A.Yu.* Sr and C isotopes in Lower Cambrian carbonates from the Siberian craton: a paleoinvitremted record during "Cambrian explosion" // *Earth. Planet. Sci. Lett.* 128 (1994), 671–681.

ASTROPHYSICS AND WEAK FORM OF PANSPERMIA HYPOTHESIS AND EXOGENOUS FACTORS IN THE EVOLUTION OF THE EARTH

Adushkin V.V., Vityazev A.V., Glazachev D.O. and Pechernikova G.V.

Institute of Geosphere Dynamics RAS (IDG RAS), Moscow, Russia

The problems of the origin of Earth and life are fundamental in the modern science. We, relying on the data of resent years, contemplate a new course of research in this old problem. On the base of astrophysical data, obtained during the last 30–50 years, and the resent results of the study of small bodies in the Solar System (comets in particular) it is possible to combine the old idea about panspermia in a comprehensive sense and the search of the basis of life on the early Earth grounded on theoretical and laboratory data on the Earth evolution.

Most likely, the Sun and a gas-and-dust disk surrounding it were created in a Giant molecular cloud near young giants – blue O-B-stars which ultraviolet radiation provided a weak chirality (to 15% of EEs) in organics of interstellar dust. Further a part of interstellar dust beyond orbits larger than 3–4 a.u. remained cold and then entered into the first planetesimals. The organics, after melting of interiors of the first planetesimals due to the heating by short-living ^{26}Al and ^{60}Fe , sank, in the form of kerogens, into the core where formation of the first complex organic compounds began. This occurred in the first 3–4 Myr after the CAI. Apparently, it is necessary to look for anaerobic life in comets.

In geosciences obtained various data banks, such as data on the endogenous activity of the Earth, mass extinctions of life and changes in biodiversity, impacts of cosmic bodies, inversions of the magnetic field, climate change, etc. The problem of cyclicity and correlation of all these processes is studied for 50 years. Results of spectral, wavelet and correlation analysis of the data series, representing some of these processes are given. We conclude, that most of them are cyclic, some of the periods are present in all the processes. The mechanisms of the influence of the galaxy on the processes occurring on the Earth are discussed.

АКТИВНОСТЬ МОЛОДОГО СОЛНЦА

Кацова М.М.¹, Лившиц М.А.^{1,2}

*¹Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²ИЗМИРАН им. Н.В. Пушкова, Москва, Троицк, Россия

Кратко обсуждаются основные свойства активности Солнца в современную эпоху и развитие представлений об оценке возраста звёзд по уровню активности (о гирохронологии). Выявлена группа активных поздних карликов, вращение которых замедлилось до периодов 10–11 дней, которые по индексам хромосферной и корональной активности соответствуют возрасту 1–2 млрд. лет. Отобрано несколько звёзд, активность которых может служить примером явлений, происходивших на молодом Солнце. Анализ активности этих звёзд позволяет оценить уровни фотосферной, хромосферной и корональной активности молодого Солнца. Дана оценка потери массы за счёт квазистационарного истечения и корональных выбросов вещества. На основании наблюдений супервспышек на G звёздах с помощью КА Кеплер определена вероятная частота нестационарных явлений с полной энергией около 10^{34} эрг. Показано, что такие супервспышки могут возникать в магнитных полях, реально наблюдаемых на G карликах.

Введение: об оценке возраста звёзд по уровню активности

Сейчас имеется огромное количество наблюдений активных процессов на Солнце. Общие представления о физике явлений на Солнце в современную эпоху могут являться основой для понимания, какой была активность Солнца в прошлом. При анализе активности в различные эпохи эволюции звезды окосолнечной массы используются два основных подхода. Первый основан на теориях внутреннего строения, эволюции углового момента осевого вращения звезды и механизмов динамо. Второй подход использует сопоставление наблюдательных данных об активности на Солнце и других подобных ему звёздах. На этом пути удалось развить представления об однопараметрической гирохронологии, связывающей уровень активности с возрастом звезды [1].

Мы продолжили исследование этого вопроса на расширенном массиве звёзд, наблюдавшихся в рамках программ поиска планет. Сейчас ясно, что существует некоторое количество звёзд, характеризующихся насыщением активности. Иначе говоря, рентгеновское излучение корон этих звёзд, точнее, отношение светимостей, L_x/L_{bol} , достигает 10^{-3} и не зависит от скорости осевого вращения. Это относится к звёздам с периодами вращения от 0.3 до 3 дней. Возраст этих звёзд не превышает 600 млн. лет. Короны таких звёзд практически полностью заполнены горячими областями (с T около

10 МК), а фотосферы покрыты пятнами, занимающими до десятков процентов площади поверхности. Можно полагать, что характер активности этих звёзд сильно отличается от процессов на Солнце. Особенности совсем молодых звёзд, в частности, типа Т Тау, заключаются в аккреции окружающего их газа, существовании околзвёздных дисков и преобладании дипольного поля. Эти проблемы, заслуживающие отдельного обсуждения, остаются за пределами этой статьи.

Основной закономерностью более медленно вращающихся звёзд является то, что уровень их активности определяется скоростью осевого вращения. Современное изучение связи рентгеновского излучения с вращением дано, например, в [2]. Дальнейшее развитие метода гирохронологии, основанное на сопоставлении хромосферной и корональной активности и выявление роли магнитных полей различных масштабов в формировании активности проведено в наших работах [3–5]. Мы построили диаграмму индексов хромосферной и корональной активности, определяющихся логарифмами отношения излучения звезды в хромосферных линиях Н и К Ca II (нормированного на непрерывное излучение в том же диапазоне) и отношением мягкого рентгеновского излучения к болометрическому. Над прямой зеленой линией на Рис. 1 располагается основная группа звёзд, связывающая звёзды с низким уровнем активности и звёзды с насыщением активности. Красная прямая линия соответствует прямой линии, введённой в [1], слегка изменённой с учётом несколько новых данных. Эта прямая «однопараметрической гирохронологии» связывает молодые звёзды с возрастом сотни млн. лет с более старыми звёздами, возраст которых сравним с солнечным (4.5 млрд. лет) или больше. Шкала возрастов основана, главным образом, на данных о рассеянных звёздных скоплениях. Сопоставление корональной и хромосферной активности с фотометрическими и (или) спектральными наблюдениями конкретных звезд показывает, что осевое вращение действительно является основным фактором, определяющим уровень активности.

О возможных путях эволюции активности солнечного типа

На Рис. 1 видно, что большая группа звёзд располагается ниже зелёной прямой. Эти звёзды характеризуются тем, что при близком уровне хромосферной активности они обладают коронами, мощность которых меняется в широких пределах. Для этих звёзд однопараметрическая гирохронология уже не применима, и, по-видимому, существует дополнительный фактор, влияющий на активность. Относительная доля G-звёзд в основной группе несколько выше, чем в группе звёзд, несколько более холодных, чем Солнце, располагающихся на диаграмме ниже этой зелёной прямой линии. Мы предположили, что толщина конвективной зоны может быть дополнительным фактором формирования активности [5].

Действительно, на Солнце наблюдаются явления, связанные как с крупномасштабным полем (корональные дыры, активные долготы), так и с локальными полями (активные области, пятна). Крупномасштабное поле, квази-двухлетний цикл связаны, по-видимому, с динамо процессами близ основания конвективной зоны, в тахоклине на глубине около 0.3 радиуса Солнца. С другой стороны, основания солнечных пятен по данным гелиосейсмологии расположены всего на 40–50 тыс. км ниже фотосферы, что указывает на связь локальных полей непосредственно с явлениями под фотосферой.

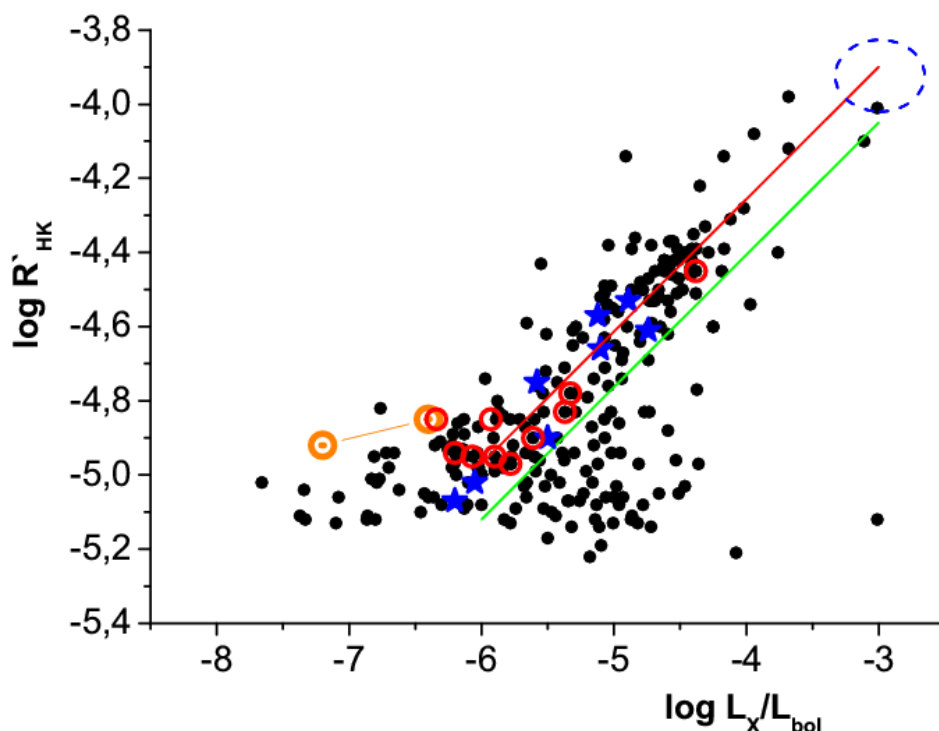


Рис. 1. Сопоставление индексов хромосферной и корональной активности. Красные кружки относятся к звёздам НК проекта с циклом *Excellent*, синие звёздочки – с циклом *Good*. Солнце обозначено своим знаком, соответствующие индексы для максимума и минимума соединены линией. Зелёная прямая линия разделяет звёзды с разными путями эволюции активности. Красная линия является регрессионной прямой, аналогичной введённой в [1]. Пунктирный овал указывает на положение звёзд с насыщением активности.

Процессы, происходящие близ основания конвективной зоны, по-разному влияют на формирование активности в выделенных двух группах звезд горячее и холоднее Солнца. Это согласуется с тем, что на красных карликах более отчетливо проявляются активные области и вспышки, развивающиеся именно в локальных магнитных полях. Подфотосферное динамо оказывается более эффективным для поздних G и ранних K звезд по сравнению с процессами на очень больших глубинах расположения области тахоклина на них.

Магнитные поля на G звёздах

До сих пор существовало лишь несколько измерений магнитных полей на маломассивных карликах. Как и для Солнца, напряжённость поля вдоль луча зрения определялась непосредственно по спектрам, включающим одну или несколько магниточувствительных линий, прежде всего в видимой, а затем в ИК-области. Такое изучение эффекта Зеемана на поздних звёздах позволило обнаруживать пятна напряженностями 1–3 кГс, покрывающими до 10% их поверхности. Величина сигнала меняется с фазой периода осевого вращения. Достаточно надёжно это изучено лишь для нескольких звёзд. Соответствующие данные приведены, например, в работах [6, 7]. В основном это K звёзды (ϵ Eri, 61 Cyg A, σ Dra) и G звезда ξ Boo A (G8 V). Для наиболее активных звёзд с периодами вращения 6 и 12 дней наблюдения магнитного поля согласуются с моделью, в которой пятна с напряженностью около 1.5 кГс занимают примерно 20% и 10% площади поверхности звезды соответственно. У звёзд с периодами вращения около 30 дней магнитные поля в пятнах достигают 1–2 кГс, и их площадь около 2%.

Эти данные хорошо согласуются с современными представлениями о магнитных полях звёзд. Во-первых, изменение напряженности магнитных полей с фазой осевого вращения вместе со спектральными данными дают возможность промоделировать распределение неоднородностей на поверхности звезды. Этот метод зеемановского-доплеровского картирования позволяет в первом приближении разделить вклад пятен и крупномасштабного поля. При этом сохраняются основные закономерности, такие как зависимости среднего поля по поверхности от скорости осевого вращения и общего уровня активности звезды [8].

В результате, можно сделать вывод о том, что общий характер магнитных полей на G и K звёздах аналогичен наблюдаемому на Солнце в современную эпоху. А именно, существует крупномасштабное поле, наиболее отчётливо проявляющееся в полярных зонах, и локальные поля в низких широтах. Вклад магнитных полей различных масштабов в среднее значение меняется на протяжении нескольких лет и зависит от ориентации оси вращения и оси диполя по отношению к лучу зрения.

Во-вторых, новая информация о магнитных полях звёзд солнечного типа получена недавно в рамках программы “*Bcool Collaboration*” [9]. На больших телескопах проведены спектрополяриметрические наблюдения 170 поздних звёзд. Для измерения поля использовались одновременно от 5000 до 11000 спектральных линий, что позволило измерять достаточно точно значение продольной составляющей магнитного поля звёзд. Эта величина V_l представляет сигнал, осредненный по всем наблюдениям звезды. Эти спектральные наблюдения позволяют определить как фундаментальные параметры этих звёзд, так и уровень их хромосферной активности. Примерно у 40% из этих звёзд магнитное поле обнаружено. Авторы при-

водят средние значения модуля продольного поля $|B_l|_{\text{mean}}$, равные 5.7 Гс для исследованных К карликов, 3.2 Гс для G карликов и 3.3 Гс для F звёзд.

Мы кратко проанализировали эти данные только для G-dwarfs, чтобы примерно оценить напряженность магнитного поля на молодом Солнце. Данная методика даёт возможность регистрировать магнитного поля, соответствующие эпохам, когда глобальный диполь Солнца достигает максимальных величин около 1 Гс (например, таким было общее магнитное поле Солнца в 1991 году [10]). Мы выбрали из Табл. 3 работы [9] все G звёзды со значениями B_l , превышающими 3σ . Из списка мы исключили несколько быстровращающихся и, следовательно, молодых звёзд с большими магнитными полями. Таким образом, окончательный список включает 28 G звёзд, чьи периоды вращения более 5.0 дней (по приближенной оценке по данным о хромосферных индексах из Табл.5 в [9]).

Результат приведен на Рис. 2. Значения модуля поля $|B_l|$ двух звёзд ξ Boo A и 61 UMa существенно превышают величины, характерные для таких скоростей вращения. Как отмечалось в работе [9], это вероятнее всего связано с неопределённостью значения угла наклона оси вращения звезды к лучу зрения. Без этих двух звёзд коэффициент корреляции величин $|B_l|$ и $v \sin i$ превышает 0.70.

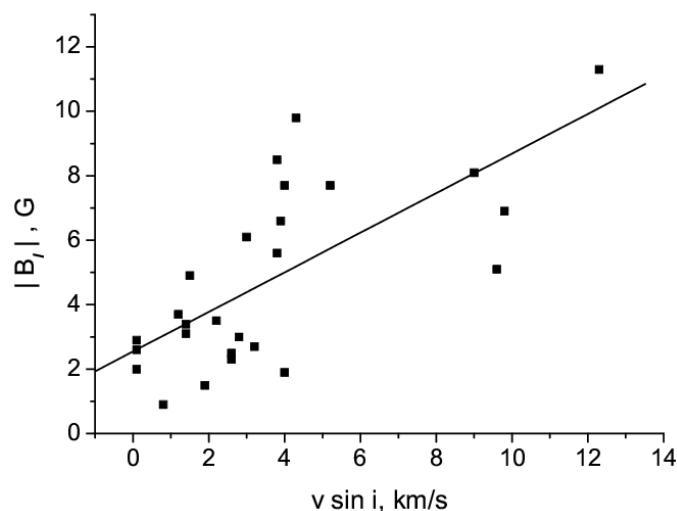


Рис. 2. Модуль продольного магнитного поля в Гауссах для активных G звёзд с различными скоростями вращения в км/с (периоды осевого вращения более 7 дней). Прямая линия соответствует линейной регрессии.

Итак, если исключить звёзды, где поле надёжно не регистрируются, а также несколько звёзд с очень большими полями, можно получить среднее значение модуля поля $|B_l|$, равное 4.72 ± 0.53 Гс для G звёзд. Зависимость, соответствующая Рис. 2, отражает ослабление среднего поля при торможении звезды, т.е. с увеличением возраста. Найденное среднее значение поля соответствует скорости вращения около 4 км/с, что вдвое быстрее вращения современного Солнца. Это позволяет принять такую величину поля в

качестве среднего значения для G звёзды с периодом вращения около 10 дней, что соответствует возрасту 1–2 млрд. лет.

Сопоставим эту величину с данными об общем магнитном поле Солнца как звезды. Значения, осреднённые по керрингтоновскому обороту, близ максимумов циклов не превышают 0.5 Гс. Таким образом, средняя напряжённость магнитного поля молодой G звезды, по крайней мере, на порядок выше, чем у максимального Солнца в современную эпоху.

Заметим, что такая оценка подтверждается тем, что величины $|B_{\parallel}|$ для звёзд, параметры которых наиболее близки к характеристикам молодого Солнца, равны 8.5 Гс для V 2292 Oph и 7.7 Гс для κ^1 Ceti (по другим данным у этой звезды $|B_{\parallel}| = 7.0$ [10]). Это согласуется с приведенным выше общим выводом.

Сейчас появляется информация о структуре крупномасштабных магнитных полей поздних звёзд. В частности, обнаружено, что медленно вращающиеся звёзды обладают полями примерно такой же структуры как на Солнце, которые регулярно меняются в ходе магнитного 22-летнего цикла. Иначе говоря, глобальный диполь существует фактически всё время, и только во время переполюсовки магнитный экватор смещается по долготе, что можно трактовать как проявление крупномасштабной тороидальной компоненты. Активные области располагаются достаточно хаотично, активные долготы выделяются плохо, и тороидальные поля характеризуются сравнительно небольшим масштабом (локальные поля). В то же время на G звёздах с периодами вращения менее 12 дней крупномасштабная тороидальная компонента отчётливо выражена [8]. Хотя она преобладает над крупномасштабными полоидальными полями, различия напряжённостей невелики. Пока сложно соотнести эти новые выводы с данными о пятнах на быстро вращающихся G звёздах.

Звезды с активностью, наиболее близкой к молодому Солнцу

Значения индексов активности Солнца для средних максимумов и минимумов циклов последних 50 лет приведены на Рис. 1. Здесь же приведены данные для звёзд, у которых цикл активности, аналогичный 11-летнему на Солнце, выражен превосходно и хорошо (группы *Excellent* и *Good* по терминологии НК проекта). Видно, что все эти звёзды входят в основную группу звёзд. Все 14 звёзд, включая Солнце, с близким уровнем хромосферной активности, вращаются довольно медленно (периоды более 20 дней), и только 4 звезды *Good* и одна типа *Excellent* – HD 152391 (V 2292 Oph) вращаются быстрее и характеризуются более высокими уровнями активности хромосферы и короны. Видно, что хромосферная активность современного Солнца согласуется со скоростью осевого вращения других активных звёзд, в частности, с циклами типа *Excellent*, в то время как рентгеновское излучение существенно меньше, чем у них. С чем связана относи-

тельная слабость рентгеновского излучения современного Солнца, до сих пор надежно не установлено.

Эта работа была инициирована необходимостью выяснения характера активности Солнца в различные эпохи его эволюции, т.е. на временных шкалах в миллиарды лет. Такая проблема возникла в связи с изучением некоторых аспектов палеобиологии, геологии, земного магнетизма и т.д. Проведенное в последние годы изучение эволюции активности солнечного типа показывает, что её характер в основной группе звезд сохраняется в течение последних примерно 3 млрд. лет. Это позволяет представить особенности активности от возникновения Солнца до тех эпох, когда активность типа солнечной установилась. Для первых 1–2 млрд. лет жизни Солнца такое рассмотрение существенно менее надёжно, чем для более поздних этапов, ибо взаимодействие процессов внутри молодой звезды и во внешних слоях её атмосферы изучается без хорошо исследованного «образца».

Имеются основания считать, что характер активности молодого Солнца очень близок к звёздам основной группы, вращающимся с периодом около 10 дней. Обсудим эту утверждение подробнее. Ясно, что относительная площадь пятен на поверхности молодого Солнца значительно превышала современное значение даже в самый высокий максимум цикла. На диаграмме «хромосфера – корона» сильно запятнённые звёзды, в большинстве своём относящиеся к переменным карликовым звёздам типа BY Dra, располагаются компактной группой в области значений $\log R'_{HK} = -4.4$ и $\log L_x/L_{bol} = -4.5$. Однако только запятнённость не может служить индикатором возникновения активности солнечного типа, ибо и до (выше), и после этой точки вдоль красной прямой количество пятен остается очень большим.

Существуют несколько указаний на то, что у звёзд с периодами менее 10 дней активность существенно отличается от солнечной. Они в той или иной степени связаны с появляющимися данными о магнитных полях и развитии связанных с ними нестационарных процессов. На современном Солнце активность связана с эволюцией локальных магнитных полей, хотя регулирующая роль крупномасштабного поля проявляется в различных событиях. На быстро вращающихся маломассивных звездах крупномасштабная структура короны, активные долготы выражены очень отчетливо, что сближает их с совсем молодыми объектами типа T Tau. Если продольное поле активных G звёзд всего на порядок превосходит максимальную напряженность солнечного диполя, то для быстровращающихся звёзд характерно превышение уже на два порядка. Более общим является утверждение, относящееся к большинству этих звёзд на диаграмме, которые в нашем случае выбраны по наличию усиления обилия лития в их фотосферах. Это утверждение состоит в том, что все процессы – корональные явления, длительные вспышки и т.д. приближаются уже к явлениям на позд-

них субгигантах. Недавно обнаружено существенное различие в частоте супервспышек на G звёздах, периоды осевого вращения которых больше или меньше 10 дней.

На диаграмме «хромосфера – корона» точка, соответствующая молодому Солнцу, располагается лишь несколько ниже центра расположения звёзд типа BY Dra. В эту область попадают, в частности, известные активные звёзды HD 1835 (BE Cet), HD 20630 (κ^1 Cet) и HD 152391 (V 2292 Oph). Относительная площадь пятен G2 звезды BE Cet достигает 3.3% поверхности [12]. Звезда V 2292 Oph спектрального класса G7 выделяется среди звёзд с хорошо выраженными циклами более быстрым вращением по сравнению с другими звёздами с циклами группы *Excellent*. В последние годы отмечено, что циклическая активность с периодом около 11 лет на этой звезде стала менее регулярной. Это позволяет рассматривать её как представителя группы *Good*. Периоды вращения этих звёзд составляют 8, 9 и 11 дней соответственно.

Подчеркнём, что при отборе звёзд, где развивается активность, аналогичная солнечной, нельзя использовать только близость их периода к 10 дням. Существуют звёзды с такими же периодами вращения, у которых рентгеновское излучение примерно на порядок больше. Они примыкают к звёздам с насыщением активности, и для них рентгеновское излучение гораздо слабее зависит от осевого вращения, чем для звёзд с солнечным типом активности (см., например, [2]).

Иначе говоря, распределения активных поздних звёзд по периодам вращения для молодых звёзд и объектов с солнечным типом активности имеют небольшую общую часть в области периодов около 10 суток. Мы относим «молодое Солнце» к группе звёзд, большинство которых вращается с периодами, превышающими 10 дней.

Таким образом, фактически мы определили точку на диаграмме, которая связана с возможностью развития регулярного цикла активности. Здесь звезда солнечной массы уже вышла на главную последовательность, конвективная зона полностью сформировалась, и её глубина соответствует современному значению. Возраст таких звёзд заключен в пределах 1–2 млрд. лет, и периоды осевого вращения близки к 10 дням. Примером здесь служит звезда HD 152391 (V 2292 Oph) с периодом 11 суток и циклом *Excellent*.

Об активности молодого Солнца

Условно можно принять такие значения индексов активности молодого Солнца: запятненность 3% площади поверхности, индекс хромосферной активности $\log R'_{HK} = -4.45$, индекс корональной активности $\log L_x/L_{bol} = -4.5$ и возраст 1.5 млрд. лет. Полная (боллометрическая) светимость такой звезды и светимость в видимом диапазоне спектра превышала современные значения не более чем на 20%. Однако излучение внешней атмосферы

тогда было существенно выше. Хромосферная активность была сопоставима с уровнем активности звёзд в рассеянном скоплении в Гиадах. Рентгеновское излучение L_x достигало примерно 10^{29} эрг/с в области от 0.1 кэВ до 2.4 кэВ, что более чем на 2 порядка превышало современное значение (заметим, что во всей статье используются величины L_x , пересчитанные к указанной полосе ROSAT, см. [2]).

Поскольку развитие активности с момента её формирования до настоящего времени связано с эволюцией магнитных полей, на ранних этапах следует ожидать изменений режимов работы динамо механизма. Хаотические усиления слабых фоновых магнитных полей, характерные для очень быстро вращающихся объектов, должны приводить не только к появлению мелкомасштабных особенностей реликтового магнитного поля, но и к возникновению полей крупного масштаба. Тогда их относительная роль полей крупного масштаба была более существенна, чем сейчас. При этом появляется возможность определённого взаимодействия крупно- и мелкомасштабных полей и выхода динамической системы на регулярный (циклический) режим. Длительность и амплитуда такого цикла могли сильно отличаться от характеристик современного солнечного цикла. Вероятно, квазидвухлетние изменения были более значительными, чем сейчас, особенно по сравнению с 10–11-летним циклом.

При развитии такого цикла, где роль крупномасштабного поля велика, вклад излучения областей над нейтральной линией магнитного поля в общий поток хромосферного и коронального излучения был значительно выше, чем в современную эпоху. Иначе говоря, для более молодой звезды следует принимать во внимание полную длину нейтральной линии, а не только источники над ней внутри активных областей. При этом активные долготы оказываются более выраженными во всех спектральных диапазонах.

В современную эпоху потеря массы Солнцем составляет 3×10^{-13} масс Солнца в год и связана, в основном, с квазистационарным истечением вещества из короны. Что можно сказать о потере массы молодым Солнцем? Основная информация содержится в наблюдательных данных об излучении звёздных корон в областях мягкого рентгена и ВУФ. Рентгеновское излучение молодого Солнца было значительно сильнее, чем сейчас. Однако это довольно слабо влияло на истечение газа. Действительно, мягкое рентгеновское излучение возникает в низких горячих корональных петлях. Низкоскоростной солнечный ветер формируется вблизи вершин этих петель, в области каспа. Его поток усиливается незначительно при возрастании массы горячей корональной плазмы. Таким образом, даже если мягкое рентгеновское излучение G звезды приближается к уровню насыщения, т.е. возрастает на 3–4 порядка по сравнению с Солнцем, темп истечения вещества в области каспа и выше, в стримерах увеличится не более, чем на порядок. Высокоскоростной солнечный ветер, истекающий из областей с от-

крытой конфигурацией магнитного поля, также превышал современное солнечное значение. Однако поток высокоскоростного ветра молодого Солнца должен был быть усилен потому, что плотность плазмы в основании корональной дыры (или полярной области) была выше, в то время как истечение формировалось на более высоких корональных уровнях. Поэтому, как и на современном Солнце, вклады солнечного ветра со скоростями 300–500 км/с и 500–1000 км/с в потерю массы молодым Солнцем сопоставимы. Вообще говоря, МГД-расчёты подтверждают такую оценку, если рассматривать звёзды с возрастом не моложе 600–800 млн. лет [13]. Разумной представляется оценка квазистационарной потери массы молодым Солнцем порядка 10^{-11} масс Солнца в год.

Формирование ветра в эпоху молодого Солнца отличалось от того, что происходит в настоящее время тем, что динамические процессы тогда происходили гораздо чаще. Вследствие этого нестационарные явления играли тогда более значительную роль в суммарной потере массы. Современные наблюдения показывают, что достаточно мощная вспышка с энергией около 10^{31} эрг сопровождается, как правило, корональным выбросом вещества (СМЕ) с массой около 10^{16} грамм. Например, оценим потерю массы за счёт СМЕ для звезды κ^1 Ceti с периодом около 9 дней, которую можно считать аналогом молодого Солнца. Так, на κ^1 Ceti частота вспышек с энергией около 10^{34} эрг примерно на 2 порядка выше соответствующей величины для большинства наиболее активных звёзд солнечного типа. Если экстраполировать эту величину к энергии 10^{31} эрг с тем же законом, что на Рис. 9 в работе [14] получаем частоту таких событий 3×10^{-26} эрг $^{-1}$ звезда $^{-1}$ год $^{-1}$. Это означает, что на этой звезде должно происходить 2×10^5 таких событий в год. Это соответствует потере массы, связанной со СМЕ, 10^{-12} масс Солнца в год. Несмотря на то, что эта величина составляет всего 10% возможного темпа квазистационарного истечения молодого Солнца, доля СМЕ в темпе потери массы была существенно выше, чем у современного Солнца.

Таким образом, общая потеря массы молодым Солнцем велика, около 10^{-11} масс Солнца в год. Если такой темп сохраняется в течение примерно миллиарда лет, то это приведёт к уменьшению массы Солнца на 1%. Это не повлияет на болометрическую светимость Солнца, но поддерживает высокий темп уменьшения момента количества вращательного движения.

Остановимся кратко на вспышечной активности молодого Солнца. До настоящего времени вспышки на G карликах (за исключением Солнца) наблюдались очень редко. 7 марта 2009 г. был запущен КА *Kepler* и были проведены наблюдения более 0.5 миллиона звезд. Мониторинг в полосе V выполнялся в двух режимах, с временным разрешением около 1 мин и 30 мин, причём пока основные выводы получены по массиву данных с более низким разрешением. Все энергии «белых» звёздных вспышек пересчитаны в болометрические величины в приближении чернотельного излучения.

Первое специальное исследование данных КА *Kepler*, посвящённое G звёздам, проведено в [15]. Там приводятся данные обо всех вспышках, зарегистрированных с апреля по декабрь 2009 г. на 83 000 звёзд. В течение этих 120 дней только на 148 карликах наблюдались 365 вспышки с полной энергией $3 \times 10^{33} - 3 \times 10^{35}$ эрг, т.е. на 1–3 порядка больше, чем энергия самой большой вспышки на современном Солнце (см. также [17]). Такие «супервспышки» являются весьма редкими явлениями. Основная масса этих звёзд вращается с периодами 20–30 дней, т.е. примерно как современное Солнце. Большинство супервспышек возникает на звёздах с периодами вращения от нескольких часов до нескольких дней, но значимое их число происходит на объектах, вращающихся с периодами 12–16 дней.

Надёжные данные о частоте супервспышек представлены в [14] для двух групп звёзд с периодами около 3 и более 10 дней. Отметим, что в области периодов около 10 дней отмечен минимум вспышечной активности. Для событий с полной энергией 10^{34} эрг эта величина оценивается как 2×10^{-33} эрг⁻¹звезда⁻¹год⁻¹ и 2×10^{-37} эрг⁻¹звезда⁻¹год⁻¹ для двух групп звёзд соответственно. Отсюда количество вспышек с такой полной энергией на одной активной звезде в год оценивается величиной 0.2 – **одна вспышка в 5 лет** и 0.002 – **одна вспышка в 500 лет** для двух упомянутых групп соответственно. Вспышки с большей энергией возникают гораздо реже. Так, в более медленно вращающейся группе, включающей молодое Солнце, вспышки с энергией 10^{35} эрг, вероятно, появляются с частотой – **одно событие в 5000 лет**.

В заключение сделаем одно замечание о характере вспышек на Солнце в возрасте 1–2 млрд. лет. В последние годы происхождение солнечных вспышек все теснее связывается с токами, протекающими во внешних слоях атмосферы активных областей. Там отношение газового давления к магнитному становится существенно меньше единицы, и магнитное поле над фотосферой можно считать бессильным. Токи здесь текут вдоль силовых линий в тонких нитях, располагающихся в активной области над линией раздела полярностей. Различие между полной (E) и потенциальной энергией (E_{pot}) в объёме – короне активной области – величина $E_f = E - E_{\text{pot}}$ называется свободной энергией

Таким образом, получены надёжные свидетельства о том, что при эволюции магнитных полей в хромосфере активной области накапливается свободная энергия. Для каждой активной области на Солнце можно найти абсолютный предел полной энергии вспышек, которые могут там происходить. Сравнение с наблюдениями показывает, что на мощную вспышку может расходоваться до 15% свободной энергии активной области. Для мощного центра активности на современном Солнце величина свободной энергии равна 2×10^{33} эрг и там могут появляться вспышки с полной энергией 3×10^{32} эрг.

На молодом Солнце средние напряжённости продольных магнитных полей примерно на порядок превосходят значения, наблюдаемые на Солнце сейчас. Поскольку энергия пропорциональна квадрату напряженности поля, величина E_f в центрах активности должна изменяться примерно в 100 раз. Повторяя прежние рассуждения для современного Солнца, получаем верхнюю оценку энергии вспышек на молодом Солнце 3×10^{34} эрг.

Подчеркнём, что большая средняя напряженность магнитного поля на молодом Солнце связана не столько с более сильными полями в центре пятен, сколько с длиной линии раздела полярностей, которая значительно возрастает в области большой напряженности полей при увеличении запятненности. Мы здесь не останавливаемся на возможных моделях и особенностях вспышек на молодом Солнце. Очень важным является только то, что наблюдения магнитных полей и супервспышек приводят к одной и той же верхней границе полной энергии нестационарных процессов. Это свидетельствуют об общей природе вспышек на Солнце во все эпохи эволюции активности: накоплении свободной энергии магнитного поля и ее последующей реализации.

Отмеченная общность природы явлений позволяет более или менее надёжно оценить потоки излучения вспышек в различных диапазонах и уровни радиации на верхней границе атмосферы Земли. Укажем только одно следствие – ускорение частиц над пятнами должно играть примерно ту же роль, что и во вспышках в современную эпоху. Это означает, что при росте потоков протонов в диапазоне от нескольких до сотен МэВ значительного увеличения потоков проникающей радиации (выше нескольких ГэВ) не ожидается. На Земле небольшой слой воды толщиной более 10 см служит уже хорошей защитой от радиации.

Напомним, что речь идет здесь об этапах эволюции Солнца после эпохи установления активности солнечного типа. В это время разрушительные вспышки, скорее всего, уже не должны происходить. Однако при возрасте Солнца менее 1 млрд. лет могут происходить нестационарные явления иной природы, в которых нельзя исключить эффективное ускорение частиц до энергий, превышающих 10 ГэВ. Здесь радиационные условия на Земле могут претерпевать очень большие изменения.

Заключение

Солнечная активность обусловлена взаимодействием магнитных полей различных масштабов. Что можно сказать об активности Солнца в ту эпоху, когда квазистационарное развитие этих процессов только начиналось? Основой такого рассмотрения служат появляющиеся данные о магнитных полях и характере активности в различных слоях атмосферы G звёзд главной последовательности. Прежде всего, мы рассматриваем вопрос о возрасте и/или скорости осевого вращения такого молодого Солнца. Мы основываемся на наших результатах об эволюции активности солнеч-

ного типа и находим, что квазистационарная активность сформировалась при возрасте около 1–2 млрд. лет, когда вращение затормозилось, и период осевого вращения Солнца приблизился к 10 дням.

Мы определили уровни активности хромосферы и короны такого молодого Солнца. Характер его активности был близок к процессам на G звёздах HD 152391 (V 2292 Oph) и HD 1835 (BE Cet) с периодами вращения 11 и 8 дней соответственно. А именно, полная поверхность, покрытая пятнами, примерно на 2 порядка превышала современное значение в максимум циклов, уровни активности в хромосфере и короне были достаточно высокими, близкими к звёздам Гиад, но не достигали насыщения.

Потеря массы молодым Солнцем оценивается величиной 10^{-11} масс Солнца в год, причем вклад СМЕ в эту величину существенно больше, чем в современную эпоху. На основании наблюдений супервспышек на G звёздах с помощью КА *Кеплер* определена вероятная частота нестационарных явлений с полной энергией около 10^{34} эрг. Показано, что такие супервспышки могут возникать в магнитных полях, реально наблюдаемых на G карликах. Отметим, что для возраста Солнца менее 1 млрд. лет активность может уже сильно отличаться от предсказанной в этой работе, и в частности супервспышки могут возникать гораздо чаще.

Работа выполнена в рамках грантов РФФИ 12-02-00884а, поддержки Научных школ НШ 1675.2014.2 и программы РАН № 28 «Проблемы происхождения жизни и формирования биосферы».

Литература

1. *Mamajek E.E. and Hillenbrand L.A.* Improved Age Estimation for Solar-Type Dwarfs Using Activity–Rotation Diagnostics // *Astrophys. J.* V. 2008. 687. P. 1264–1293.
2. *Wright N.J., Drake J.J., Mamajek E.E., Henry G.W.* // The Stellar-activity-Rotation Relationship and the Evolution of Stellar Dynamos // *Astrophysical Journal*. 2011. V. 743. P. 48, 16 pp.
3. *М.М. Кацова, М.А. Лившиц* // Эволюция активности солнечного типа маломассивных звёзд // *Астрон. журн.* 2011. Т. 88. № 12. С 1217–1225, (= *Astronomy Reports*. 2011.V. 55. No. 12. P. 1123–1131.).
4. *Katsova M.M.* // The Evolution of Cyclic Activity of the Sun in the Context of Physical Processes on Late-Type Stars // *The Sun: New Challenges. Astrophys. Space Science Proc.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg. V. 30, P. 19–31, 2012.
5. *М.М. Кацова, М.А. Лившиц, Т.В. Мишенина* // Характер активности солнечного типа и глубина конвективной зоны // *Астрон. журн.* 2013. Т. 90, № 9. С. 765–776.
6. *Valenti J.A., Marcy G.W., Basri G. S.* // Infrared Zeeman analysis of epsilon Eridani // *Astrophys. J.* 1995. V. 439. P. 939–956.
7. *Tarasova T., Plachinda S., Romyantsev V.* // Measurements of the General Magnetic Fields of Active Late-Type Stars // *Astron. Rept.* 2001.V. 45. P. 475–481.
8. *Petit P., Dintrans B., Solanki S.K., et al.* // Toroidal vs. poloidal magnetic fields in Sun-like stars: a rotation threshold // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2008. V. 388. P. 80–88.

9. Marsden S., Petit, P. Jeffers S.V. et al. // A Bcool magnetic snapshot survey of solar-type stars // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, in press, = astro-ph 1311.3374, 14 Nov 2013.
10. Kotov V.A., Haneychuk V.I., Tsap T.T. // New measurements of the mean magnetic field of the Sun and its rotation // Astronomy Reports. 1999. V. 43. P.185–190.
11. do Nascimento J.D., Jr., Petit P., Marsden S., et al. // High-resolution spectropolarimetric of κ^1 Cet: A proxy for the young Sun // in: "Magnetic Fields Throughout Stellar Evolution", Proceedings IAU Symposium No. 302, 2013, P. Petit, M.M. Jardine & H.C. Spruit, eds. Astro-ph 1310.7620, 2013.
12. Алексеев И.Ю. Запятненные звёзды малых масс. Одесса, Астропринт, 2001. – 137 с.
13. Cohen O., Drake J.J. // A Grid of MHD Models for Stellar Mass Loss and Spin-down Rates of Solar Analogs // Astrophys. J. 2014. V. 783, Issue 1, P. 55.
14. Shibayama T., Maehara H., Notsu S. et al. // Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler. I. Statistical Properties of Superflares // Astrophys. J. Suppl. 2013. V. 209. P. 5, 13 pp.
15. Maehara H., Shibayama T. Notsu S. et al. // Superflares on solar-type stars // Nature. 2012. V. 485. P. 478–481.
16. М.М. Кацова, М.А. Лившиц // Активность Солнца в возрасте 1–2 миллиарда лет» «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013», ГАО РАН, Пулковое, С.-Петербург, 115–120, 2013.

ACTIVITY OF THE SUN IN THE AGE OF 1–2 GYR

Katsova M.M.¹, Livshits M.A.^{1,2}

¹*Sternberg State Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University,
Moscow, Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation,
Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, Russia*

We discuss briefly the basic properties of the solar activity in the present epoch and the development of ideas of gyrochronology about the evaluation of the stellar age from their activity level. We revealed a set of active late-type dwarfs, which slowed down to rotation periods of 10–11 days and have the indices of the chromospheric and coronal activity corresponding to the age of 1–2 billion years. We selected several stars, the activity of which can be as an example of the phenomena occurring in the young Sun. The analysis of activity of these stars allows us to estimate levels of photospheric, chromospheric and coronal activity of the young Sun. We estimate the mass loss due to the quasi-stationary and coronal mass ejections. Based on the Kepler observations of superflares on G stars, we evaluate a probable frequency of non-stationary phenomena with a total energy of about 10^{34} ergs. It is shown that such superflares may occur in magnetic fields actually observed on G dwarfs.

МАУНДЕРОВСКИЙ МИНИМУМ – ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСКИ, ГИПОТЕЗЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Соколов Д.Д.

МГУ, ИЗМИРАН, Москва, Россия

Как показывают сохранившиеся в архивах (в первую очередь, в архивах Парижской обсерватории) данные инструментальных наблюдений Солнца, в работе физического процесса, приводящего к возникновению и поддержанию солнечного цикла, в конце XVII – начале XVIII века произошел серьезный сбой, известный под названием Маундеровского минимума. Личной заслугой Людовика XIV является то, что многие этапы этого замечательного события были наблюдаемы с тщательностью, которая не легко достижима даже в современной обсерватории. Косвенные данные изотопной геохимии показывают, что подобные же сбои до этого неоднократно возникали и в прошлом. С разной степенью уверенности выделяется до 27 минимумов солнечной активности, подобных Маундеровскому, на протяжении 10 тыс. лет. Известно также несколько менее выраженных и разнотипных эпизодов существенного отклонения циклической солнечной активности от того, что считается ее стандартной формой. К сожалению, эти наблюдения менее профессиональны, чем наблюдения группы астрономов-профессионалов, сформированной Людовиком XIV.

Современная теория динамо предоставляет ряд возможностей для объяснения природы подобных минимумов активности. В связи с ограниченностью наблюдательных возможностей астрономов прошлых веков полное сопоставление этих гипотез с наблюдениями станет возможно лишь при следующем минимуме. В рамках имеющихся наблюдательных данных сопоставление с наблюдениями выдерживает простейшая гипотеза, объясняющая возникновение Маундеровского минимума статистическими флуктуациями параметров солнечного динамо.

Описание феноменологии минимума Маундера и существовавших в тот момент подходов к его объяснению было рассмотрено в трудах предыдущего коллоквиума [1], поэтому здесь мы рассмотрим те новые данные, которые удалось извлечь из архивов за прошедшее время, а также прогресс в их теоретическом осмыслении. Разумеется, наиболее наблюдательная значимая информация об этом катастрофическом событии была проанализирована в свое время самой первой, а сейчас трудно рассчитывать на находки в архивах чего-то совершенно нового, тем не менее, работа над уточнением важных деталей происходит достаточно интенсивно. Учитывая междисциплинарный характер конференции, мы приводим не полную библиографию в силу ее обширности, а лишь некоторые публикации, позволяющие неспециалисту войти в проблему.

Важной частью этой работы стала систематизация и введение в научный оборот имеющейся наблюдательной базы данных по минимуму Маундера. Проблема состоит в том, что значительная часть этих данных была обработана непосредственно накануне того, как сеть Интернет стала общепринятой средой для обмена данными. Некоторые ключевые фигуры, определившие этот этап работы с данными (прежде всего Э. Нем-Риб) ушли из жизни до того, как оцифровка и погружение в Интернет данных стала естественным шагом. Сейчас этот пробел приходится восполнять, во многом повторяя уже сделанную работу. Ключевой фигурой в этих интернациональных усилиях стал Р. Арльт из Института астрофизики, Потсдам, Германия.

Наиболее дискуссионной частью минимума Маундера остается его начало. Проблема в том, что в этот момент французская школа астрономов в лице Ж. Пикара еще только разворачивала свою деятельность, многие данные этого периода сохранились не в исходных записях, а в пересказе. Оказывается, что данные Пикара противоречат данным других наблюдателей, прежде всего испанских. Разумеется, противоречия в данных встречаются в других временных интервалах времени минимума Маундера, однако в более поздний период систематические и выполненные по единой методике французские наблюдения пользуются преимуществом, тогда как для начала минимума Маундера это не является очевидным. При этом данные Пикара говорят о внезапном вхождении Солнца в минимум Маундера, а данные испанских наблюдателей – о том, что это вхождение было постепенным. Современному поколению исследователей удалось найти аргументы, показывающие, что вторая интерпретация, по-видимому, является более правильной (см. для обзора [2]). По-видимому, окончательную ясность в этот вопрос внесут астрономы будущего, которым, если они не потеряют интерес к предмету, предстоит наблюдать следующий большой минимум солнечной активности. Подчеркнем, однако, что новые веяния в данном вопросе облегчают, а не усложняют построение моделей динамо для минимума Маундера.

Работа по систематизации имеющихся наблюдений привела исследователей к мысли о том, что с определенной степенью достоверности солнечные баттерфляй-диаграммы можно построить не только для современной (в широком смысле) эпохи и для времени минимума Маундера, но и для большей части эпохи, охваченной телескопными наблюдениями (с 1611 г.). К настоящему времени значительная часть этой амбициозной программы выполнена для XVIII века (см. для обзора [2]). При этом важную роль сыграло введение в научный оборот зарисовок нюрнбергского астронома-любителя Й.К. Штаудахера, которые были известны и ранее, но которые не привлекали пристального внимания исследователей.

Анализ этих данных показал, что еще долгое время после минимума Маундера Солнце обнаруживало нестандартную форму магнитной актив-

ности. Один подобный эпизод – минимум Дальтона – был известен и ранее. К сожалению, про этот эпизод, случившийся во время наполеоновских войн, наблюдательная информация наименее надежна. Сейчас к этому списку прибавился возможный эпизод сбоя ритма солнечной активности с потерей одного из циклов, а также возможный эпизод появления цикла с квадрупольной, а не дипольной, как обычно, симметрией магнитного поля (см. для обзора [2]). В последнем случае важно, что удалось научиться выделять крылья волн активности на баттерфляй-диаграммах, не опираясь ни на данные о полярности групп солнечных пятен, ни об их положении относительно солнечного экватора, а пользуясь только получаемыми в ходе этого анализа данными о плотности солнечных пятен на диаграмме [3, 4].

Хорошо известно, что амплитуда солнечных циклов обнаруживает изменчивость не только в форме больших минимумов, но и во время нормального поведения Солнца. Эта изменчивость описывается некоторыми статистическими закономерностями, известными как правила Вальдмайера и правило Гневышева-Оля. Заранее не очевидно, что изменчивость в форме больших минимумов и в форме, свойственной обычной солнечной активности, имеют одну и ту же природу. Однако в работах [4, 5] проверено, что модели солнечного динамо, учитывающие флуктуации альфа-эффекта, непринужденно воспроизводят (конечно, в определенной области параметрического пространства) не только большие минимумы, но и правила Вальдмайера и Гневышева-Оля. К сожалению, корреляции, составляющие смысл этих правил, не настолько яркие, чтобы сделать легко достижимой задачу ассимиляции данных с целью определения по наблюдениям параметров солнечного динамо.

Смысл объяснения минимума Мундера с помощью флуктуаций альфа-эффекта подсказывает, что природа этих флуктуаций не должна быть существенной для появления больших минимумов, а флуктуировать может не обязательно альфа-эффект, но и любая величины, критически влияющая на возникновение солнечного цикла. Реально такой величиной может служить меридиональная циркуляция. Эта точка зрения нашла свое подтверждение при построении моделей солнечного динамо, дающего большие минимумы (см. [6] и приведенные там ссылки).

Наши знания об альфа-эффекте остаются еще очень недостаточными, однако они пополняются год от года. В частности, недавно удалось научиться оценивать альфа-эффект по т.н. тилт-углу групп солнечных пятен и оценивать его изменения в ходе солнечного цикла [7], а также оценивать альфа-эффект в схеме Бабкока-Лейтона [8], и использовать эти оценки для изучения долговременной динамики солнечного цикла [6].

Упомянем еще обзор [9], суммирующий данные о больших минимумах солнечной активности.

Литература

1. Д.Д. Соколов, В.Н. Задков, Г.С. Собко, В.И. Трухин. Флуктуации интенсивности динамо и феномены долговременной изменчивости солнечной активности и геомагнитного поля, Активность звёзд и Солнца на разных стадиях их эволюции // Астрон. общество, М., 2011, 133–140.
2. D. Sokoloff, R. Arlt, D. Moss, S.H. Saar, I. Usoskin. Sunspot cycles and Grand Minima, Solar and Stellar Variability: Impact on Earth and Planets // Proc. 264 IAU Symp. Rio de Janeiro, Brazil, August 3–7, 2009, eds. A.G. Kosovichev, A.H. Andrei, J.P. Rozelot, IAU, 111–119, 2010.
3. E. Illarionov, D. Sokoloff, R. Arlt, A. Khlystova. Cluster analysis for pattern recognition in solar butterfly diagrams // *Astronomische Nachrichten*. 2011. V. 332. N 6. S. 590–596.
4. Д.Д. Соколов, Е.А. Илларионов, Алгоритмическое выделение крыльев баттерфляй-диаграмм // *Астрономический циркуляр*. 2012. N 1580. С. 1–4.
5. V.V. Pipin, D.D. Sokoloff. The fluctuating alpha-effect and Waldmeier relations in the non-linear dynamo models // *Phys. Scr.* 2011. V. 84. N 6. 065903.
6. V.V. Pipin, D.D. Sokoloff, I.G. Usoskin. Variations of the solar cycle profile in a solar dynamo with fluctuating dynamo governing parameters // *Astronomy and Astrophysics*. 2012. V. 242. A26.
7. С.В. Олемской, А.Р. Чудури, Л.Л. Китчатинов. Флуктуации альфа-эффекта и глобальные минимумы солнечной активности // *Астрономический журнал*. 2013. Т. 90. С. 501–511.
8. A. Tlatov, E. Illarionov, D. Sokoloff, V. Pipin. A new dynamo pattern revealed by the tilt angle of bipolar sunspot groups // *MNRAS*. 2013. 432. 4, 2975–2984.
9. Л.Л. Китчатинов, С.В. Олемской. Действует ли механизм Бэбкока-Лейтона на Солнце? // *Письма в АЖ*. 2011. Т. 37. С. 713–715.
10. D. Sokoloff. The Maunder minimum and the solar dynamo // *Solar Physics*. 2005. V. 224. P. 145–152.

MAUNDER MINIMUM – BASIC FEATURES AND HYPOTHESES OF THE ORIGIN

Sokoloff D.D.

Moscow University, IZMIRAN, Moscow, Russia

Data of solar instrumental observations survived in astronomical archives (that one of Observatoire de Paris, in the first line) shows that the engine supporting cyclic solar activity had serious abnormality at the end XVII – beginning XVIII centuries. The abnormality is known as Maunder minimum. A personal; contribution from the King Louis XIV is the fact that many stages of the event was observed so carefully that such quality of observation is a problem even for modern observatories. Less direct isotopic data shows that the events similar to the Maunder minimum happened many times in the past and allow to isolated 27 Grand minima in the last 10 000 years. Several deviations (e.g. a lost cycle, traces of pronounced quadrupole configuration etc) from the standard type of the cyclic solar activity can be isolated for XVIII – early XIX centuries.

СОЛНЕЧНЫЕ ВСПЫШЕЧНЫЕ СУПЕРСОБЫТИЯ: КОГДА ОНИ МОГУТ ПРОИСХОДИТЬ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЫ ИХ РЕАЛИЗАЦИИ

Ишков В.Н.

ИЗМИРАН, Троицк, Москва

1. Успехи технологического развития земной цивилизации и начавшееся освоение космического пространства ставят в повестку дня вопросы оценки космических факторов, которые в принципе могут уничтожить нашу цивилизацию или нанести ей катастрофический урон, после которого жизнь на Земле может исчезнуть или уровень развития цивилизации резко упадет, и восстановление к исходному уровню может занять неприемлемо большое время. События последних десятилетий показали примеры реального воздействия космических факторов, как гелиосферных (астероидная и кометная опасности – падение фрагментов кометы Шумейкер-Леви 9 на Юпитер в ноябре 2001 г.), так и галактических – потоки галактических космических лучей от сверхновых в нашей галактике и всплески сверхжесткого рентгеновского излучения от галактических нестационарных объектов (событие 27 декабря 2004 г.).

В данной работе мы ограничимся только солнечными активными явлениями, среди которых наиболее мощными являются солнечные вспышечные события.

Надо иметь в виду, что Солнце в настоящем времени находится в середине главной последовательности диаграммы Герцшпрунга-Рассела в середине пути своего развития, в очень устойчивом состоянии. Поэтому никаких внутренних взрывных процессов, угрожающих самому существованию нашей звезды, на ней быть не может.

В данной работе будут рассмотрены наиболее мощные, осуществившиеся и теоретически возможные сверхэкстремальные вспышечные явления на Солнце (вспышечные суперсобытия) и их возможности, фатального для цивилизации, воздействия на околоземное космическое пространство (ОКП).

2. В данной работе под ОКП понимается область, начинающаяся с высот 50–60 км от Земли и простирающаяся на расстояние в десятки земных радиусов до границ с гелиосферой, в которой вещество, ее заполняющее, все еще больше связано с нашей планетой, а не с Солнцем или каким-либо другим астрономическим телом. Понятно, что в этой области мы имеем дело главным образом с естественной плазмой.

Под термином "КОСМИЧЕСКАЯ ПОГОДА" в настоящее время понимается состояние верхних слоев земной атмосферы (мезосферы, термосферы, тропосферы), магнитосферы, ионосферы, – всех слоев ОКП в лю-

бой заданный промежуток времени. Непосредственное воздействие солнечных активных явлений на ОКП принято оценивать в пятибалльной шкале по трем позициям [1], причём экстремальные события должны иметь высший балл в соответствующем виде воздействия:

Таблица 1. Шкала возмущений состояния ОКП (Космическая погода).

	BLACKOUT	SPE	MAGNETIC STORMS
Балл возмущения	R – Рентгеновский балл вспышки (интенсивность)	S – Pr >10 МэВ (интенсивность)	G – MS – Ap(Kp) (интенсивность)
1. малое	$\geq M1 (10^{-5} \text{Вт/м}^2)$	$\geq 10 \text{ pfu}$	$\geq 48 \text{ nT (Kp 5)}$
2. умеренное	$\geq M5 (5 \times 10^{-5} \text{Вт/м}^2)$	$\geq 100 \text{ pfu}$	$\geq 80 \text{ nT (Kp 6)}$
3. большое	$\geq X1 (10^{-4} \text{Вт/м}^2)$	$\geq 1000 \text{ pfu}$	$\geq 140 \text{ nT (Kp 7)}$
4. очень большое	$\geq X10 (10^{-3} \text{Вт/м}^2)$	$\geq 10\,000 \text{ pfu}$	$\geq 240 \text{ nT (Kp 8, 9-)}$
5 экстремальное	$\geq X20 (2 \times 10^{-3} \text{Вт/м}^2)$	$\geq 100\,000 \text{ pfu}$	$\geq 400 \text{ nT (Kp 9)}$

– электромагнитный удар (BLACKOUT) – воздействие электромагнитного излучения во время развития солнечной вспышки в основном на ионосферу (R5 – радиомолчание на несколько часов), которое оценивается по интенсивности мягкого рентгеновского излучения в стандартном диапазоне ($1-8 \text{ \AA} = 12.5-1 \text{ кэВ}$);

– солнечные протонные события (SPE) – приход в ОКП солнечных заряженных частиц, которые воздействуют в основном на радиационную обстановку в окрестности Земли, вызывают рост электронной концентрации над полярными шапками, нарушая радиосвязь на полярных трассах (S5 – до настоящего времени такой поток протонов не наблюдался, максимальный поток протонов был отмечен в августе 1972 года – $8.6 \cdot 10^4$ частиц на $\text{м}^2 - \text{pfu}$);

– возмущения геомагнитного поля (MAGNETIC STORMS) – следствие прихода в ОКП потоков солнечной плазмы повышенной плотности, скорости частиц и температуры с усиленным магнитным полем (G5 – магнитная буря с Ap > 400 nT).

3. Определение солнечных экстремальных событий полностью и целиком зависит от тех возмущений (значимых отклонений от фоновых значений) ОКП или в любой точке гелиосферы, которые производят солнечные активные явления. Таким образом, естественно было бы определить солнечные экстремальные вспыхивающие события как большие мощные солнечные вспышки, которые сопровождаются максимально возможными по интенсивности всплесками во всех диапазонах электромагнитного излучения и наиболее мощными динамическими проявлениями последствий вспыхивающего энерговыделения (ударные, МГД и поверхностные волны, корональные выбросы вещества). После них в околоземном космическом

пространстве должны осуществляться максимальные геофизические возмущения по всем трем позициям, т.е. R5, S4, G5 [2]. Однако солнечные протонные события (S) и возмущения геомагнитного поля (G) сильно зависят от локализации солнечного вспышечного события на видимом диске Солнца. От самой мощной вспышки вблизи лимбов Солнца (например, 4.11.2003 г. – самого большого вспышечного события 23 солнечного цикла, произошедшего на западном лимбе) геомагнитные возмущения и поток высокоэнергичных частиц будут значительно снижены, так как вся энергия коронального выброса вещества и максимум потока протонов этой вспышки пройдут мимо Земли. С другой стороны, даже солнечное вспышечное событие просто большого и даже среднего рентгеновского балла со сложной структурой выделения энергии, например, два или более моментов энерговыделения, сопровождающихся корональными выбросами вещества, могут привести к тому, что взаимодействующие межпланетные возмущения усилят друг друга и вызовут экстремальную по интенсивности магнитную бурю. Самый выразительный пример даёт наибольшая, экстремальная по интенсивности, магнитная буря прошедшего 23 цикла солнечной активности 20 ноября 2003 года, источником которой было большое вспышечное событие 18 ноября 2003 г. с двумя средними по баллу рентгеновскими всплесками (балла M3.9 и M4.5) и выбросом солнечного волокна между ними. Каждое энерговыделение в данном событии сопровождалось корональным выбросом вещества, и их взаимодействие и привело к резкому увеличению интенсивности магнитной бури, однако её интегральные оценки соответствуют только большой магнитной буре, отнюдь не экстремальной. Поэтому необходимо отличать собственно солнечные вспышечные экстремальные события от их воздействий на ОКП.

Под солнечным экстремальным вспышечным событием обычно понимают солнечную вспышку с интенсивностью излучения в диапазоне стандартного мягкого рентгена не менее 10^{-3} Вт·м⁻² (рентгеновский балл X10) с интегральным потоком в среднем ≥ 2 Дж/м², сопровождающуюся быстрым корональным выбросом вещества ($V_{CME} \geq 1500$ км/с) и мощным радио всплеском [3]. Такие солнечные вспышки сопровождаются интенсивными динамическими радио всплесками II и IV и других типов. Эти вспышечные события, несомненно, оказывают очень сильное воздействие на гелиосферу, как в плоскости эклиптики, так и вне её, в том числе и на ОКП, если Земля попадает в зону их воздействия. Но ни одно экстремальное вспышечное событие не способно нанести земной цивилизации непоправимый урон.

В настоящее время балл (класс) солнечных вспышек оценивается по величине максимального потока мягкого рентгеновского излучения в стандартном диапазоне. Если величина потока равна или превышает 10^{-4} Вт/м² – рентгеновский балл X, на порядок ниже – балл M, и далее по той же схеме баллы C и B. Ситуация осложняется тем, что стандартные детекторы

рентгеновского излучения, установленные на различных спутниках серии GOES имели различные пороги насыщения, что затрудняет прямые сравнения вспышечных событий. До 1976 г. порог интенсивности потока составлял $X \geq 5.4$ ($5.4 \cdot 10^{-4}$ Вт/м²) и соответственно знаменитые, несомненно, экстремальные вспышки 4 и 7 августа 1972 г. формально имели рентгеновский балл $X \geq 5.4$. Затем, вплоть до 1996 г. порог насыщения стал уже $X \geq 12.5$, а после и до настоящего времени – $X \geq 17.5$. Соответственно, для самых мощных вспышек, у которых интенсивность потока превышала указанный порог, рентгеновский балл определялся условно – пропорционально времени запираания прибора. Более объективно было бы характеризовать рентгеновский балл таких вспышек не только пороговым значением насыщения прибора, но и длительностью промежутка времени запираания прибора (τ). Какая-либо экстраполяция, например, линейная, для очень сильных вспышек с длительным насыщением вряд ли может быть оправданной. При такой оценке самыми интенсивными за все время наблюдения были рентгеновские вспышки, кандидаты в суперсобытия, 1 и 6 июня 1991 г. ($\tau = 26^m$), а еще у трех вспышек этой же АО τ было $\geq 17^m$. Это хорошо понимали исследователи, первыми получившие информацию о данных вспышках, и всем этим вспышкам был оставлен балл $X > 12.5$ с указанием времени запираания рентгеновского фотометра [Preliminary Solar Geophysical Data, № 822–824, June 1991]. Потом это обстоятельство было забыто, и эти вспышки в литературе имеют рентгеновский балл X12. Самая экстремально большая солнечная вспышка прошлого 23 солнечного цикла 4 ноября 2003 года (кандидат в суперсобытие) имела рентгеновский балл $X \geq 17.5$ ($\tau = 11^m$). По весьма приблизительным оценкам её расчётный рентгеновский балл может быть X28, а для самой мощной вспышки за всю историю наблюдений солнечных вспышечных событий сентября 1859 г. – X40 (расчёт по ионосферным наблюдениям). При учёте времени насыщения детекторов рентгеновского излучения и их пороги, вспышечные события 1 и 6 июня 1991 г. были наиболее интенсивными за всё время наблюдения в данном диапазоне рентгеновского излучения. Время запираания прибора у них достигало 26 мин., а ещё у трех вспышек этой же активной области оно было ≥ 17 мин.

Для характеристики вспышечной производительности активных областей используется вспышечный индекс XRI (X-ray region index) [4], который рассчитывается по сумме вспышек баллов X и M, где вспышки балла X дают единицы (X9.8 дает 9.8), а вспышки балла M дают десятые доли (M8.3 – 0.83).

Для того чтобы оценить наибольшее возможное на Солнце вспышечное событие на данной стадии развития нашей звезды, рассмотрим максимально большие проявления пятнообразовательной и вспышечной активности за всю историю солнечных наблюдений. В таблице 2 приводятся характеристики наиболее вспышечно-продуктивных активных областей

1972–2012 гг. с того времени, когда стало возможным определять рентгеновский балл вспышек. Приводятся также максимальные возмущения состояния ОКП от вспышечных событий, которые осуществились в данной активной области.

Таблица 2. Наиболее вспышечно-продуктивные АО 1972–2012 гг.

№	ПЦМ	АО	Φ°	L°	Sp max	R, S, G	XRI	M±y
1	09 06 1991	6659	N31	248	2300	R5/S4/G4	>86.5	+2
2	29 10 2003	10486	S17	354	2610	R5/S4/G5	>62.56	+3.5
3	12 03 1989	5395	N34	257	3600	R5/S4/G5	>57.0	-0.5
4	14 09 2005	10808	S09	229	1430	R5/S3/G3	49.21	5.5
5	08 06 1982	3763	S08	086	1270	R4/S2/G2	42.4	+2.5
6	04 07 1974	0433	S14	156	1334	R4/S3/G5	≥41.4	+5.5
7	16 12 1982	4025	S06	089	500	R4/S2/G3	36.7	+3
8	23 03 1991	6555	S23	188	2530	R4/S4/G4	32.6	+1.5
9	15 07 1982	3804	N14	322	2960	R4/S4/G5	31.6	+2.5
10	14 07 1978	1203	N18	170	1600	R5/S2/G2	29.7	-1
11	10 04 2001	9415	S22	359	880	R4/S3/G4	28.73	+1
12	08 08 1989	5629	S17	076	1320	R5/S4/G4	≥26.8	-0.5
13	04 08 1972	0331	N12	010	1330	R5/S4/G5	≥26.0	+3.5
14	11 11 1980	2779	S11	098	2000	R3/S1/G4	25.9	+1
15	28 03 2001	9393	N20	152	2440	R5/S2/G5	>25.74	+1
16	17 05 1990	6063	N34	321	940	R3/S3/G2	23.1	+1
17	12 01 1989	5312	S31	308	1800	R3/S1/G2	22.4	-0.5
18	15 01 2005	10720	N13	179	1630	R4/S3/G4	21.5	+4.7
19	11 12 2006	10930	S06	009	680	R4/S3/G4	21.44	+6.6
20	28 04 1984	4474	S13	334	2160	R5/S3/G3	21.2	+5

ПЦМ – время прохождения центрального меридиана Солнца данной АО; АО – порядковый номер активной области в системе NOAA; Φ° – гелиоширота центра АО; L° – абсолютная (кэррингтоновская) гелиодолгота центра АО; XRI – рентгеновский вспышечный индекс; R, S, G – интенсивность возмущения околоземного космического пространства по пяти бальной шкале NOAA; M±y – временной интервал в годах от точки максимума соответствующего солнечного цикла.

Активная область июня 1991 г. является несомненным лидером по количеству и мощности солнечных вспышек за всю историю наблюдения Солнца. Активные области октября 2003 г. и марта 1989 г. занимают, соответственно, второе и третье место. Поэтому мы рассмотрим особенности энерговыделения и эволюционные характеристики этих групп пятен, добавив к ним и группу пятен августа – сентября 1859 г., в которой осуществились самые мощные вспышечные события за всю историю наблюдений, и рекордсмена по площади группу пятен апреля 1947 г. с целью провести оценку максимально возможного по мощности вспышечного события на современном этапе развития Солнца (Таблица 3).

Таблица 3. Эволюционные и вспышечные характеристики активных областей – генераторов наиболее мощных солнечных вспышечных событий, кандидатов в солнечные суперсобытия.

Carrington 520 (N20W12L085, CMP 31,6.08.1859; $Sp^{max} = 2300$ mvh, γ , R2)	AR6659 (N31L248; CMP 09,5.06.1991) $Sp^{max} = 2240$ m.v.h.; FKC; δ ; XRI = >86.5 ; $X_6^{>12.5} + M_{26} + C_{39}$; $4_1 + 3_3 + 2_6 + 1_{20} + S_{73}$; ПВЭ I (21^h) 1 – 2.06.1991 – $X_1 + M_2$; ПВЭ II (46^h) 4 – 6.06 – $X_2 + M_2$; ПВЭ III (67^h) 9 – 11.06.1991 – $X_2 + M_{11}$ ПВЭ IV (39^h) 13 – 15.06. – $X_1 + M_8$
Greenwich 1488603 (S24.5L084, CMP 07,5.04. 1947 $Sp^{max} = 6132$ mvh, R4)	(continued from above)
AR 5395 (N34L257, CMP 12,7.03.1989); $Sp^{max} = 3600$ mvh, FKC, δ ; XRI >61.5 : $X_{11}^{>17.5} + M_{48} + C_{47} + 3_5 + 2_{21} + I_{37} + S_{132}$; ПВЭ I (42^h) – 6 – 7.03 – $X_2^{>12.5} + M_6^{5.7}$; ПВЭ II (70^h) – 9 – 12.03 – $X_4^{4.5} + M_{18}^{9.7}$; ПВЭ III (44^h) – 12 – 14.03 – $X_2^{1.2} + M_{10}^{6.3}$; ПВЭ IV (48^h) – 16 – 17.03 – $X_3^{6.5} + M_9^{8.4}$	AR 10486 (S17L283, CMP 29,3.10.03); $Sp^{max} = 2610$ mvh, FKC, δ ; XRI >62.56 : $X_7^{>17.5} + M_{16} + C_{16}$; $4_1 + 3_2 + 1_7 + S_{49}$; ПВЭ (59^h) – 22 – 24.10 – $X_2^{5.4} + M_6^{9.9;7.6}$; ПВЭ II (59^h) – 27 – 29.10 – $X_2^{17.4;10} + M_4^{5;6.7}$; ПВЭ III (63^h) – 02 – 05.11 – $X_2^{8.3;>17.5} + M_6^{5.3}$

Краткая формула основных эволюционных и вспышечных характеристик АО [5]: AR – порядковый номер активной области в системе Службы Солнца NOAA, США; гелио-координаты; площадь, эволюционный и магнитный классы группы пятен в момент максимального развития, возраст в оборотах Солнца; вспышечный индекс XRI, количество солнечных вспышек по рентгеновскому баллу X+M, где нижний индекс – количество вспышек данного балла, верхний индекс – рентгеновский балл самой большой вспышки; количество солнечных вспышек по оптическому баллу с теми же нижним и верхним индексами; дата, время, продолжительность и количество вспышек периодов вспышечного энерговыделения (ПВЭ).

4. Впервые понимание того факта, что мощные солнечные события значимо влияют на нашу жизнь, пришло в середине XIX века, когда в августе – сентябре 1859 г. на видимом диске Солнца наблюдали проходжение очень большой группы пятен (Рис. 1). Её площадь была 2300 м.д.п., и она проходила по видимому диску Солнца уже второй оборот. Основные характеристики этой группы солнечных пятен приведены по [6]. Английский астроном-любитель Р. Кэррингтон 1 сентября 1859 г. вел обычные зарисовки солнечных пятен, и в какой-то момент времени его внимание привлекли четыре небольших ярких пятнышка в упомянутой большой группе пятен. Это было первое наблюдение очень мощной солнечной вспышки [7]. Через 17 часов 40 мин. в Америке и Европе были зарегистрированы серьезные нарушения проводной телеграфной связи (подводная и подземная кабельная сеть), которые продолжались несколько часов. Полярные сияния наблюдались в Гаване и на Гавайях. При известном времени максимума вспышки (узлы вспышки в «белом» свете видны в моменты максимального выделения энергии вспышки) можно сказать, что время распространения

возмущения от данной вспышки до Земли было очень малым – 2-м после 4.08.1972 г.

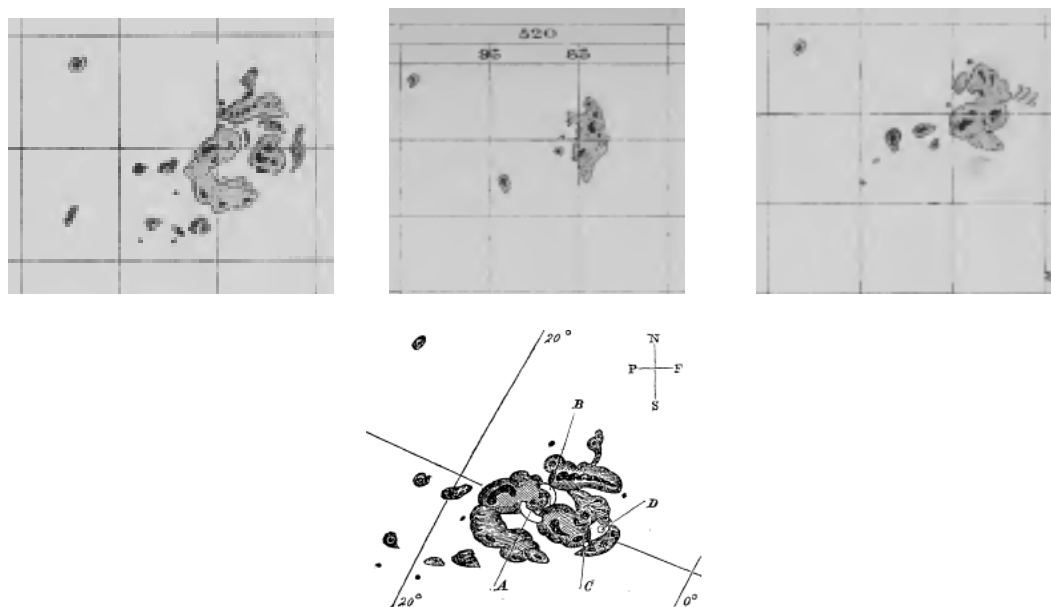


Рис. 1. Группа пятен 1859 г.:

верхний ряд – зарисовки данной группы пятен за 26, 28 и 31.08 из [8];

внизу – вид группы пятен и вспышка в белом свете (узлы А, В, С, D) 1.09 1859 г. [7].

По общему мнению, это была самая мощная за всю историю наблюдений солнечная вспышка, которая к тому же произошла в удобном для максимального влияния на Землю месте солнечного диска ($W12^\circ$). Следует отметить, что 28.08.1859 г. на Земле было отмечено ещё одно сильное полярное сияние, которое тоже наблюдалось в экваториальной части Атлантического океана. Это означает, что 27.08 в той же группе пятен произошло ещё одно вспышечное событие, которое было не меньшей мощности, что и событие 1.09, так как оно осуществилось на более неудобном для влияния на Землю долготном интервале ($\sim E55^\circ$). Это были единственные случаи, когда полярное сияние наблюдалось вблизи экватора, что позволяет косвенно оценить магнитные бури от данных вспышечных событий как наиболее мощные за всю историю геомагнитных наблюдений. Таким образом, данная группа пятен произвела не менее двух суперэкстремальных вспышечных событий.

Одна из наибольших по площади за последние 4 солнечных цикла группа пятен **AR 5395** (N34L257) образовалась на невидимой стороне Солнца в пространстве между двумя корональными дырами (в предыдущем обороте) и вышла на восточный лимб 6.03.1989 г. в период мощного периода осуществления вспышек, продолжая развиваться. В течение этого и последующего периодов реализации больших солнечных вспышек (ПВЭ I и ПВЭ II) осуществились мощные вспышечные события очень большой длительности: вспышка 6.03 рентгеновского балла $X > 12/3B$ (X15, CME),

которая длилась более 6 час., а вспышка 10.03 (X4.5/3B) длилась 7.5 час., причём уровень X4 держался не менее 45 мин. Эта активная область даёт хороший пример возможности проследить последовательные всплытия 4 новых больших биполярных структур (групп пятен) с большой скоростью непосредственно в пространстве активной области (Рис. 2), каждая из которых приводила к своему периоду вспышечного энерговыделения (Таб. 3), что обеспечило реализацию вспышек больших и средних баллов всё время прохождения этой активной области по видимому диску Солнца [5].

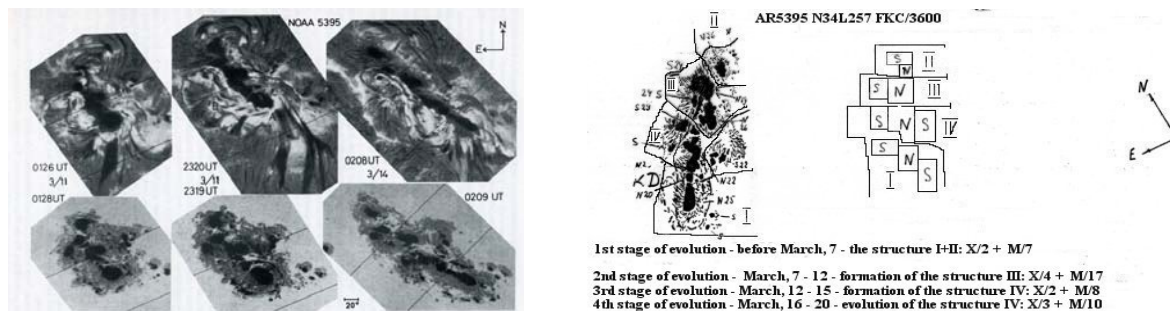


Рис. 2. Вид, эволюция и вспышечная активность группы пятен марта 1989, AR 5395. (снимки группы пятен Г. Якунина, ГАИШ). Схема представляет эволюционную последовательность развития данной активной области.

При выходе на видимый диск Солнца группа пятен, уже находившаяся в состоянии первого самого мощного периода вспышечного энерговыделения, была сформирована из структур I и II. Уже с 10.03 в срединной части группы пятен начала формироваться структура III, которая с 12.03 заставила группу пятен быстро растянуться по оси группы от 14° 10 марта до 20° 13 марта. С 14 марта начала образовываться структура IV, развитие которой растянуло группу пятен к 17.03 до 23° . Т. к. скорость всплытия этих магнитных структур была больше «эволюционной», каждой из них соответствовал свой период реализации больших вспышек с длительностью порядка 40 часов. Лишь второй ПВЭ, возможно, объединил два периода, но разделить их не представляется возможным. Распределение экстремальных вспышек хорошо привязывается с появлением новых больших биполярных структур (в обычных условиях отдельных групп пятен) в границах активной области. Все четыре периода реализации больших солнечных вспышек начинались через 24–48 час. после всплытия новых магнитных структур. Данная группа пятен показала принципиальную возможность всплытия больших магнитных структур в развитой активной области со скоростями обеспечивающих реализацию больших вспышек.

1.06.1991 г. на видимый диск Солнца вышла самая мощная вспышечно-активная область за всю историю наблюдения солнечных вспышек **AR6659** (N31L248), в которой за две недели осуществились 11 больших вспышек, среди которых было 6 солнечных экстремальных вспышечных событий (Табл.1). В экстремальных вспышках 1 и 6.06 ($X \geq 12.5$, $\Phi = 4.44$

$\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$ и $X \geq 12.5$, $\Phi = 2.55 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $^{\circ}\text{n}$ соответственно) время насыщения рентгеновских детекторов достигло 26 мин., причём в последний был зарегистрирован поток солнечных нейтронов. Один из самых мощных γ -всплесков и потока солнечных нейтронов ($^{\circ}\text{n}$) был зарегистрирован в экстремальном вспышечном событии 4.06 с рентгеновским баллом $X \geq 12.5$ ($\Phi = 3.53 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$), а время насыщения детекторов – 19 мин. После экстремальных событий 11.06 ($X \geq 12.5$, $\Phi = 1.81 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $\tau = 17$ мин) и 15.06 ($X \geq 12.5$ ($\Phi = 2.85 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $\tau = 22$ мин) на наземных мониторах наблюдались вспышки в космических лучах (Рис. 3).



Рис. 3. Группа пятен июня 1991 (AR6559), перед заходом за западный лимб Солнца 15.06.1991 (www.spaceweather.com)

Наибольшей концентрации в 23 солнечном цикле вспышечная активность достигла в период 19.10–05.11, когда видимый диск Солнца проходили сразу три больших и вспышечно-активных групп солнечных пятен, однако солнечные экстремальные вспышечные события (3) осуществились только в **AR10486** (S16L286), которая 21.10 вышла на видимый диск Солнца [9]. Она развилась в большую группу пятен на невидимой стороне Солнца (Рис. 4). 24–25.10 в этой активной области произошло первое наблюдаемое всплытие мощного магнитного потока, увеличившего площадь группы пятен на 800 м.д.п. ($S_p = 2200$ м.д.п.). Всплытие следующего магнитного потока (27–28.10) увеличило площадь группы до рекордного для 23 солнечного цикла значения $S_p = 2610$ м.д.п., что привело к двум экстремальным вспышечным событиям подряд 28.10 ($X_{17.3/4B}$, $\Phi = 1.80 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $V_{\text{CME}} = 2459$ км/сек, $^{\circ}\text{n}$) и 29.10 ($X_{10.0/2B}$, $\Phi = 0.87 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $V_{\text{CME}} = 2029$ км/с). Следствием этих событий в околоземном космическом пространстве стало осуществление экстремального солнечного протонного события ($S_4 - 29500$ p.f.u.) и очень большой магнитной бури ($G_5 - A_p = 253$). Наземные нейтронные мониторы зарегистрировали вспышки в космических лучах (GLE) от обоих этих событий. Следующий период вспышечного энерговыделения начался 02.11 вспышкой балла $X_{8.3/2B}$ (GLE, $^{\circ}\text{n}$) и продолжился

4.11 самой интенсивной по потоку мягкого рентгеновского излучения в 23 солнечном цикле вспышкой балла $X>17.5/3B$ ($X28$, $\Phi = 2.3 \text{ J}\cdot\text{m}^{-2}$, $V_{\text{CME}} = 2657 \text{ км/с}$, $^{\circ}n$). Последние вспышечные события произошли вблизи западного лимба Солнца и существенного влияния на геомагнитную обстановку не произвело, однако солнечные протонные события класса S3 и S2 осуществились (максимумы 2 и 4.10 соответственно). По данным космических обсерваторий HESSI и КОРОНАС-Ф за рассматриваемый период были зарегистрированы 8 всплесков жёсткого рентгеновского излучения в диапазоне 7–200 МэВ. В экстремальной вспышке 28 октября наблюдалось три γ -всплеска, а генерация фонового значимого γ -излучения началась за час до начала вспышки в оптическом и мягком рентгеновском диапазонах.

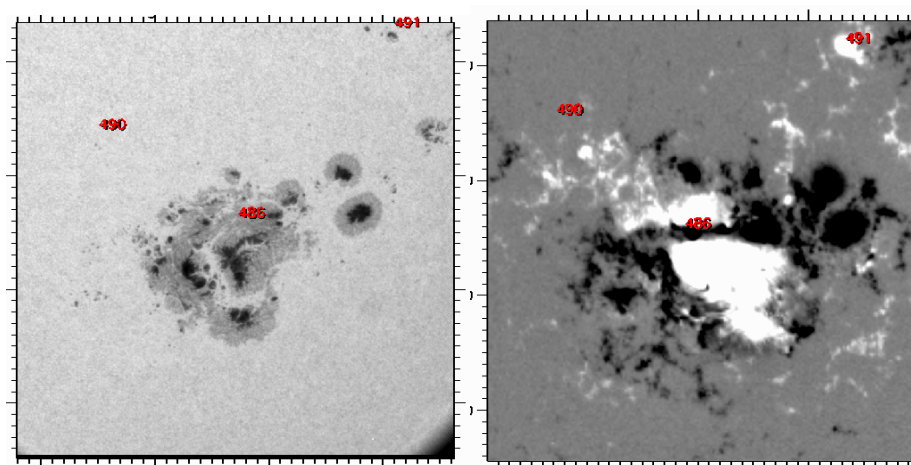


Рис. 4. Активная область октября 2003, AR 10486; снимок за 30 октября 2003 г.:
а) в белом свете (слева), б) магнитное поле (справа), SOHO MDI.

5. На современном этапе развития физики Солнца нужно исходить из того, что наиболее вероятным механизмом пятнообразования является механизм «динамо», который обеспечивает временную цикличность появления магнитных потоков в виде активных областей с пятнами, группами пятен, и новых, «вторичных» магнитных потоков, ответственных за все проявления вспышечной активности. Всё эволюционное многообразие магнитных образований можно рассматривать как следствие всплытия магнитных потоков, от величины и скорости всплытия которых зависят размеры и времена существования магнитных структур. На рис. 5 приведена зависимость магнитных потоков на поверхности Солнца и других солнцеподобных звёзд от светимости в диапазоне мягкого рентгеновского излучения [10]. Само явление активной области можно рассматривать как эволюцию одного или нескольких всплывающих магнитных потоков ($\geq 10^{13}$ Вб) одновременно или последовательно всплывающих в атмосферу Солнца со средним или малым темпом всплытия ($\sim 10^7 - 10^8$ Вб/сек). В это время активная область проходит развитие от появления первых признаков флоккула через стадию образования, развития и распада группы пятен до

полного исчезновения флоккула. При достаточной величине всплывающего магнитного потока и/или длительности его всплытия мы наблюдаем группу пятен с растущей площадью. Наибольшая площадь группы пятен наблюдалась в апреле 1947 г. (18 солнечный цикл), когда на третьем обороте площадь группы пятен Greenwich 1488603 достигла величины 6170 миллионных долей полусферы (м.д.п.). Такая «эволюционная» скорость всплытия приводит к образованию и росту площадей собственно пятен и групп солнечных пятен, не вызывая значимого роста вспышечной продуктивности.

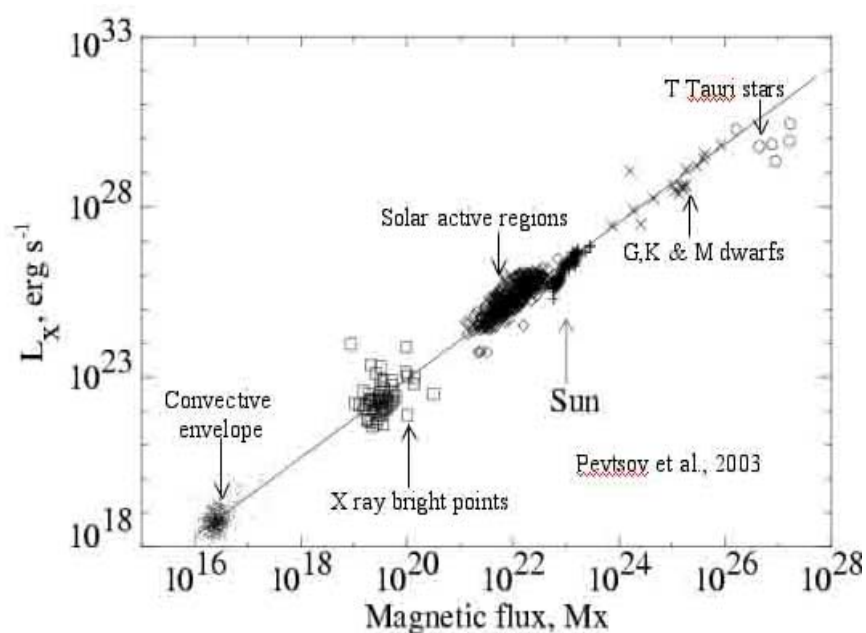


Рис. 5. Зависимость магнитных потоков на поверхности Солнца и звёзд, на которых отмечены очень мощные вспышечные события, от светимости в диапазоне мягкого рентгеновского излучения [10].

Осуществление больших солнечных вспышек представляет собой самостоятельный процесс внутри общей эволюции активной области [11]. Этот физический процесс имеет вполне конкретные начало – всплытие нового магнитного потока внутри активной области; максимум – период осуществления серии вспышек большой и средней мощности; конец – полная реализация энергии всплывшего магнитного потока. Ограниченный по времени, такой процесс может ускорить эволюцию активной области, но, в общем случае, такое влияние можно считать несущественным, так как расходуется только энергия, принесённая именно новым магнитным потоком. Наиболее статистически обоснованным временем подготовки вспышечной серии является интервал времени 1–2 сут. с момента появления первых признаков нового магнитного потока. Для осуществления больших геоэффективных вспышек необходимо, чтобы новый всплывающий магнитный поток был достаточно большим ($> 10^{13}$ Вб) и скорость его всплытия была не менее 10^9 Вб/сек [11]. Поэтому, для оценки максимально

возможного на данной стадии эволюции Солнца по мощности вспышечного события нужно допустить, что максимальный, полученный из наблюдений магнитный поток, всплывал в развитой очень большой компактной группе пятен со скоростью не менее 10^9 Вб/сек.

6. Рассмотренные примеры позволяют сделать энергетические оценки рассмотренных наиболее высокопродуктивных вспышечно-активных групп солнечных пятен, в которых произошли самые мощные за всю историю солнечных наблюдений вспышечные события.

В [3] была произведена оценка всех видов энергий для группы пятен **AR10486**. Потенциальная энергия АО и кинетическая энергия коронального выброса вещества (КВВ): объем $\sim 10^{31}$ см³ ($300 \times 300 \times 300$ arcsec³), потенциальная энергия (PE) $\sim 4.57 \times 10^{33}$ erg, полная магнитная энергия $\sim 2 \times PE \sim 9.2 \times 10^{33}$ erg, свободная энергия $\sim 4.6 \times 10^{33}$ erg. Кинетическая энергия коронального выброса вещества $\sim 1.2 \times 10^{33}$ erg, т.е. $\sim 1/4$ свободной магнитной энергии уносится КВВ.

Все другие формы энергии в сумме на порядок ниже $E_{\text{КВВ}}$ [12]. Напомним, что светимость Солнца $- 3.83 \times 10^{33}$ ergs/s.

Для других рассмотренных групп солнечных пятен июня 1991 г. и августа–сентября 1859 г. расклад энергий при примерно равном объеме активной области будет иметь близкие величины. Для AR 5395, марта 1989 г. ($S_p = 3600$ м.д.п.), значение свободной энергии увеличится до 6×10^{33} эрг. Предельный магнитный поток «эволюционного» типа, образовавший группу пятен апреля 1947 г. составил 1.8×10^{23} Мх, что даёт для свободной энергии $1,1 \times 10^{34}$ эрг. Если предположить, что такой магнитный поток будет «вспышечного» типа со скоростью всплывания 10^{17} Мх/s и реализуется в одной вспышке, её полная энергия может составить 3×10^{34} эрг. Если энергия, выделившаяся в кэррингтоновской вспышке и во вспышке 4.11.2003 по [14] составляла $\sim 2.8 \times 10^{33} - 10^{34}$ эрг, можно сделать вывод, что **суперэкстремальные солнечные вспышки не могут значительно превышать уже осуществившиеся за время научных наблюдений самые мощные вспышки.**

7. Сценарий солнечной цикличности, который вытекает из достоверного (1849–2014) ряда чисел Вольфа устойчив, циклы солнечной активности обладают достаточно жёсткими характеристиками и, на данной статистике, не допускают нарушения сценария развития [15]. Все достоверные солнечные циклы разбиваются на эпохи (\sim по пять солнечных циклов) «пониженной» (12–16 циклы) и «повышенной» (18–22 циклы) солнечной активности, между которыми в течение ~ 1.5 солнечных циклов происходит регулярная смена режимов генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца. Эпохи принципиально отличаются по популяциям групп пятен: сглаженные средние величины площадей групп пятен эпохи «пониженной» солнечной активности почти в два раза меньше, чем для эпохи «повышенной». Внутри эпох, безусловно, работают все наблюдательные правила, в том числе и правило Гневышева-Оля. Первая эпоха

«пониженной» СА уже наблюдалась и пришлась на 12–16 солнечных циклы. Второй такой период начинается с текущего 24 цикла и, с большой вероятностью, продлится также 5 солнечных циклов, когда будут реализовываться солнечные циклы низкой и средней величины. Базовыми циклами переходных периодов явились 11, 17 и 23. Последний солнечный цикл был обеспечен богатым наблюдательными данными, что обеспечило его детальное изучение. «Странности» переходного периода начались уже в фазе максимума 22 солнечного цикла и продолжались вплоть до начала фазы роста текущего 24. Из наиболее значительных признаков перестройки можно отметить единственное для достоверных циклов нарушение правила Гневнышева-Оля и затянутая фаза минимума с очень большим числом беспятенных дней. Самым убедительным явлением переходного периода стало наблюдаемое с 1999 по 2010 год (12 лет) падение напряжённости магнитного поля в тенях пятен [Livingston, Penn, 2012], отражающее перестройку магнитных полей к условиям последующей эпохе «пониженной» солнечной активности. Можно предположить, что в 17 солнечном цикле – базовом переходном цикле от эпохи «пониженной» солнечной активности к эпохе «повышенной» – наблюдался обратный процесс, рост напряжённости магнитных полей в тенях пятен. Возможным следствием этого было появление на фазе роста 18 солнечного цикла очень больших и гигантских групп солнечных пятен, наибольшей из которых стала Greenwich 1488603 ($Sp^{\max} = 6170$ м.д.п.). На статистике достоверных солнечных циклов можно предположить, что переходной период от «повышенной» к «пониженной» солнечной активности захватывает часть предыдущего солнечного цикла (23, 22 и 11, 10), а переходной период от «пониженной» к «повышенной» – часть следующего (17, 18). В таком случае все кандидаты в солнечные вспышечные суперсобытия осуществились в группах пятен в периоды смены режима генерации магнитных полей в пятнообразовательной зоне Солнца (27.08–2.09. 1859 г. – 10 СЦ, 1–15.06.1991 г. – 22 СЦ, 28.10–4.11.2003 г. – 23 СЦ);

Литература

1. NOAA Space Weather Scales www.sec.noaa.gov/NOAAScales
2. *Ishkov V.N.*, The Solar Geoeffective Phenomena: Influence on the Earth's Environment Space and the Possibility of their Forecast // Russian J. of Earth Sci. 2007. V.10. N3. P. 1–12.
3. *Gopalswamy, N., S. Yashiro, S., Y. Liu, G. Michalek, A. Vourlidas, M. Kaiser, and R. Howard*, Coronal mass ejections and other extreme characteristics of the 2003 October–November solar eruptions // J. Geophys. Res. V. 110. A09S15. 2005.
4. *Gaizauskas, V., McIntosh, P.S.* On the Flare Effectiveness of Recurrent Patterns of Solar Magnetic Fields // Solar-Terrestrial Predictions / Ed. by P.A. Simon, Meudon, France. 1984. V. 2. P. 126–130.
5. *Ишков В.Н.*, Всплывающие магнитные потоки и вспышечные магнитные явления на Солнце, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математичес-

- ких наук / Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн. Троицк, 2008, С. 153.
6. *Newton, H.W.*, Solar Flares and magnetic storms // *Monthly Notes RAS*. 1943. V. 103. № 5. P. 244–257.
 7. *Carrington, R.C.*, Description of a singular appearance seen in the Sun on September 1, 1859 // *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.* V. 20. P. 13–14. 1860.
 8. *Carrington, R.C.* Observations of the spots on the sun from November 9, 1853, to March 24, 1861, made at Redhill, London, Edinburgh, 1863.
 9. *В.Н. Ишков*, Эволюция и вспышечная продуктивность активных областей в октябре–ноябре 2003 г. // *Астр. Вестник*. 2006. Т. 40. № 2. С. 117–124.
 10. *Pevtsov, A, Fisher, G., Acton, L., Longcope, D., Johns-Krull, C., Kankelborg, C., and Metcalf, T.*, The relationship between X-ray radiance and magnetic flux // *The Astrophys. J.* V. 598. P. 1387–1391.
 11. *Ишков В.Н.*, Всплывающие магнитные потоки – ключ к прогнозу больших солнечных вспышек // *Изв. РАН, серия физическая*. Т. 62. N 9. С. 1835–1839, 1998.
 12. *Emslie, A., H. Kucharek, B. Dennis, N. Gopalswamy, et al.*, Energy partition in two solar flare/CME events // *J. Geophys. Res.* 109. A10104, 2004.
 13. *Thomas R. Metcalf, T., K. Leka, D. Mickey*, Magnetic free energy in NOAA AR10486 on 2003 October 29 // *The Astroph. J.* V. 623:L53–L56, 2005.
 14. *Emslie, A., B. Dennis, A. Shih, et al.*, Global energetics of 38 large solar eruptive events // *The Astroph. J.*, 759:71 (18 pp.), 2012.
 15. *Ишков В.Н.*, Периоды «пониженной» и «повышенной» солнечной активности: наблюдательные особенности и ключевые факты // Сб. «Солнечная и солнечно-земная физика – 2013», под ред. Ю.А. Наговицына, Изд. ВВМ, СПб, 2013, с. 111–114, http://www.gao.spb.ru/russian/publ-s/conf_2013/conf_2013.pdf

SOLAR FLARE SUPEREVENTS: WHEN THEY OCCUR AND THE ENERGY LIMITS OF THEIR REALIZATION

Ishkov V.N.

IZMIRAN, Troitsk, Moscow

Statistics reliable series of relative sunspot numbers (timeline in 164 – 14 solar cycles – SC) to give a consistent picture of the solar cyclicity. This pattern provides for regular changes of magnetic field generation in the solar convection zone in the transition from the epoch of the "higher" solar activity (SC 7–11 and 18–22) to the epoch of the "lower" solar activity (SC 12–16) and vice versa – from the epoch of the "lower" to "higher" solar activity. Before each such epoch occurs a change of the magnetic field generation regime in the solar convective zone, which occurs during approximate one physical 22-year cycle of solar activity. The reconstruction of the sunspot-forming regime, apparently, could be observed in the SC 10–11 and SC 22–23, when the magnetic field of the solar convection zone having been converted to the "lower" solar activity. In SC 17–18 was a similar restructuring of magnetic fields to the era of the "higher" solar activity. On this statistics the most powerful solar flare super events (1859, VIII-IX – SC 10; 1991, VI – SC 22; 2003, X – XI – SC 23) were observed precisely in these periods of magnetic field reconstruction. They all were occurrence in the anomalously large solar sunspot groups with the areas of ≥ 2300 mvh. Since solar flare events are the consequence of interaction of new magnetic flux with the already existing magnetic field of active region, are examined the cases of the observations, which lead to the solar flare super-events. The attempt to estimate maximally possible amounts of intensity and power of solar flare super-events is made.

ACTIVE PROCESSES ON THE SUN AND THEIR GEOEFFECTIVENESS

Porfir'eva G. and Yakunina G.

Moscow University, Sternberg Astronomical Institute, Moscow, Russia

Abstract. Results of observations during last decades are revised to analyze relations between properties of flares and of Coronal Mass Ejections (CMEs) accompanied by geomagnetic storms. The more massive, quick and wide CMEs are statistically associated with the energetic flares. Solar Proton Events (SPEs) happen often in active regions (ARs) with $\gamma\beta\delta$ magnetic configuration causing extra-ordinary flare activity. The greater area of the AR is the stronger flares and geomagnetic storms are. Influence of variations of direction and velocity of a CME, propagating through the heliosphere, on its geoeffectiveness is discussed. Some aspects of the influence of the flares on the properties of the Earth ionosphere are considered.

Introduction

Heliospheric and geomagnetic disturbances are believed to be mainly caused by solar Coronal Mass Ejections and Solar Energetic Particles (SEPs) events. CMEs origins are due to magnetic reconnection in low corona and accompanied by global reconstruction of magnetic field and can occur in association with solar flares, filament eruptions and streamer ejections. Temporally and spatially related CME and flare, arising from common active region (AR), is considered to be an associated CME/flare. Solar plasma ejections have a great influence on the space weather and can cause strong magnetic storms on the Earth. The strength of the storm depends on many factors, and simple one-to one relation between the flare strength and its geoeffectiveness is not observed but there exist statistical relations between properties of CMEs and associated ARs. Results of observations of CMEs velocity, acceleration, mass, angular width, their propagation through the interplanetary space, influence of magnetic field structure, obtained during last decades, are considered. The variation of the CMEs parameters during their propagation in the corona can significantly influence the CMEs geoeffectiveness.

Relations between properties of CMEs and associated flares

Detailed analysis of data of observations obtained during 1996-2006 was fulfilled by Aarnio et al. [Aarnio et al., 2011]. They used the NASA CME catalog based on white-light observations with the LASCO (Large Angle Spectroscopic Coronagraph) aboard SOHO (Solar and Heliospheric Observatory) and GOES (Geostationary Operational Environmental Satellite) flare database. In this period 13,862 identified CMEs and 22,674 flares were registered among which there were 6,733 CMEs with measured mass, width and velocity and 12,050 flares with known heliographic coordinates. Using the criteria for CME-

flare temporal separation ($10^m - 80^m$) and position angular difference ($\pm 45^\circ$) 826 associated CMEs/flares pares have been chosen.

Statistically CME mass increases with flare flux:

$$\log M_{CME} = (18.5 \pm 0.27) \times 0.70 \log F_{fl},$$

where the mass of an CME M_{CME} is in g and the flare flux F_{fl} is in $Watt m^{-2}$.

Table 1.

Flare class	CME width, °
B	42 ± 4
C	53 ± 0.9
M	63 ± 1.8
X	80 ± 10

CME width increases with CME mass and with the associated flare energy as it can be seen from Table 1, composed by us using the results, presented in Fig. 12 [Aarnio et al., 2011].

The CMEs accompanied by flares have higher velocities (average velocity $V_{av} = 495 \pm 8 \text{ km s}^{-1}$) than the CMEs not associated with flares ($V_{av} = 422 \pm 3 \text{ km s}^{-1}$) [Aarnio et al., 2011]. Relation between CME velocity and flare flux is presented in Fig. 1 composed by us using the data from [Zhang et al., 2001; Moon et al., 2003; Zhang et al., 2004; Kumar et al., 2010; Porfir'eva, Yakunina, Oreshina, 2010]. The results by Arnio et al. [2011] agree well with the results presented in [Andrews, 2003; Kuznetsov, 2008; Yashiro et al., 2008].

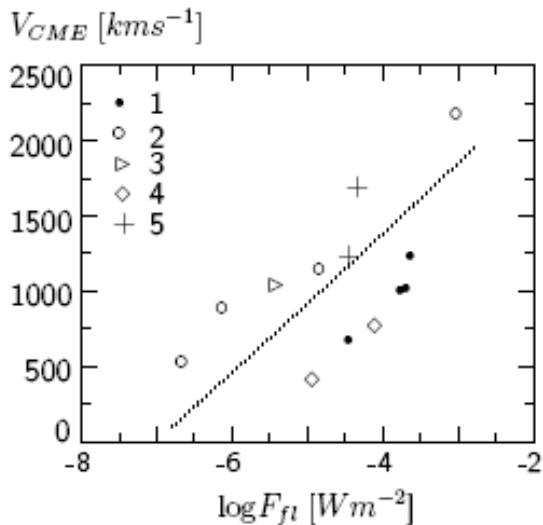


Fig. 1. Relation between observed velocities V in $km s^{-1}$ and fluxes of associated flares F in $W cm^{-2}$:

- 1 – four CMEs on 1997.11.24-25 AR NOAA 9286;
- 2 – four CMEs on 1997.01.16, 1997.01.23, 1998.06.11 and 1997.11.06 in the order of increasing velocities V ;
- 3 – CME on 2000.10.25;
- 4 – two CMEs on 2003.11.20 AR NOAA 10501;
- 5 – two CMEs on 2003.10.18. AR NOAA 10484 .

Proton events and super-active regions

Proton flux is believed to play an important role in producing geomagnetic storms. Strong proton events often occur in ARs being large δ -islands, when umbrae of opposite magnetic polarities are immersed in common penumbra [Künzel, 1960; Warwick, 1966] or having $\beta\gamma\delta$ magnetic configuration. Such ARs are super-active ones. In Table 2 data on NOAA, date (day.month.year/time of flare maximum), X-ray flare importance/optic class, heliographic coordinates, proton flux F_p , time of proton flux start and geomagnetic

index A_p , that is the index for evaluating the strength of the magnetic field disturbance on the Earth, are presented (see also [Porfir'eva, Yakunina, Delone, 2003] where flares and proton events are considered). A_p -index is measured from a set of standard geophysical stations. A storm begins if $A_p > 29$. The storms with $50 < A_p < 100$ are considered as strong ones. We can see that there is no simple relation between flare strength, proton flux and A_p index. So for the flare X6 (S12E15) on 1991 October 27 F_p is 40 and A_p is 32 and for the weaker flare M7 (S12E15) on 1992 May 8 F_p is 4600 and A_p is 95 although both they occurred near the eastern solar limb. The influence of flares and energetic proton fluxes on the ionosphere of the Earth will be discussed later.

Table 2.

AR NOAA	Date/ UT-day.month.year/ UT	Flare Class Location	F_p , pfu	Start Day/UT	A_p -index
5395	6.03.1989/ 1405	X15/3B N35E69	3500	08.03/ 1735	250
5395	17.03.1989/ 1744	X6/2B N33W60	2000	17.03/ 1855	80
5629	12.08.1989/ 1427	X2/2B S16W37	9200	12.08/ 1600	73
5698	29.09.1989/ 1133	X9.8 S26W90	4500	29.09/ 1205	153
5747	19.10.1989/ 1258	X13/4B S27E10	40000	19.10/ 1305	110
5800	30.11.1989/ 1229	X2/3B N26W59	7300	30.11/ 1345	165
6555	22.03. 1991/ 2247	X9/3B S26E28	43000	23.03/ 0820	196
6659	04.06.1991/ 0352	X12/3B N30W70	3000	04.06/ 0820	135
6659	15.06.1991/ 0821	X12/3B N33W69	1400	14.06/ 2340	130
6703	07.07.1991/0223	X1.9/2B N26E03	2300	07.07/0455	180
6891	27.10/1991/0548	X6/3B S12E15	40	28.10/1300	32
6891	30.10.1991/0634	X2/3B S08W25	94	30.10/0745	
7154	08.05.1992/1546	M7/4B S26E08	4600	09.05/2045	95
7205	25.06.1992/2014	X3/2B N09W67	390	25.06/2045	164
7321	30.10.1992/1816	X1,7/2B S22W61	2700	30.10/1920	32
7671	20.02.1994/0141	M4/3B N09W02	10000	20.02/0300	95
9077	14.07. 2000/ 1024	X5/3B N22W07	24000	14.07/1045	164
9393	02.04.2001/2151	X20/ N14W827	1110	02.04/2340	192

In [Tian et al, 2002] 29 ARs existing during 22 and 23 solar cycles are considered. Some parameters were used to describe their activity: XRI is the X-ray flare index evaluating the sum of the flares, multiplied on their importance, the largest area $S \mu h$, 10,7 cm peak flux, proton flux F_p and geomagnetic index A_p . We present the results, given in Table 1 and Table 2 by Tian et al. [Tian et al., 2002], as diagrams in Fig. 2 and Fig. 3 (see also Fig. 2–4 in [Porfir'eva, Yakunina, Delone, 2006]). You can see that the larger the area of the AR is, the higher the X-ray flare index is and the higher geomagnetic index A_p is. However by their geoeffectiveness the large and middle ARs differ only slightly. We see that compact ARs can cause the severe storms. The values for large ARs with

$S > 1000 \mu\text{h}$ are presented by red-colored symbols and for the ARs with $S < 1000 \mu\text{h}$ by blue-colored ones.

To describe the magnetic structure of an AR two parameters are used. The tilt angle φ between the axis, connecting the leading and following magnetic polarities in the AR, and solar equator defines the general AR orientation. The free-force parameter α shows magnetic field non-potentiality and delineates how magnetic lines turn around the axis of the flux tube. The active regions tilts can be explained by action of Coriolis force on rising expanding magnetic tubes in the ARs. Accordingly numerous investigations, for typical ARs $|\varphi| < (30^\circ-40^\circ)$, $|\alpha| < 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$ [Bao et al., 2000; Fisher et al., 2000; Linton et al., 1996; Pevtsov et al., 1994; Tian et al., 2002; Tian et al., 2001; Tian et al., 1999] and what's more $\varphi < 0$ for southern ARs, $\varphi > 0$ for northern ARs, and the value depends from the AR heliographic latitude. The ARs usually obey the Hale-Nicholson's and Joy's lows. Observations show that the parameter α is mainly negative in the northern hemisphere and positive in the southern hemisphere independently of the solar cycle.

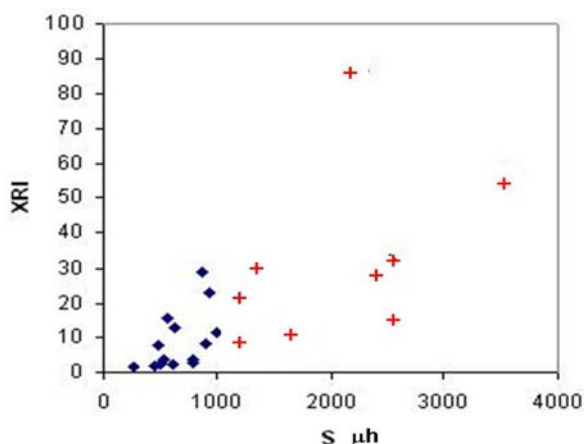


Fig. 2. Relation between the X-ray flare index XRI and spot area S for large (+) and mean (♦) super-active ARs.

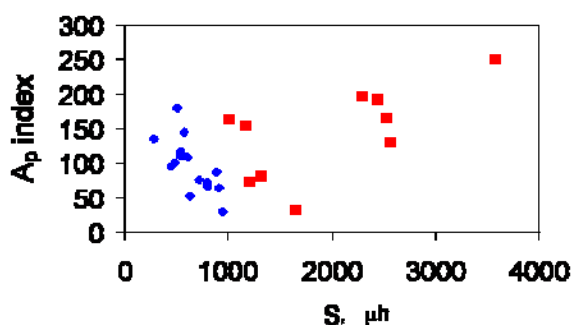


Fig. 3. Relation between geomagnetic index A_p and spot area for large (■) and middle (♦) ARs.

By their properties super-active ARs stand out among other ARs. They have larger areas S , produce stronger flares, more energetic proton fluxes and CMEs. Their tilt angles $|\varphi| > (30^\circ-40^\circ)$ and parameter $|\alpha| > 0.02 \times 10^{-6} \text{ m}^{-1}$, as we can see, for example, from the diagrams shown in Fig. 1 [Porfir'eva, Yakunina, Delone, 2004].

Magnetic helicity and coronal mass ejections

The magnetic helicity, characterized by the parameter α , is known to be inhomogeneous and changeable inside the AR area. The flare activity is related with the magnetic helicity and its changes. Statistically preflare helicity of the ARs (and overlying corona), producing strong flares not accompanied by CMEs, is smaller than the helicity of the ARs, producing CME-associated big flares, as it has been shown by Nindos and Andrews [Nindos and Andrews, Ap. J., 2004] who analyzed 133 events occurred during 1966-1999, from which 78 events were associated with big flares. They found that $\alpha=0.018 \pm 0.010 \text{ Mm}^{-1}$ for the ARs with flares not accompanied by CMEs and $\alpha=0.035 \pm 0.018 \text{ Mm}^{-1}$ for the second type ARs, in which associated CMEs-flares were observed.

Latitudinal and longitudinal deflection of CMEs

Observations aboard LASCO SOHO give information in the nearest heliosphere up to distances of 20–30 R_{sun} . Variations of velocity and direction of propagation of a CME play an important role if the CME will reach the Earth, and if it will, then when. At the solar minimum, when the general magnetic field of the Sun might be considered to be approximately a simple dipole, CMEs deflections in latitudinal and longitudinal directions are easier revealed. Particularly the slow CMEs have difficulties to overcome straining forces of overlying magnetic field, they obey polar magnetic field of the Sun, i.e. CMEs tend to propagate from regions with high magnetic energy density to sites of lower magnetic energy density near heliographic current layer. Analogically, inhomogeneities in longitudinal magnetic field strength might cause a deflection of a CME in azimuthal direction to the east or to the west in dependence of the concrete magnetic field structure, as it is discussed in [Shen et al., 2011]. At early stage a CME may deflect for 20–30° from high latitudes toward the solar equator, as for the case of the slow gradually accelerated CME on 8 October 2007 [Shen et al., 2011; Wang et al., 2009]. Propagating in the FOV of the COR1 STEREO B the CME continuously deflected toward the ecliptic plane from the PA (position angle) $\sim 306^\circ$ to PA $\sim 276^\circ$ and beyond 5.5 R_s in the COR2 FOV (field of view) it propagated almost radially. The difference images of the CME for three time moments are presented in Fig. 4, where **a** is for 11:51 – 11:21 UT, **b** for 13:11 – 12:41 UT, and **c** for 14:31 – 14:01 UT (in color version: yellow line – radial direction, red lines – CME angular width, blue line – direction of shock wave). The CME showed a helical structure, and Wang et al. [2009] supposed that the CME was seen along its axis and the observed images were cross sections of the helical rope. Similar slow deflected CME on 8 November 2008 was studied by Kilpua et al. [2009].

Earlier the CMEs deflection in the meridian plane was investigated for example using the observations on Skylab during 1972 and 1974 in [MacQueen et al., 1986]. The average deflection toward the ecliptic plane of $\sim 2.2^\circ$ was found. In [Cremades, Bothmer, 2004; Cremades et al., 2006] 124 structured flux-rope

CMEs with known information on the associated source regions (SRs) were analyzed. The observations with the LASCO, EIT, MDI SOHO and base-ground H α images during 1996–2002 were used. The SR is the active region, where the CME originated. The SRs regions were identified by pre- and post-eruptive events, such as prominences, expanding loops and dimming. The position angle PA of an AR (or a flare) was calculated from its heliographic coordinates. Spatial and temporal coincidence between the CME and its SR was necessary. Comparing the positions angles (PAs) of the CMEs and SRs the authors found that during 1996–1998 (near minimum) the central PAs of the structured CMEs deflected for about 20° to lower latitudes toward the solar equator. At times of the high activity (1999–2002) the deviations, ranging from several degrees to 20°–40°, fluctuated towards the solar poles or equator without a systematical trend (see Fig. 3 in [Cremades et al, 2006]).

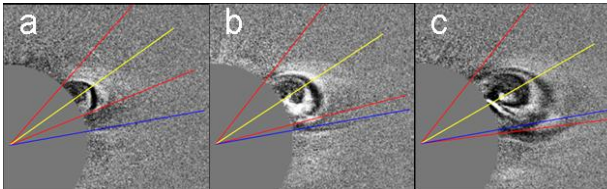


Fig. 4. (Color version online). Deflected slow CME on 2007 October 8 by COR1 STEREO B (based on Fig. 1 from [Shen et al., 2011]).

Yashiro et al. [2008] investigated spatial relation between associated flares and CMEs comparing their PAs. For 1996-2005 LASCO SOHO observations they found 496 flare-CME pairs considering limb events. They concluded that differences between flare PAs and CME central PAs were of ~17°.

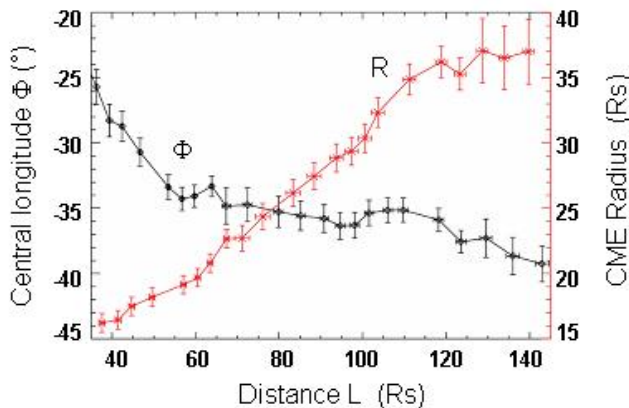


Fig. 5. Evolution of central longitude Φ (black curve) and radius R (red curve) of the CME on 2008 April 26 with the distance according to Fig. 3 from [Lugaz et al., 2010], color version on line.

The simultaneous observations in white-light from different view-points in space, made with the wide-angle imagers HI-1 and HI-2 aboard STEREO A and B, give a possibility to follow a CME remotely from the Sun almost to the Earth and to derive the CME shape and the direction of its propagation through the heliosphere. Deflection in longitudinal direction was analyzed by Lugaz et al. [2010], by Liu et al. [2010]. The observations have shown that CMEs (or their pieces) might deflect monotonically or with some temporal fluctuations toward the east (in some cases) or toward the west (in other cases) for about 5°–30° up

to the heliocentric distances of 100–150 R_s . In Fig. 5 the evolution of central longitude Φ (the angle between direction Sun – Earth and direction of propagation of the CME) and radius R of the expanding CME on 2008 April 26 with distance is demonstrated.

The CME propagated to the east from the direction Sun-Earth and its deflection increases for more than 25° when the CME was moving away from the distance of 20 R_s ($\Phi = -11^\circ$) to the distance of 130 R_s ($\Phi = -37^\circ$). The result agrees well with $\Phi = -11^\circ$ by Thernisien et al. [2009] and $\Phi = -28^\circ$ by Wood et al. [2009]. The velocity of the CME was determined to be equal to 534 km s^{-1} and the arrival time to STEREO B was predicted in [Lugaz et al., 2010] with the error of $\sim 11^h$.

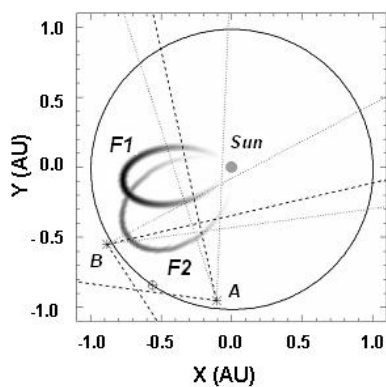


Fig. 6. The location of the fronts F1 and F2 of the CME on 2008 May 17-18, by Fig.1 from [Wood, Howard et al., 2009]. FOVs of the HI1 and HI2 are shown.

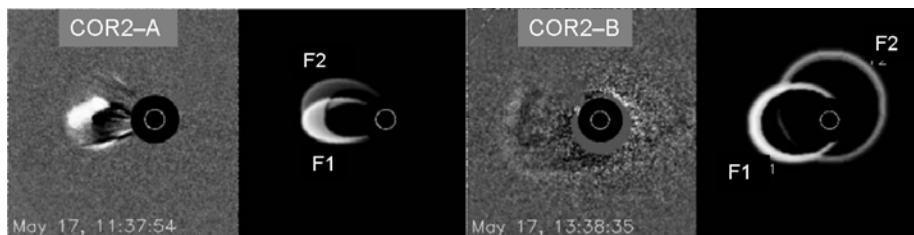


Fig. 7. The STEREO COR2–A and COR2–B images and synthetic images of the CME on 17 May 2008 according to 3D reconstruction, (by Fig.3 from [Wood, Howard et al., 2009]).

Wood et al. [2009] modeled the appearance of the CME on 2008 May 17 by a combination of two expanding fronts F1 and F2. The CME was very fast for the solar minimum and its velocity reached $\sim 1120 \text{ km c}^{-1}$. A slice through the ecliptic plane of 3D model of the CME is shown in Fig. 6. The locations of the Sun and STEREO A and B on the heliocentric coordinates XY are seen. The front F1 was oriented $\sim 2^\circ$ south the ecliptic and $\sim 52^\circ$ to the east from the direction Sun – Earth. The front F2 was $\sim 8^\circ$ north and $\sim 26^\circ$ to the east from the direction Sun – Earth. Their ecliptic coordinates longitude l and latitude b were for F1 $l = 188^\circ$, $b = -2^\circ$, and for F2 $l = 213^\circ$, $b = 8^\circ$. The results agree well with the trajectory, defined by Thernisien et al. [2009] who used a flux rope fitting [Thernisien et al., 2006]. The F2 moved almost radially, toward the STEREO B, corresponding the position angle of the B1.7 flare in the center of the solar disc, and the F1 deflected for $\sim 26^\circ$ as compared with the direction of the F2 and

moved away from both STEREO A and STEREO B. The STEREO A and B and corresponding simulated images at 11:37:54 UT and 13:38:35 UT are shown in Fig. 7.

Solar Proton Events and changes in the Earth ionosphere

In this section we will discuss some aspects of the influence of solar flares, accompanied by proton fluxes, on the structure of the D region in the Earth ionosphere. The conditions in the D region, locating in undisturbed state at the heights from 50 km to 90 km, are important for the propagation of the radio waves on the Earth. Between the lower D region and the oceans (and ground) the Earth-ionosphere waveguide is formed in which the mean frequencies (3 – 30 kHz) propagate usually without interference, going round the Earth globe and causing Schuman resonance (SR) phenomenon. Undergoing multiple reflections between the Earth surface and lower boundary of the ionosphere D region, SR waves give rise to a set of resonance lines. Properties of the D region influence on intensity, amplitude and phase of the radio waves. Energetic particles can produce additional ionization in the lower D region and perturb its upper boundary. Changes in the D region are characterized by two parameters: the reflection height H' and the sharpness factor β , that is a measure of the rate of change of the electron density with height in km^{-1} .

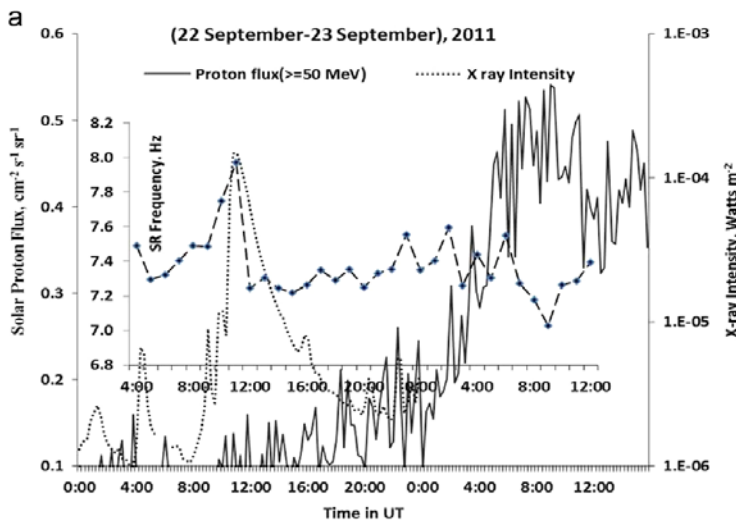


Fig. 8. Relations between the X-ray intensity of the X1 flare on 2011 September 22, proton flux and changes in SR frequency (by Fig. 3a from [Singh, B et al., 2014]).

In [Singh, B. et al., 2014] influence of the flares with the SEP on the structure of the D region is analyzed. On the low latitude station near Agra ($\varphi = 14^{\circ}55'$ India) the 19.8 kHz emission, transmitted by the NWC-transmitter from Australia, was registered during the flare X1.4/2N on 2011 September 22 (NOAA 11302, N11E74, flare peak at 10:29 – 11:01 UT, start of the SPE on September 23 at 02:00 UT, maximum at 22:25 UT, duration $\sim 36^{\text{h}}$) and the flare X1.1 on 2012 July 6 (NOAA 11515, S18W50, flare peak at 23:01 – 23:08 UT, start of the SPE on July 7 at 00:00 UT, maximum at 07:45 UT, duration 10^{h}). Event on 2011 September 22 is presented in Fig. 8.

We can see that the proton SR frequency increases for 8,4% during the flare and later decreases for 4,35 %, when the proton flux is peaked. Analogical changes occurred during the flare and following proton flux on 2012 July 6–7. The results can be interpreted by the model accounting for a growth of ionization in the upper part of D region due to the X-ray flare burst and high ionization in the lower D region (at 50–60 km) in the polar region during the SPE. In [Singh A. K., et al, 2014] 32 flares happened during 2011–2012 are analyzed using registration of the 19.8 k Hz emission, transmitted from Australia. Analyzing the changes of the amplitude of the signal, values of H' and β , corresponding to flares of different importance were defined. If, for the quiet ionosphere above the equator of the Earth, $H' \sim 71$ km and $\beta \sim 0.43$ km⁻¹, during flares 65 km $< H' < 70.6$ km and $0.433 < \beta < 0.470$ km s⁻¹ in dependence of the flare importance. The electron density N_e in the D region can increase in several times. So during the flare M5 on 2012 August 18 N_e increases in the ionosphere above the Earth equator for 320 %.

Summary

Results of the observations of flares and active processes, accompanied by geomagnetic disturbances and happened during the last dozens of the years, are considered. Some statistical relations between the properties of the flares, CMEs and magnetic disturbances characteristics are discussed. The flare is stronger, the mass of the associated CME is bigger: $\log M_{\text{CME}} \sim 0.7 \times \log F_{\text{fl}}$. The widths of the CMEs, associated with the flares, are statistically proportional to the energetic flare flux and equal to $80^\circ \pm 10^\circ$, $63^\circ \pm 1.8^\circ$ и $42^\circ \pm 1.4^\circ$ corresponding to the X, M and B classes. The CMEs, associated with the flares, rich greater velocities than not associated ones. Their averaged velocities are 495 ± 8 km s⁻¹ and 422 ± 3 km s⁻¹ respectively.

Energetic proton events occur often in the ARs with δ or $\beta\gamma\delta$ -magnetic configuration. For such ARs the area is larger the X-ray flare index is higher and geomagnetic index A_p is greater.

The problem of the propagation of CME through the heliosphere is discussed. Changes in the velocity and direction are important and define if the CME approach the Earth and when. The influence of flares and SPEs on the properties of the D region of the ionosphere is considered. During the flares the reflecting region height (above the surface of the Earth) decreases and N_e inside it increases, associated with the flares

References

- Aarnio, A.N., Stassun, K.G., Hughes, W.J., and McGregor, S.L.* Solar Phys. **268**, 195, 2011.
Andrews M. D., Solar Phys, **218**, 261, 2003.
Bao S.D., Pevtsov A.A., Wang T.J., Zhang H.Q., Solar Phys. **195**, 75, 2000.
Cremades H., Bothmer V., Tripathi D., Adv. Space Res. **38**, 461, 2006.
Cremades H., Bothmer V., Astron.&Astrophys. **422**, 307, 2004.
Fisher G.H., Fan. Y., Longcope D.W. et al., Solar Phys. **192**, 119, 2000.

- Kilpua E.K. J. et al.*, Ann. Geophys. **27**, 4491, 2009.
- Kumar, P., Manoharan, P.K. and Uddin, W.*, Astrophys. J. **710**, 1195, 2010.
- Künzel S.W.*, Astron. Nachr., **285**, 271, 1960.
- Kuznetsov V.D.*, Plasma heliophysics, IKI RAN, Moscow, **1**, 82 (Russian), 2008.
- Linton M.G., Longcope D.W., Fisher G.H., et al.*, Astrophys. J. **469**, 954, 1996.
- Liu Y., Davis J.A., Luhmann J.G., Vourlidas A., Bale S.D., Lin. R.P.*, Astrophys. J. **710**, L82, 2010.
- Lugaz N., Hernandas-Charpak J.N., Roussev I.I., Davis C.J., Vourlidas A., Davies C.J.*, Astrophys. J., **715**, 493, 2010.
- MacQueen R.M., Hundhausen A.J., Conover C.W.*, J. Geophys. Res. **91**, 31, 1986.
- Moon, Y.-J., Choe, G.S., Wang, H., Pak, Y.D. and Cheng C.Z.*, J. Korean Astron. Soc. **36**, 61, 2003.
- Nindos A., Andres M.D.*, Astrophys. J., 2004, **616**, L175.
- Pevtsov A.A., Canfield R.C., Metcalf T.R.*, Astrophys. J. **425**, L117, 1994.
- Porfir'eva G.A., Yakunina G.V., Borovik V.N., and Grigoryeva I.Y.* Astrophys. Space Sci. Proc. **30**, 229, 2012.
- Porfir'eva, G.A., Yakunina, G.V. and Oreshina A.V.*, Proc. Conf. Solar and Solar-Earth Physics – 2010, St-Petersburg, 331, 2010.
- Porfir'eva G.A., Yakunina G.V. Delone A.B.*, Izv. RAN, ser. Phys., 2006, **70**, № 1, 80, 2006.
- Porfir'eva G.A., Yakunina G.V. Delone A.B.*, Proc. IAU Sympos. № 223, 295, 2004.
- Porfir'eva, G.A., Yakunina, G.V. and Oreshina A.V.*, Proc. Conf. 7 July – 11 July 2003, St-Petersburg, 377, 2003.
- Shen C., Wang y., Gui B., Ye P., Wang S.*, Solar Phys., **269**, 389, 2011.
- Singh B., Tyagi R., Hobara Y., Hayakawa M.*, J. Atmosph Solar-terrestrial Physics, 113, 1, 2014.
- Singh As. K., Singh A. K., Singh R., Singh R. P.*, Astrophys. Spase Sci. **350**, 1, 2014.
- Ternisien A., Vourlidas A., Howard R.*, Solar Phys., **256**, 111, 2009.
- Ternisien A.F.R., Howard R.A., Vourlidas A.*, Astrophys. J., **652**, 763, 2006.
- Tian L., Liu Y., Wang J.*, Solar Phys. **209**, 361, 2002.
- Tian L., Bao S., Zhang H., Wang H.*, Astron. Astrophys. **374**, 294, 2001.
- Tian et al., Zhang H., Tong H., Jing H.*, Solar Phys. **189**, 305, 1999.
- Wang Y., Zhang J., Shen C.*, J. Geophys. Res. **114**(A13), 10104, 2009.
- Warwick C.*, Astrophys. J., **145**, 215, 1966.
- Wood B.E., Howard R.A., Therrnsien A., Plunkett S.P., Socker D.G.*, Solar Phys. **259**, 163, 2009.
- Yashiro S., Michalek G., Akiyama S., Gopalswamy N., Howard R.A.*, Astrophys J. **673**, 1174, 2008.
- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A., Kundu M.R. and White S.M.*, Astrophys. J. **559**, 452, 2001.
- Zhang J., Dere K.P., Howard R.A. and Vourlidas A.*, Astrophys. J. **604**, 420, 2004.

АКТИВНЫЕ ПРОЦЕССЫ НА СОЛНЦЕ И ИХ ГЕОЭФФЕКТИВНОСТЬ

Порфирьева Г., Якунина Г.

Московский государственный университет (МГУ ГАИШ)

Для анализа связи между свойствами геоэффективных вспышек и корональных выбросов массы (СМЕ) пересматриваются результаты наблюдений за последние десятилетия. Более массивные, быстрые и широкие СМЕ статистически связаны с сильными вспышками. Солнечные протонные события часто происходят в ARs с $\gamma\beta\delta$ магнитной конфигурацией, сопутствующей сверхординарной вспышечной активности. Чем больше площадь АО, тем сильнее вспышки и геомагнитные бури. Рассматриваются некоторые аспекты, связанные с влиянием вспышек на свойства ионосферы Земли.

ОСОБЕННОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ БАКТЕРИАЛЬНЫХ ЭКОСИСТЕМ В УСЛОВИЯХ АНТАРКТИДЫ

Якушев А.В.¹, Чурилин Н.¹, Соина В.С.¹,
Воробьёва Е.А.², Мергелов Н.С.³

¹Факультет почвоведения, МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Институт космических исследований РАН, Москва, Россия

³Институт географии РАН, Москва, Россия

Введение

Возможно, на древнем Марсе сформировалась биосфера. Почвы Антарктиды интересны для астробиологического моделирования условий раннего Марса, вследствие экстремальных условий формирования и существования экотопов. Солнечная радиация, холод, иссушение угнетают микроорганизмы. Для понимания функционирования подобных экосистем необходимо выяснить, способны ли бактерии выполнять биосферную функцию редуцентов – разложения биополимеров.

Цель исследования – изучение таксономического состава, физиологического разнообразия и физиологического состояния гидролитических бактерий, их экологической стратегии в примитивной антарктической почве.

Объекты и метод исследования

Объектами исследования были горизонты ранее не исследованной почвы влажной долины берегового оазиса Восточной Антарктиды «Холмы Ларсеманна», стерильно отобраны 55-ой Антарктической экспедицией в 2010 г. и хранились при -18°C . Исследовались: верхний горизонт 0–2 см щебнистой «каменной мостовой (есть водоросли) нижележащий Торфянистый горизонт 2–4 см с включениями мертвой биомассы и подстилающий его минеральный горизонт 4–10 см – песок, с признаками мицелия грибов (рис. 1).

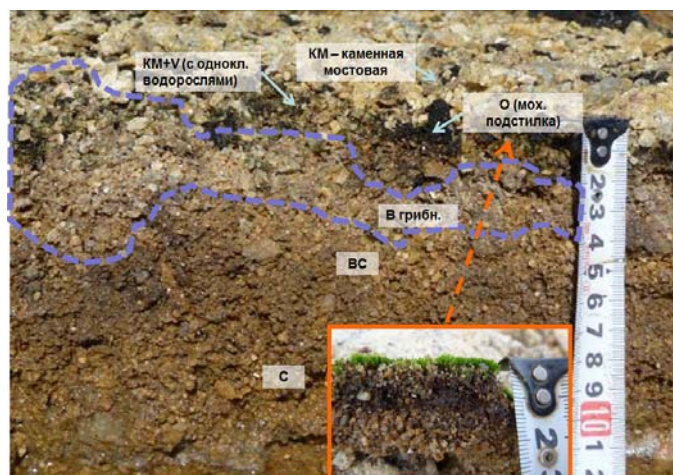


Рис. 1. Профиль исследуемой почвы.

Исследование проводилось комплексным структурно-функциональным методом характеристики микробных популяций [1–3]. Все процедуры проводились с соблюдением стерильности. Каждый раз при проведении анализа был предусмотрен контроль на стерильность. Схема проведения эксперимента представлена на рис. 2.

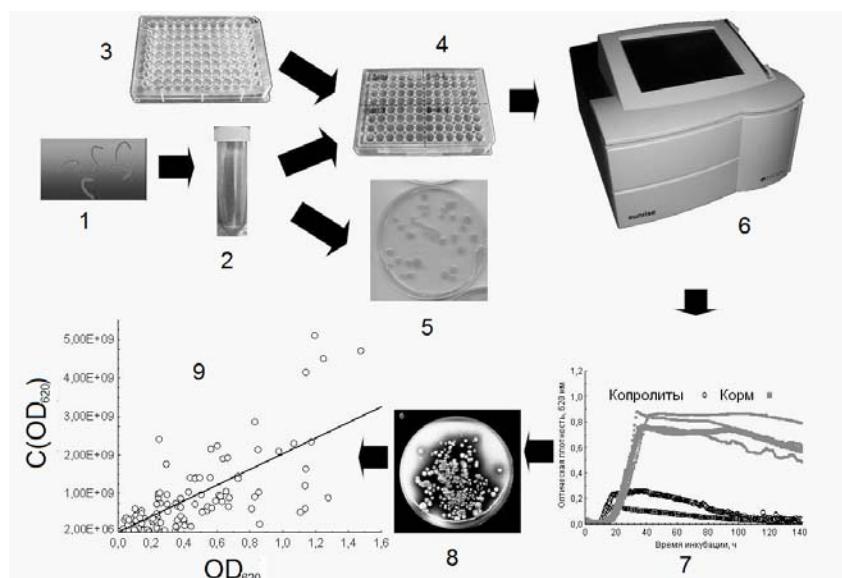


Рис. 2. Схема проведения исследования комплексным структурно-функциональным методом характеристики микробных популяций

Гомогенизация и десорбция микроорганизмов с твердых частиц проводилась в водной суспензии (1 : 1) в течение 20 мин при 2000 об./мин на встряхивателе “вортэкс” модель “Multi Reax” фирмы “Heidolph”. Рост грибов в суспензии подавляли, добавляя антибиотик нистатин 0.05%. Избыток частиц субстрата удаляли центрифугированием при 3200g 5 мин. Концентрацию и состав культивируемых микроорганизмов в исходном субстрате определяли высевом из супернатанта на агаризованную глюкозо-пептонно-дрожжевую среду общепринятым способом. Супернатант добавляли по 100 мкл в ячейки 96-луночной плоскодонной культуральной планшеты с крышкой, в которую уже внесен набор различных жидких питательных сред по 100 мкл. Подбор жидких сред обусловлен задачей исследования – полимеры: крахмал (запасном полисахариде глюкозы растений и зелёных водорослей), карбоксиметилцеллюлоза, хитин (аминополисахарид, входящий в состав клеточных стенок грибов и панцири членистоногих), пектин (метиловый эфир полигалактуроновой кислоты), выполняющий клеящую функцию в клеточных стенках растений), ксилан (самый распространённый полисахарид из группы гемицеллюлоз, входящих в состав наполнителя клеточной стенки растений, полимер ксилозы), декстран-500 (разветвлённый бактериальный полисахарид α-D-глюкопиранозы, входит в состав слизистых капсул микроорганизмов), твин-20 (водорастворимый аналог жиров), казеин (белок молока). Чтобы не принять за рост на органическом

веществе питательной среды рост за счет побочных веществ инокулируемой суспензии исследуемого образца, был предусмотрен контрольный вариант питательной среды без ростового субстрата. Питательные среды стерилизовались автоклавированием. Для предотвращения испарения воды из ячеек, планшет с боков закрывали лентой парафилм (parafilm). Планшет помещался в имунноферментный анализатор “Sunrise” фирмы “Tecan”, который автоматически регистрировал рост микроорганизмов по оптической плотности (длина света пропускания 405 нм) в динамике каждые 30 мин., с периодическим встряхиванием планшеты. Для поддержания температуры прибор помещался в комнату, где поддерживалась постоянная температура. Температура была выбрана стандартная [4] для почвенной микробиологии – 25°C. По окончании роста, который занял 215 ч., из ячеек был сделан высев на агаризованную глюкозо-пептонно-дрожжевую среду, чтобы выяснить таксономический состав возникших в ячейках ассоциаций на различных биополимерах. Идентификация микроорганизмов проводилась по культурально-морфологическим свойствам. По данным посева из ячеек строится калибровочное уравнение, позволяющее пересчитать оптическую плотность в концентрацию клеток микроорганизмов. Рост периодической смешанной культуры (ассоциации микроорганизмов) в ячейках в лаг-фазе и фазе не лимитированного роста описывался комплексной моделью роста периодической культуры микроорганизмов. Уравнение имеет вид

$$x(t) = x_0(1 - \rho_0 + \rho_0 e^{\mu_m t})$$

где $x(t)$ – концентрация микроорганизмов в культуре в момент времени t , x_0 – начальная концентрация микроорганизмов, μ_m – максимальная удельная скорость роста, ч^{-1} , ρ_0 – начальное значение (значение в почве) физиологического состояния растущей культуры.

Описание лаг-фаза (стадию подготовки микроорганизмов к росту) и фаза экспоненциального роста (фазу роста, когда пищи в избытке) комплексной моделью роста периодической культуры позволяет охарактеризовать исследуемые бактериальные ассоциации микроорганизмов кинетическими параметрами роста. В работе также используется параметр метаболической готовности к потреблению того или иного полимера возникающей микробной ассоциации $\gamma = -\ln(\rho_0) = \mu_m t_{\text{лаг}}$. Эта величина прямо пропорционально связана с $t_{\text{лаг}}$ – длительностью лаг-фазы.

Результаты и обсуждение

Феномен исследуемого бактериального сообщества состоит в том, что, в отличие от почв умеренных зон, в жидких ассоциациях доминируют не свободноплавающие планктонные формы, а плёнкообразователи (в частности, *Bacillus cereus* var. *mycoides*), образующие биопленки в минеральной матрице. Это привело к отсутствию корреляции между оптиче-

ской плотностью и концентрацией клеток в суспензии питательных сред (см. рис. 3.).

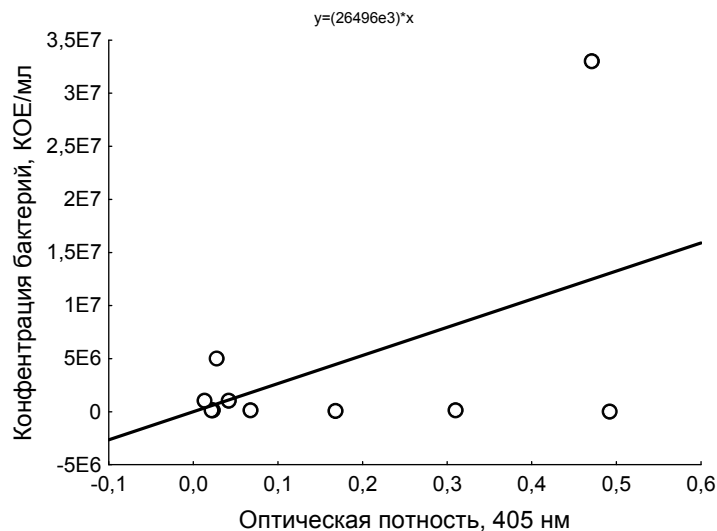


Рис. 3. Корреляционная зависимость концентрации бактерий в суспензии, от оптической плотности при высеве из лунок на глюкозо-пептонно-дрожжевую среду для ассоциаций, возникающих из микробного сообщества антарктической почвы.

Поэтому для перехода от оптической плотности к концентрации клеток в среде был взят коэффициент пересчёта, рассчитанный для почв умеренной зоны нашей страны (рис. 4).

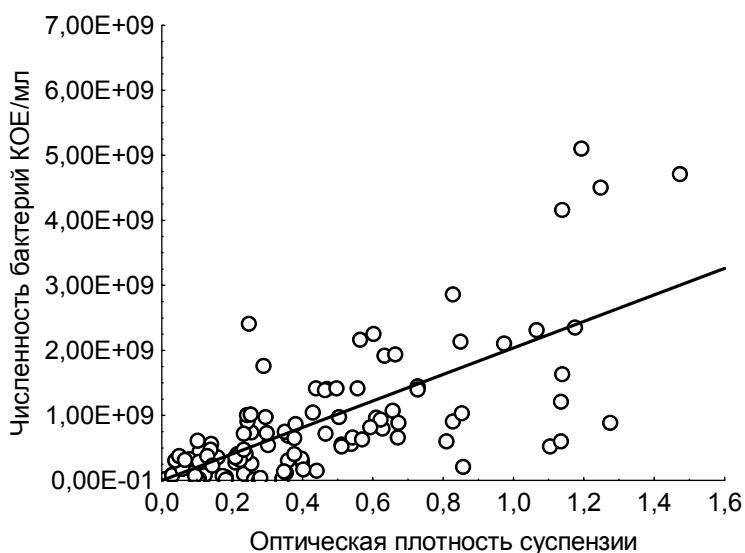


Рис. 4. Корреляционная зависимость концентрации бактерий в суспензии, от оптической плотности при высеве из лунок на глюкозо-пептонно-дрожжевую среду для ассоциаций возникающих из почв умеренной зоны нашей страны. Объем выборки 150.

Посев исходной почвенной суспензии показал закономерное резкое снижение обилия микроорганизмов вниз по профилю (рис. 5).

Физиологическое разнообразие бактерий гидролитиков оценивали по числу питательных сред с полимерами, на которых наблюдался рост после внесения почвенной суспензии. В данной модификации метода порог чувствительности метода >10 клеток способных расти на полимере на грамм почвы.

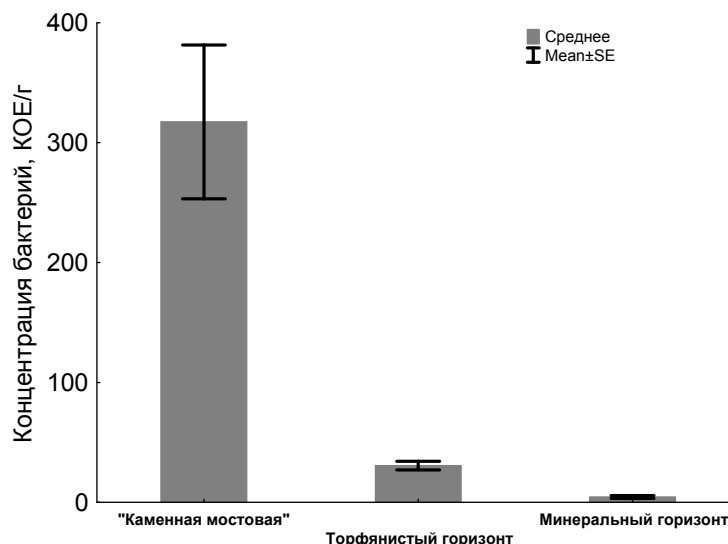


Рис. 5. Изменение обилия культивируемых бактерий (колоний образующих единиц (КОЕ/г)) вниз по профилю.

Физиологическое разнообразие предсказуемо снижается в глубину с 7 потребляемых полимеров в «каменной мостовой» (крахмал, пектин, декстран-500, казеин, карбоксиметилцеллюлоза (КМЦ), хитин, ксилан) до 5 в торфянистом горизонте (крахмал, пектин, декстран-500, казеин, хитин) и 3 (хитин, крахмал, казеин) в минеральном горизонте (рис. 6).

Это связано с уменьшением поступления растительных полимеров с остатками мхов, водорослей, лишайников от «каменной мостовой» к минеральному горизонту, где ассоциации формируют крайне малочисленные колонии бактерий. Хитин потребляется в нижнем горизонте из-за высокого обилия грибного мицелия, содержащего хитин и видимого невооруженным глазом. За гидролиз хитина в жидких средах отвечают бактерии рода *Bacillus*. Парадоксально отсутствие микроорганизмов, способных расти на твине-20 (аналоге жиров), обычно легко утилизируемом субстрате.

Физиологическое состояние бактерий в почве, оцененное по метаболической готовности к росту микробных ассоциаций (γ), свидетельствует о закономерно большей активности микроорганизмов в верхнем горизонте каменной мостовой (рис. 7). Интересно увеличение максимальной удельной скорости роста бактериальных ассоциаций на жидких питательных средах после инокуляции суспензии из нижнего горизонта (рис. 8), что указывает на увеличение доли в сообществе минерального горизонта быстрорастущих дорматных бактерий – по данным посева из казеина и крахмала это, возможно, *Bacillus*.

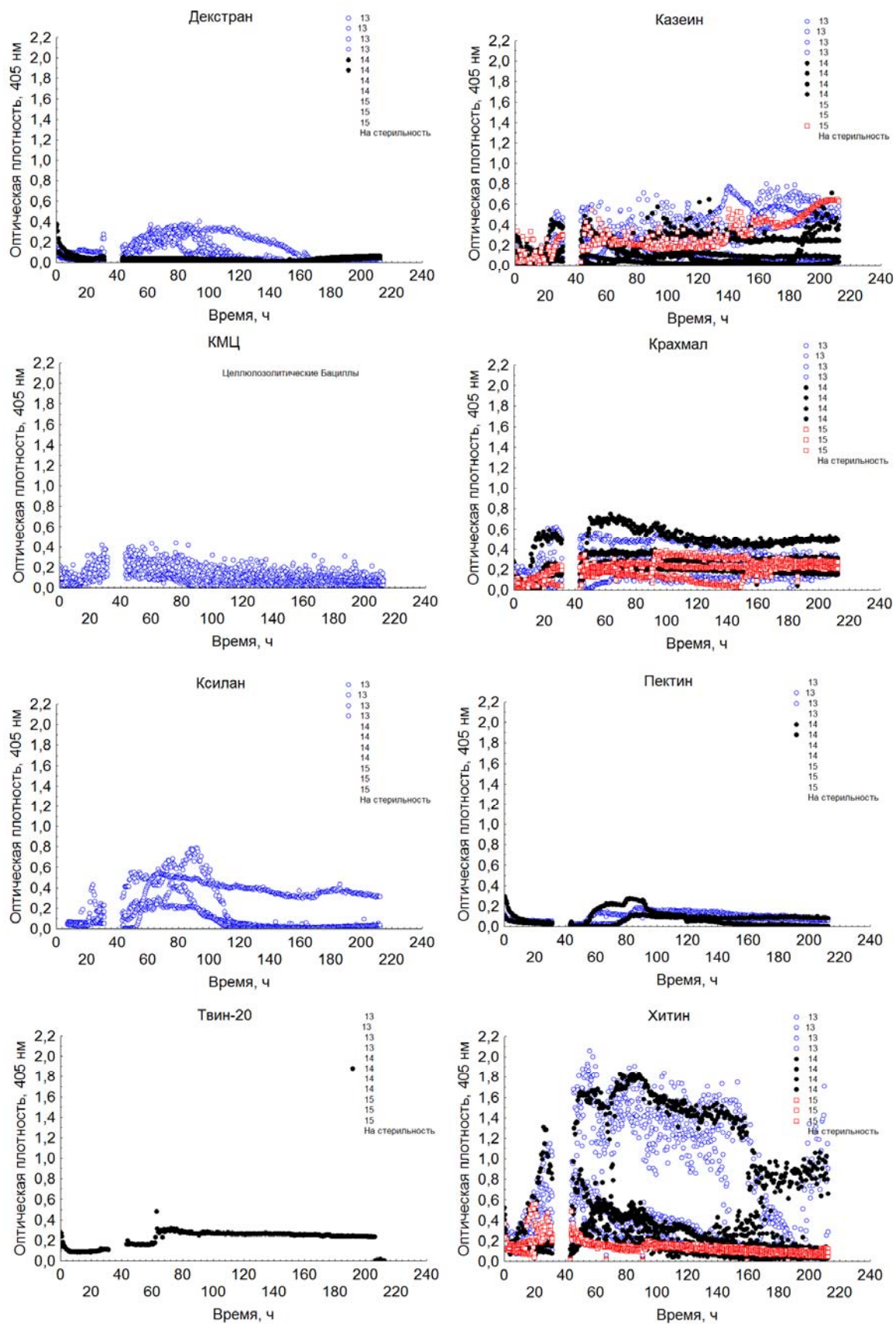


Рис. 6. Периодический рост бактериальных ассоциаций на полимерах.

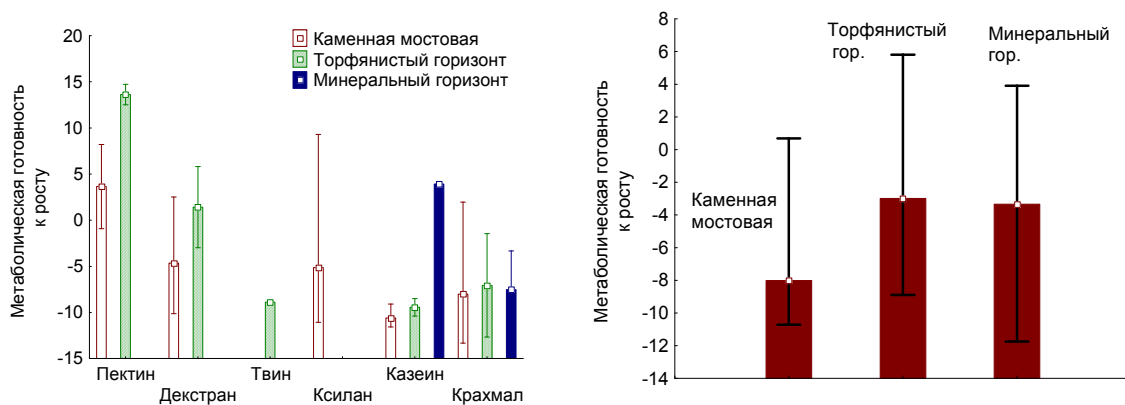


Рис. 7. Метаболической готовности к росту на полимерах микробных ассоциаций.

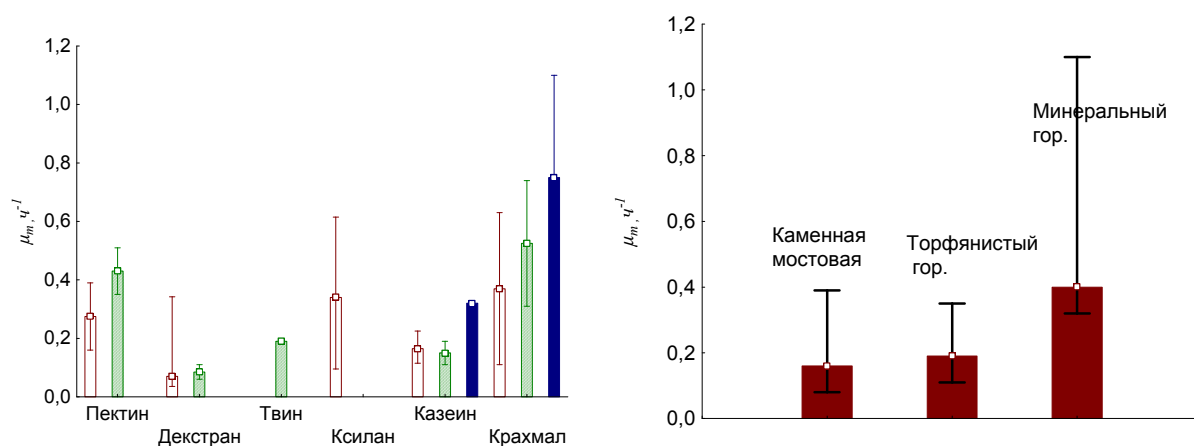


Рис. 8. Максимальная удельная скорость роста μ_m бактериальных ассоциаций на жидких питательных средах с полимерами.

Выводы

1. Не смотря на низкую численность по данным посева, физиологическое разнообразие бактерий гидролитиков в горизонте «каменной мостовой» велико и резко падает к минерального горизонту.
2. Наибольшая метаболическая готовность к утилизации биополимеров в горизонте «каменная мостовая», но наибольшая доля быстрорастущих бактерий (возможно *Bacillus*) в нижнем горизонте.
3. Необычная способность потреблять хитин в нижнем горизонте связана с обилием грибного мицелия, заметного невооруженным взглядом.
4. Неспособность потреблять твин-20 (водорастворимый аналог жиров) бактериальным сообществом арктической почвы не объяснима и нуждается в дальнейшей проверке.
5. Феномен исследуемого бактериального сообщества состоит в том, что, в отличие от почв умеренных зон, в жидких ассоциациях доминируют не свободноплавающие планктонные формы, а плёнкообразователи (например, *Bacillus cereus* var. *mycoides*), образующие биопленки в минеральной матрице.

Литература

1. Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Кухаренко О.С., Якушев А.В., Семенова Т.А., Инишева Л.И. Структура микробных сообществ верховых и низинных торфяников Томской области // Почвоведение. 2012. № 3. С. 317–326.
2. Якушев А.В., Кухаренко О.С. Кинетический метод определения физиологического состояния бактерий *in situ* / Гл. в монографии «Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках — анализ причин медленной деструкции торфа». Москва: Товарищество научных изданий КМК. 2013. С. 49–55.
3. Якушев А.В. Микробиологическая характеристика вермикомпостов. Автореферат дис. ... канд. биол. наук. М., 2009. 24 с.
4. Методы почвенной микробиологии и биохимии / Под ред. Д.Г. Звягинцева. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1991. 303 с.

FEATURES OF THE FUNCTIONING BACTERIAL ECOSYSTEMS IN THE ANTARCTIC

Yakushev A.V.¹, Churilin N.¹, Soina V.S.¹, Vorobyova E.A.², Mergelov N.S.³

¹*Faculty of Soil Science, Moscow State University, Moscow, Russia*

²*Space Research Institute of the Russian akademii Sciences, Moscow, Russia*

³*Institute of Geography of the Russian akademii Sciences, Moscow, Russia*

Despite the low numbers according to seeding, physiological diversity of bacteria in gidrolitikov horizon "stone bridge" high and drops sharply to the mineral horizon. Most metabolic willingness to utilize biopolymers in the horizon "stone bridge", but the largest share of fast-growing bacteria (probably *Bacillus*) in the subsurface. Unusual ability to consume chitin in the subsurface associated with an abundance of fungal mycelium, noticeable to the naked eye. Not able to consume Tween-20 (a water-soluble analogue of fat) bacterial community of Arctic soils are not explained and needs further verification. The phenomenon is investigated microbial communities that, unlike soils in temperate zones, in liquid associations dominated not free-swimming planktonic forms but plёнkoobrazovateli (e.g., *Bacillus cereus var. mycoides*), forming a mineral matrix of the biofilm.

ПЕРЕПОЛЮСОВКИ ГЕОМАГНИТНОГО ПОЛЯ И ЖИЗНЬ НА ЗЕМЛЕ В ФАНЕРОЗОЕ

Печерский Д.М.

Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва

Сопоставляются три вида процессов: 1) процессы, происходящие исключительно в ядре Земли – это инверсии (переполюсовки) геомагнитного поля; 2) процессы, протекающие исключительно на поверхности Земли – это изменения в органическом мире и 3) процессы, синхронно охватывающие **всю** Землю, – это вращение Земли вокруг своей оси. Я обращаю особое внимание на изучение таких связей из-за модных ныне околонуточных поисков кошмаров скорого «конца света», вызванных исчезновением магнитного поля Земли и т.п.

Для выяснения связей между процессами в ядре и на поверхности Земли логично сопоставить сходные по продолжительности магнитохроны и биозоны [7]. Магнитохроны – время между соседними инверсиями геомагнитного поля, биозоны – наименьшие по продолжительности стратиграфические единицы, имеющие близкое к глобальному распространение. Для такого сопоставления воспользуемся построенными для фанерозоя шкалами распределения во времени геомагнитных инверсий и границ биозон: магнитохроностратиграфической шкалой [5, 7] и шкалой биозон [7].

Для уменьшения разночтений привяжем собранные данные к одной и той же шкале геологического времени – 2008 [14]. Ряд обстоятельств затрудняют сопоставление геомагнитных инверсий с изменениями в биосфере. Если запись одной и той же инверсии в различных точках Земли синхронна, то границы одноименных биозон, строго говоря, не синхронны. Так, границы биозон, построенных по разным группам ископаемых организмов или для одних и тех же групп для разных регионов, не всегда синхронны: известны примеры значимого различия возраста биостратиграфической границы, достигающие ~1 млн. лет [17, 20 и др.]. Например, биостратиграфическая граница М/К занимает в осадках Мирового океана по мощности разное положение внутри хрона С29г, следовательно, получается, что биостратиграфическая граница М/К не синхронна в бассейне Мирового океана, и она зависит от палеошироты [20].

Как видно на рис. 1, в течение фанерозоя преобладала обратная геомагнитная полярность: разница между временем обратной и прямой полярности составляет ~80 млн. лет. Выделяются три интервала переменной геомагнитной полярности, это мегахроны палеозойский (468-315 Ма), мезозойский (258-123 Ма) и кайнозойский (83-0 Ма). Мегахроны разделены практически монополярными гипер- и суперхронами (рис.1).

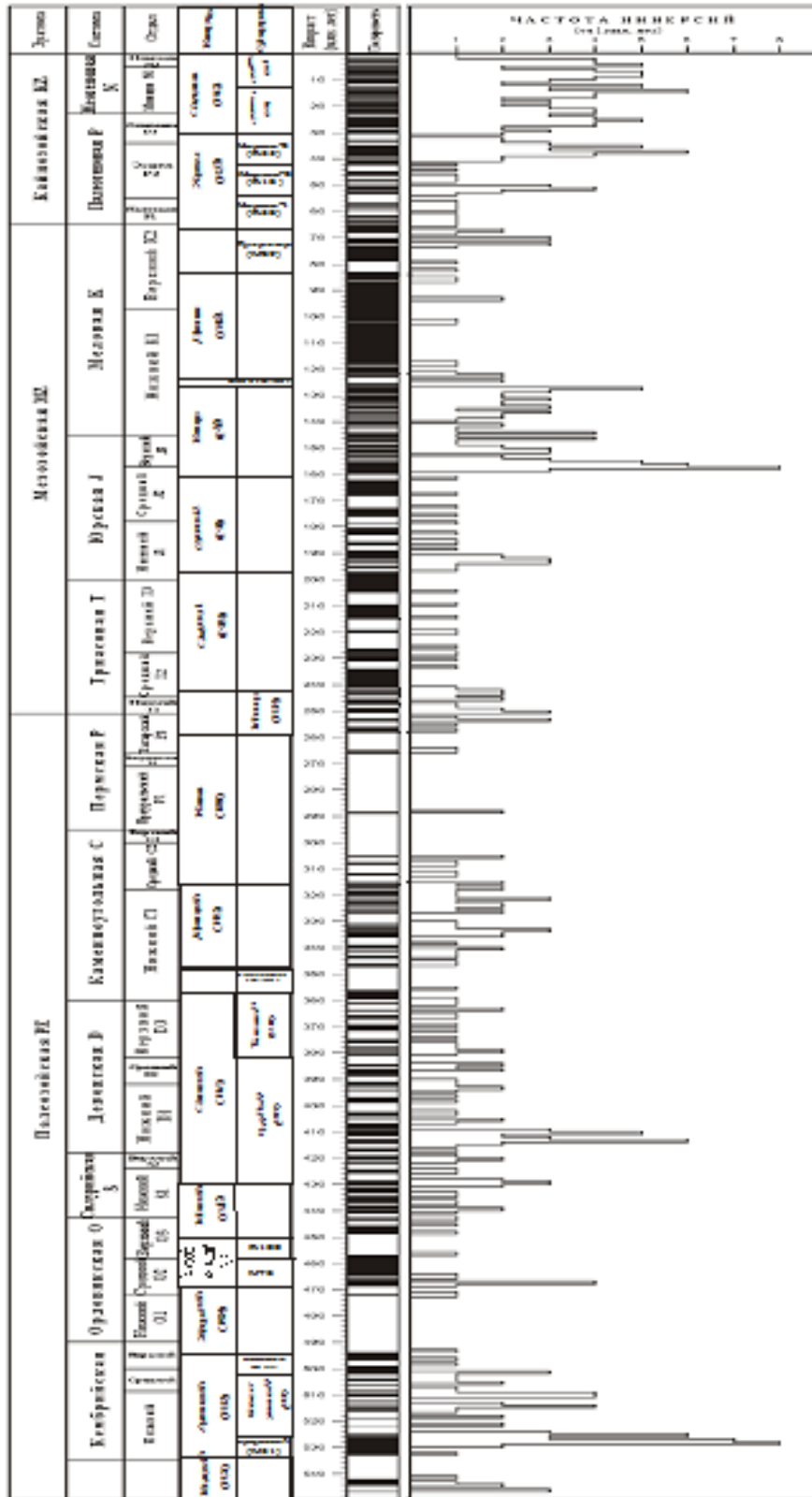


Рис. 1. Шкала геомагнитной полярности и магнитохроностратиграфическая шкала [5]. Левые три колонки – биостратиграфическая шкала, четвертая и пятая колонки – магнитохроностратиграфическая шкала. Шестая колонка – шкала геомагнитной полярности (черные интервалы – прямая (положительная) геомагнитная полярность, белые – обратная (отрицательная) полярность). Седьмая колонка – частота геомагнитных инверсий (число инверсий за 1 млн. лет).

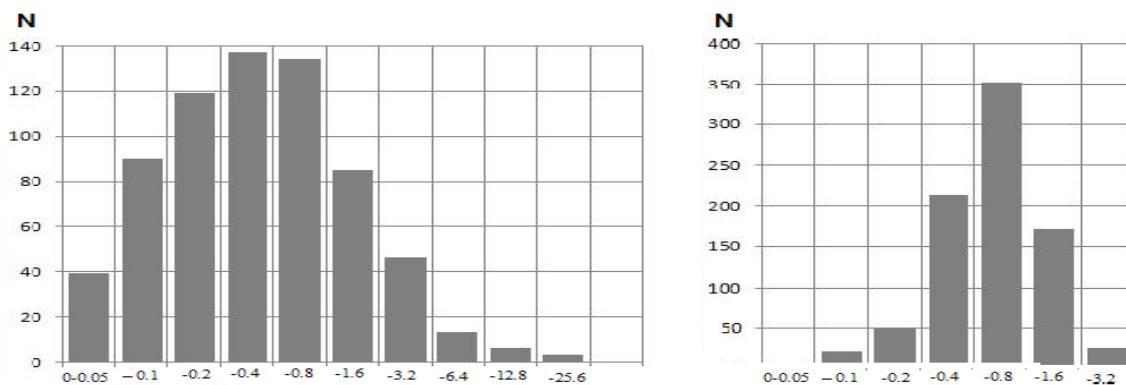


Рис. 2. Гистограммы распределения продолжительности магнитохронов (а) и биозон (б). По оси абсцисс отложены интервалы в млн. лет. N – число границ.

Каждый из анализируемых рядов образует единую одномодальную совокупность, имеющую близкое логнормальному распределение (рис. 2). Последнее в случае биозон говорит о единстве продолжительностей множества биозон различных групп организмов (рис. 2б). В случае магнитохронов (рис. 2а) гистограмма неполная из-за недостаточного разрешения. Больше участие в ней должны иметь микромагнитохроны и экскурсы продолжительностью заметно менее 0.05 млн. лет.

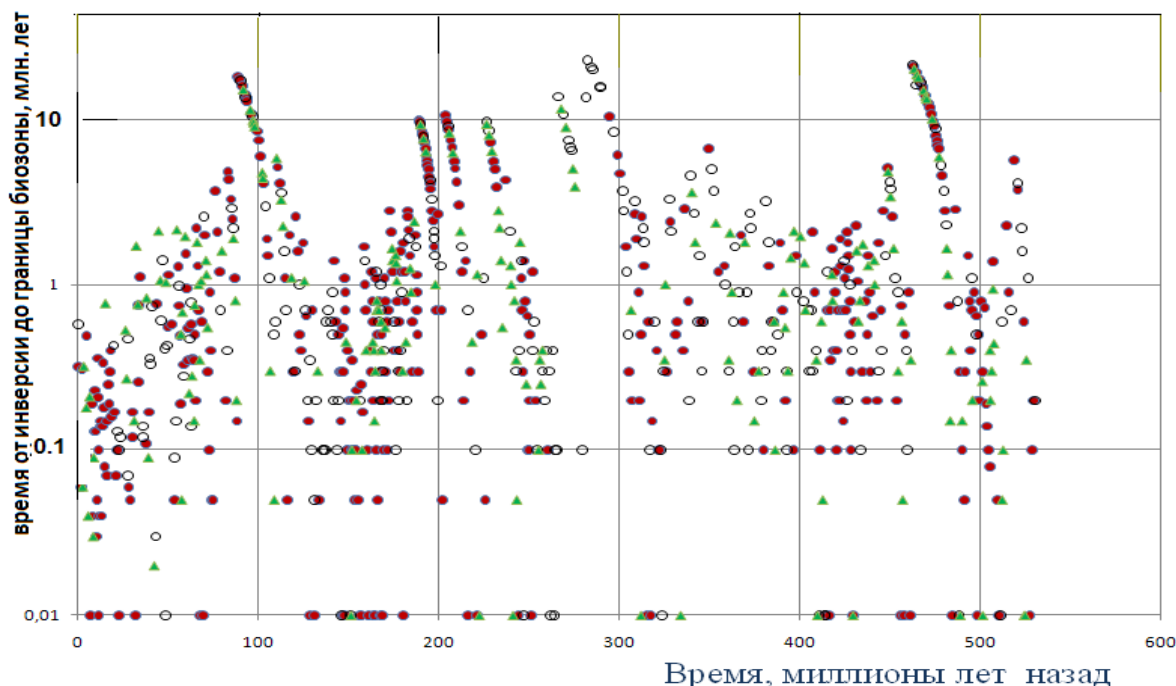


Рис. 3. Сопоставление нижних границ магнитохронов разной полярности с нижними границами биозон. По оси абсцисс отложен возраст нижних границ биозон, по оси ординат – разность между ближайшими границами магнитохронов и биозон, в миллионах лет. Шкала логарифмическая, соответственно, вместо нулей проставлены условно значения 0.01. Залитые кружки – средний возраст границы биозоны определен по 3 и более стратиграфическим колонкам. Треугольники – граница биозоны отмечена в 2 колонках. Полые кружки – граница биозоны отмечена только в 1 колонке.

Если есть прямая зависимость состояния тех или иных популяций и, в общем, биосферы от инверсий геомагнитного поля, то мы должны это увидеть при прямом сопоставлении данных о возрасте геомагнитных инверсий с возрастом границ биозон (рис. 3).

На рисунке 3 виден большой разброс точек. Границы биозон часто располагаются вблизи геомагнитных инверсий. Такая близость границ вполне объяснима, т.к. они приходятся на интервалы частых смен геомагнитной полярности. Мода продолжительности магнитохронов - около 0,4 млн. лет (рис. 2), так что граница биозоны, будет отстоять от границы большинства магнитохронов меньше 0.2 млн. лет. В 156 случаях разница между границами магнитохронов и биозон варьирует от 1 до более 10 млн. лет, в 629 случаях – от более 0,1 до 1 млн. лет, и границы совпадают только в 60 случаях (рис. 3). Следует напомнить, что из-за точности геохронологических датировок к синхронным отнесены биозоны, возраст границ которых отличается не более ± 0.2 млн. лет. Следовательно, действительных совпадений гораздо меньше.

Отсутствие связи между инверсиями и биозонами подчеркивают субвертикальные наборы точек (рис. 3). Это серии границ биозон в пределах длительных интервалов одной полярности. Например, внутри гиперхрона прямой полярности Джалал (85-120 Ма) было 26 смен биозон, внутри гиперхрона обратной полярности Хадар (462-484 Ма) – 37 смен биозон. В таких интервалах резко возрастает разница во времени между границами биозон и магнитохронов, достигая многих миллионов лет.

Наглядный пример отсутствия связи биоты с геомагнитными инверсиями – граница мезозоя и кайнозоя, которая находится внутри магнитохрона C29r продолжительностью 0.85 млн. лет [6, 19, 23], т.е. инверсия произошла за ~ 0.4 млн. лет до границы мезозоя и кайнозоя.

Из 10 максимумов массовых вымираний биоты [24] только в двух случаях они совпали с геомагнитными инверсиями. Коэффициент линейной корреляции между возрастными инверсиями и границ биозон $r = 0.226$. Крупные массовые вымирания и максимумы разнообразия в фанерозое приходятся на различные состояния геомагнитного поля и никак не выражаются в частоте биозон (рис. 4).

Таким образом, совпадения границ биозон, максимумов массовых вымираний биоты с переполюсовками геомагнитного поля скорее случайность.

В то же время картина частоты геомагнитных инверсий и смен биозон очень сходна (рис. 4), особенно в длиннопериодной части (рис. 4в,г). Подчеркнем ритмичность картины: бурные процессы в ядре и на поверхности Земли закономерно почти синхронно чередуются со спокойным состоянием, когда редки геомагнитные инверсии и существенно возрастает продолжительность биозон. Сходство общей картины говорит, в первую оче-

редь, о согласованности длительных процессов, а не кратковременных. Это интервалы 80-120, 200-240, 270-310, 340-380 и 470-490 Ма (рис. 4в,г).

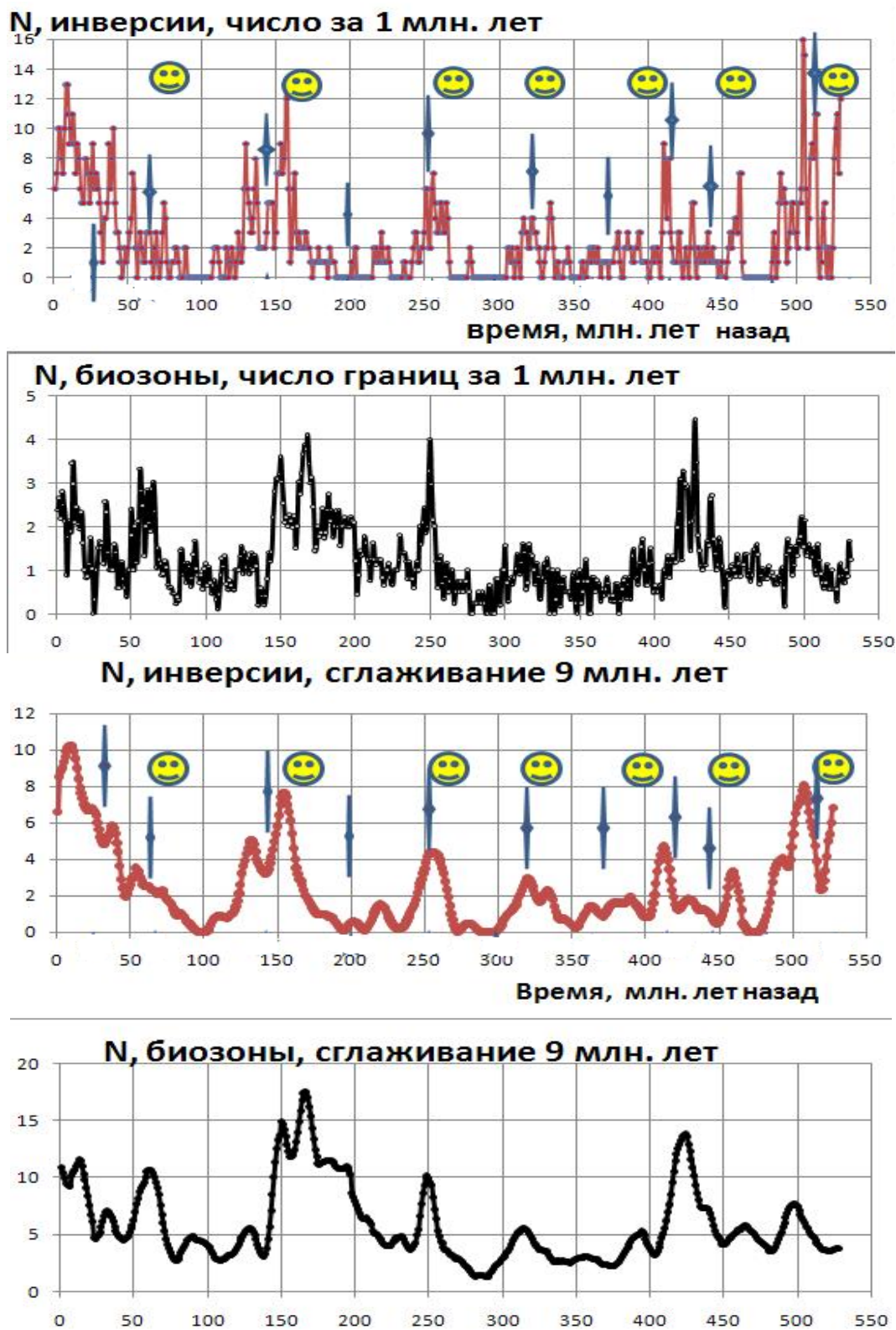


Рис. 4. Сопоставление частоты геомагнитных инверсий и биоты; а – число инверсий за 1 млн. лет, в – число инверсий за 9 млн. лет, б – число границ биозон за 1 млн. лет, г – число границ биозон за 9 млн. лет [7]. Солнышки – максимумы разнообразия биоты; «копья» – максимумы массовых вымираний биоты [22, 24].

Сказанное свидетельствует об общности источника этой согласованности. Последняя находит свое отражение в спектрах мощности (Фурье-анализ) [7], где фиксируется серия совпадающих и очень близких периодов инверсий и смен биозон 16, 20, ~30, ~50, 60–70, 90–100 млн. лет.

На вейвлет-диаграмме (рис. 5) картина, в общем, очень близка для магнитохронов и биозон.

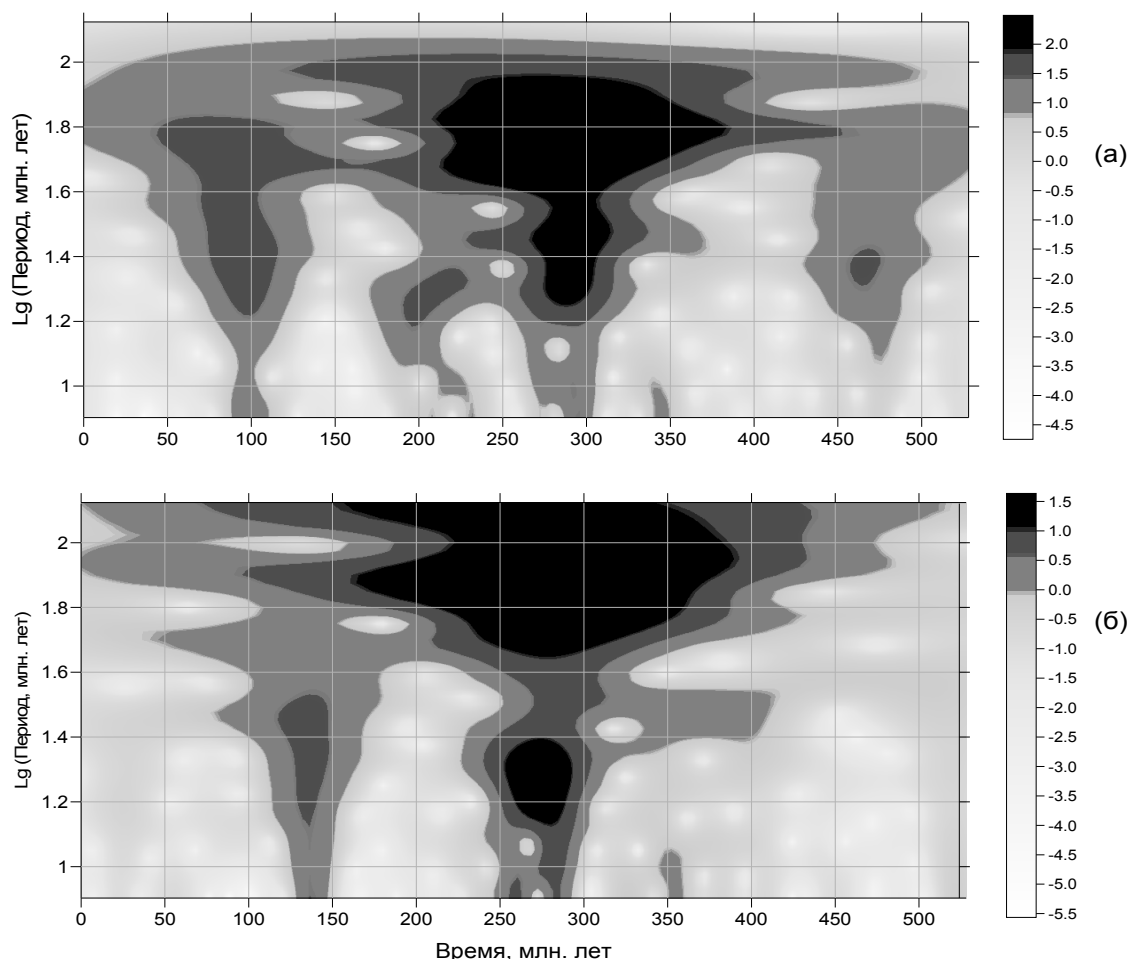


Рис. 5. Вейвлет-диаграмма Морле. **а** – ряд продолжительностей магнитохронов, **б** – ряд продолжительностей биозон [2].

Сделана количественная оценка степени частотно-зависимой синхронности колебаний в обоих временных рядах по симметричному квадрату модуля спектра когерентности между рядами магнитохронов и биозон [7].

Квадрат модуля спектра когерентности (его можно грубо назвать квадратом коэффициента корреляции) равен доле мощности колебаний в той или иной полосе частот, которая обусловлена линейной связью, со сравниваемым рядом. На рис. 6 видно, что ряд периодов 9, 11, 14, 16 и 60 млн. лет выделяются высокой синхронностью, их квадратичная когерентность, соответственно, равна 0,5 ($r = 0,71$), 0,56 ($r = 0,74$), 0,59 ($r = 0,77$), 0,66 ($r = 0,81$) и 0,76 ($r = 0,87$). При этом сдвиг по фазе когерентных коле-

баний варьирует от отсутствия до ± 10 – 15 млн. лет. Это видно на рис. 4, где пики максимумов и минимумов смен геомагнитной полярности и смен биозон в одних случаях совпадают, в других пики частоты инверсий «отстают» от частоты смен биозон, и в третьих случаях пики смен биозон «отстают» от пиков частоты инверсий. Вероятное объяснение этим расхождениям – неточность возрастной увязки данных. Коэффициент корреляции едва достигает 0.39, т.е. вероятность сдвига составляет 0.15.

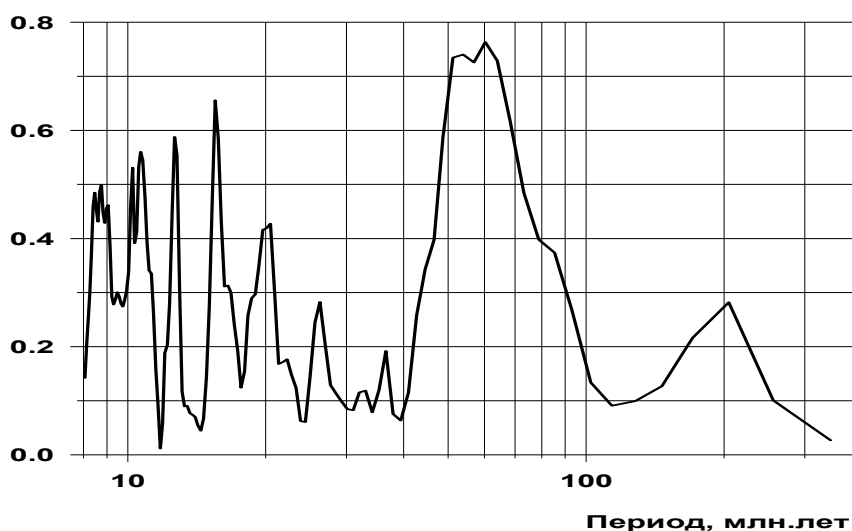


Рис. 6. Оценка квадрата модуля спектра когерентности (ось ординат, M^2) между рядами магнитохронов и биозон.

Общим источником согласованности независимых друг от друга процессов в ядре (геомагнитные инверсии) и на поверхности Земли (биосфера) может быть вращение Земли. Из картины геомагнитной полярности, как отмечено выше (рис. 1), [5, 14 и др.], следует преобладание в фанерозое обратной полярности. Это отражает тот факт, что Земля всегда вращалась, как ныне, против часовой стрелки. На этом фоне, по данным фрактального анализа магнитохроностратиграфической шкалы [8], в фанерозое существовали два режима генерации магнитного поля: а) режим частых инверсий, хаотический (фрактальная размерность $d < 0.6$), б) режим устойчивого состояния поля, редких инверсий вплоть до их отсутствия, обладает самоподобием (d близка к 1). Результаты фрактального анализа, анализа спектра мощности (Фурье-анализ) подтверждаются данными вейвлет-анализа: выделенные в фанерозое периоды продолжительностей геомагнитных инверсий и биозон меньше 50 млн. лет представляют собой относительно краткие события (единичные «всплески»), которые распределены во времени скорее хаотично, появляются относительно длительные колебания лишь с периодами 100–130 млн. лет и более, что соответствует второму фрактальному режиму с d около 1 (рис. 5). Два режима генерации геомагнитного поля можно связать с неравномерным вращением внутреннего твердого ядра относительно мантии. По астрономическим данным за по-

следние 2700 лет замедление вращения Земли в среднем составляло около 0.002 сек/100 лет, а последние примерно 30 лет характеризуются ускорением вращения Земли [10]. В результате, за фанерозой замедление вращения составило около 3 часов [4]. Естественно связать запаздывание или опережение вращения внутреннего ядра относительно мантии в зависимости от ускорения или замедления последней с жидкой «прокладкой» между ними, что показано теоретически [15]. Обратная полярность геомагнитного поля будет сохраняться, если вращение внутреннего, внешнего ядра и мантии совпадают или внутреннее ядро их обгоняет (замедление вращения). В периоды ускорения вращения Земли и, соответственно, отставания вращения внутреннего ядра от вращения мантии возникает относительное обратное движение у границы твердого и жидкого ядра, а значит связанное с ним поле должно иметь противоположный знак, т.е. такой как в настоящее время. Длительные времена устойчивой полярности геомагнитного поля, следовательно, отражают устойчивый режим вращения Земли. Интервалы же частых смен полярности относятся к неустойчивому близкому хаотическому режиму вращения Земли (фрактальная размерность менее 0,6), когда замедление вращения часто сменяется ускорением вращения. Изменение скорости вращения Земли должно выражаться в синхронности процессов на поверхности Земли и в ее ядре, что мы и наблюдаем на нашем примере согласованности частот геомагнитных инверсий и смен границ биозон. Колебания суточного вращения Земли может вести к существенным климатическим изменениям. Так, например, замечено, что начало и завершение геомагнитных экскурсов приходятся на смену климата, периоды вариаций величины и направления геомагнитного поля совпадают с периодами вариаций магнитных характеристик, отражающих климатические изменения [9].

Может ли исчезнуть геомагнитное поле? Говорят по радио, телевидению, пишут в газетах и даже в научных публикациях об ожидаемом нас ужасе в связи со скорой реперолюсовкой геомагнитного поля. Особенно пугают нас тем, что при этом величина магнитного поля может упасть до нуля.

Существование геомагнитного поля обязано двум факторам: **вращению** Земли и наличию **жидкого проводящего ядра**. Поэтому для полного исчезновения геомагнитного поля должно прекратиться вращение Земли и/или полностью затвердеть земное ядро. И то и другое вероятно лишь через миллиарды лет, судя по удлинению суток за весь фанерозой примерно на три часа [4], и судя по относительно небольшим изменениям общего состояния геомагнитного поля за последние 2–2,5 миллиарда лет [12, 21].

Согласно данным многих тысяч палеомагнитных измерений, нет **ни одного примера падения величины геомагнитного поля до нуля**. Уменьшение величины поля во время инверсии примерно на порядок отмечается всеми исследователями. Оно затрагивает дипольную часть геомагнитного

поля, при этом недипольные составляющие поля имеют приблизительно ту же величину, что и до инверсии [3]. Таким образом, исчезновение геомагнитного поля не грозит миру в ближайшие миллиарды лет.

Несколько слов о возможном приближении следующей инверсии. Ее «предсказание» в основном базируется на данных о смещении магнитных полюсов и понижении магнитного момента за последние 400–200 лет. Кстати, за последние 100 тысяч лет магнитное поле Земли неоднократно меняло свой знак, что сопровождалось и существенным понижением величины поля, последняя полная переполюсовка относится к ~20 тысячам лет назад, последний экскурс – к 7–8 тысячам лет назад [9]. В истории геомагнитного поля понижения в два раза и более магнитного момента (вековые вариации) зафиксированы неоднократно. Например, по археомагнитным данным за последние 7 тысяч лет [1, 13] (рис. 7), по данным палеомагнитных измерений Гавайских лав за последние 400 тысяч лет [18], морских осадков за последние 800 тысяч лет (рис. 8) [16] соотношение максимумов и минимумов колебаний величины поля достигает 2,6 раза.

На этом фоне совершенно незначительным выглядит падение величины поля за последние 200 лет по данным обсерваторских наблюдений (рис. 7).

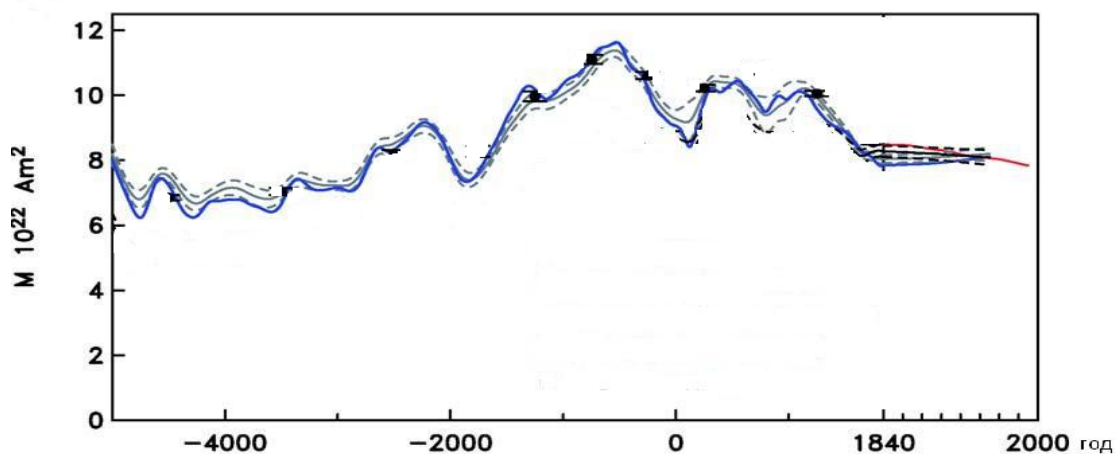


Рис. 7. Поведение магнитного момента по археомагнитным данным [13].
Красная линия – обсерваторские данные.

Я не останавливаюсь на влиянии магнитного поля непосредственно на конкретные живые существа, оно, несомненно, есть, и этим занимаются, например, биологи и биофизики. Мы же рассматриваем проблему глобальной связи земной жизни и геомагнитного поля.

Что, если на голову человека или другого существа падает кирпич? А если много «кирпичей» в виде метеоритов, камнепадов в горах, обломков при извержении вулкана, ударов молнии или, как в нашем случае, «ударяет» магнитная буря? Они могут и убить, причем не одного-двух, а многие тысячи! Но это не значит, что на всей Земле погибнут представители дан-

ной популяции и даже заметная их часть. И это не значит, что такие удары могут стать причиной мутационных изменений целых родов.

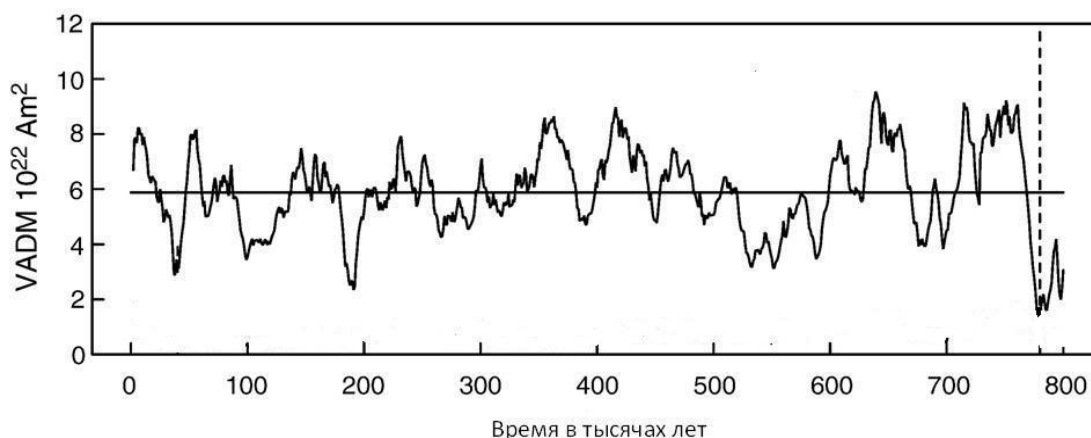


Рис. 8. Запись колебаний магнитного момента в морских осадках [16].

Падение величины геомагнитного поля может повлиять на биосферу из-за уменьшения размера магнитосферы. Напомним, что в настоящее время в спокойном состоянии подсолнечная точка границы магнитосферы находится на расстоянии $R_m \approx 10 R_E$, где R_E — радиус Земли. Однако даже при падении интенсивности поля на порядок граница магнитосферы приблизится к Земле далеко не в той же степени, а только до расстояния около $7R_E$. Это обстоятельство может заметно изменить радиационную обстановку в околоземном пространстве за счёт увеличения интенсивности магнитных бурь. Это не приведёт к немедленной катастрофе, но может повлиять на эволюцию биоты косвенным образом, через увеличение мутагенности, последнее не обязательно ведёт к вымиранию, с не меньшим успехом они могут привести и к расцвету различных форм жизни.

«Смещение» магнитных полюсов происходит постоянно, это вековые вариации направления геомагнитного поля. Обычно их величина составляет $10\text{--}20^\circ$, периоды — от десятков лет до сотен тысяч лет. Эти смещения происходят вокруг географического полюса. Осредненное за сотни тысяч лет положение магнитного полюса совпадает с географическим. Так палеомагнитологи восстанавливают положение географического полюса в прошлом. Во время инверсии, как отмечено выше, уничтожается в основном дипольная часть поля. У недипольного поля может быть несколько полюсов, которые могут оказаться и вблизи экватора. А в районе полюсов находится *магнитосферный касп*, через который частицы солнечной плазмы проникают в магнитосферу. В «нормальной магнитосфере» касп расположен в зоне полярного овала, где поток солнечного ветра огибает магнитосферу. Но в период переполюсовки, когда один из полюсов может попасть в подсолнечную точку, солнечный ветер «задуёт» непосредственно в касп. В результате будет происходить гигантская накачка магнитосферы

частицами высоких энергий, особенно во время мощных выбросов солнечной плазмы в сторону Земли [11]. Такое происходит не так уж часто, и нужно, чтобы мощный выброс в сторону Земли произошел именно во время смены знака поля. Такое может сказаться на мутагенности биоты. Однако, судя по рис. 2, мутагенность биоты, вызванная инверсиями, не играет заметной роли в картине развития жизни на Земле. Чтобы испытать переполюсовку магнитного поля, достаточно сделать стойку на голове или на руках, северянам перебраться в южное полушарие или наоборот южанам – в северное полушарие. Добавлю пару примеров, демонстрирующих отсутствие связи мутаций наземной биоты с инверсиями геомагнитного поля. Так, в мезозое на Земле царствовали динозавры на фоне *редких* инверсий в меловом (125-85 *Ma*) и триасовом (245-200 *Ma*) периодах и на фоне *очень частых* инверсий в юрском периоде (200-145 *Ma*). В девоне идет активное распространение наземной растительности, появляются первые наземные позвоночные. Девон – век разнообразия рыб. И все это происходит на фоне *низкой* частоты инверсий и интенсивности геомагнитного поля в семь раз ниже современного поля.

Разнообразие, тысячи родов

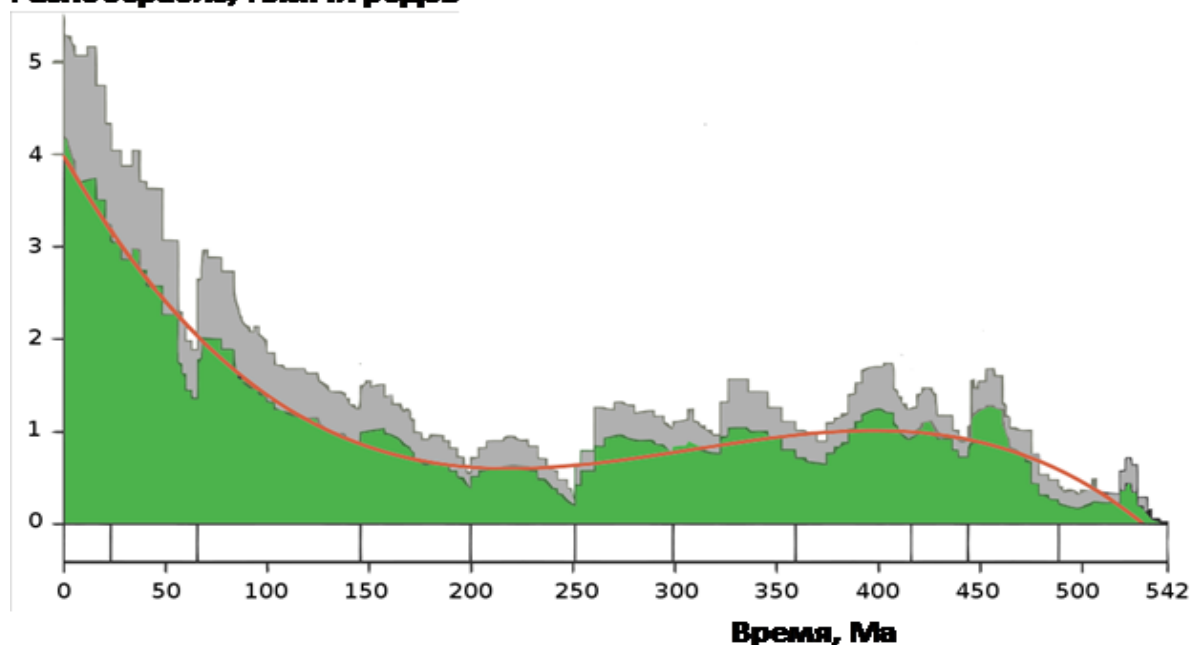


Рис. 8. Интенсивность разнообразия морских организмов в фанерозое [22, 24].

Отсутствие прямой связи смен биозон в течение фанерозоя с инверсиями геомагнитного поля, очевидно, свидетельствует и об отсутствии влияния геомагнитного поля на *эволюцию* жизни на Земле. Это следует и из того, что жизнь на Земле закономерно развивалась от примитивных одноклеточных форм до млекопитающих и человека на фоне, с одной стороны, довольно однообразного состояния геомагнитного поля в течение 2,5 миллиардов лет, с другой – явно независимо от многократных его инверсий [12,

21]. Более того, эволюция жизни шла закономерно, несмотря на крупные катастрофические события в истории Земли [22, 24]. Скорее, вопреки им, что наглядно иллюстрирует рис.8, особенно ярко это видно на примере границы мезозоя и кайнозоя (65,5Ма).

Выводы

1. В течение фанерозоя преобладала обратная полярность геомагнитного поля, согласуясь с вращением Земли против часовой стрелки. Смена полярности поля, скорее всего, связана с изменениями скорости вращения внутреннего ядра относительно мантии Земли, которые могут быть обусловлены такими процессами как приливная эволюция системы Луна-Земля, эволюция Земли в составе Солнечной системы и т.п. Длительные времена устойчивой полярности геомагнитного поля отражают устойчивый режим вращения Земли, интервалы же частых смен полярности относятся к неустойчивому режиму вращения Земли, когда замедление вращения часто сменяется ускорением вращения.

2. Непосредственная связь между геомагнитными инверсиями, биозонами и максимумами массовых вымираний биоты отсутствует. В то же время отмечается согласованная, близкая к синхронной общая картина частоты смен биозон и геомагнитной полярности, что объясняется общим источником – вращением Земли вокруг своей оси.

3. Отсутствие прямой связи изменений в биосфере с крупными изменениями величины и направления геомагнитного поля свидетельствует об отсутствии влияния поля на *эволюцию* жизни на Земле. Это следует и из того, что жизнь на Земле закономерно развивалась от примитивных одноклеточных форм до млекопитающих и человека, росло ее разнообразие на фоне близкого состояния геомагнитного поля в течение 2,5 миллиарда лет и независимо от многократных инверсий поля. Более того, эволюция жизни шла закономерно, вопреки катастрофическим событиям.

Литература

1. Бурлацкая С.П. «Археомagnetизм», Москва: ГЕОС, 2007. 343 с.
2. Галягин Д.К., Решетняк М.Ю., Печерский Д.М., Соколов Д.Д., Фрик П.Г. Вейвлет-анализ геомагнитного поля в неогее // Физика Земли. 2000. № 4. С.82–89.
3. Гурарий Г.З. Геомагнитное поле во время инверсий. М.: Наука, 1988. 308 с.
4. Манк У., Макдональд Г. Вращение Земли. М.: Мир, 1964. 384 с.
5. Молоствовский Э.А., Печерский Д.М., Фролов И.Ю. Магнитохроностратиграфическая шкала фанерозоя и ее описание с помощью кумулятивной функции распределения // Физика Земли. 2007. № 10. С.15–23.
6. Печерский Д.М., Асанидзе Б.З., Нургалиев Д.К., Шаронова З.В. Петромагнитная и палеомагнитная характеристика отложений на границе мезозоя и кайнозоя: разрез Тетрицкаро (Грузия) // Физ. Земли. 2009. №2. С.49–65.
7. Печерский Д.М., Любушин А.А., Шаронова З.В. К вопросу о согласованности изменений биоты и полярности геомагнитного поля в фанерозое // Физика Земли. 2012. № 1. с.44–62.

8. Печерский Д.М., Решетняк М.Ю., Соколов Д.Д. Фрактальный анализ временной шкалы геомагнитной полярности // Геомагнетизм и аэрономия. 1997. Т. 37. С. 132–142.
9. Поспелова Г.А. Экскурсы геомагнитного поля хрона Брюнес и глобальные климатические изменения // Физика Земли. 2000. № 8. С. 3–14.
10. Сидоренков Н.С. Нестабильность вращения Земли // Вестн. РАН. 2004. Т. 74. № 8. С. 701–715.
11. Старченко С.В., Щербаков В.П. Инверсионная магнитосфера // Докл. АН СССР. 1991. Т. 321. № 1. С.69–73.
12. Щербаков В.П., Сычева Н.К. Об изменении величины геомагнитного диполя за геологическую историю Земли // Физика Земли. 2006. № 3. С. 25–30.
13. Constable C., Korte M. Is Earth's magnetic field reversing? // Earth Planet. Sci. Lett. 2006. V. 246. P. 1–16.
14. Gradstein F.M., Ogg J., van Kranendonk M. On the Geological Time Scale 2008 // Newsletters on stratigraphy. 2008. V. 43/1. P. 5–13.
15. Groten E., Molodensky S.M. On the mechanism of the secular tidal acceleration of the solid inner core and the viscosity of the liquid core // Studia geoph. et geod. 1999. V. 43. P. 20–34.
16. Guyedo Y., Valet J.P. Global changes in intensity of the Earth's magnetic field during the past 800 kyr // Nature. 1999. V.399. P. 249–252.
17. Guzhikov A.Yu., Baraboshkin E.Yu., Birbina A.V. New paleomagnetic data for the Hauterivian-Aptian deposits of the Middle Volga region: a possibility of global correlation and dating of time-shifting of stratigraphic boundaries // Russian J. Earth Sci. 2003. V. 5. No 6. P. 401–430.
18. Kissel C., Laj C. Improvements in procedure and paleointensity selection criteria (PICRIT-03) for Thellier and Thellier determinations: application to Hawaiian basaltic long cores // Phys. Earth and Planet. Interior. 2004. V. 147. P. 155–169.
19. Mauritsch H.J. Der Stand der paläomagnetischen Forschung in den Ostaplen // Leobner Hefte für Angewandte Geophysik. 1986. V. 1. P. 141–160.
20. Pechersky D.M., Garbuzenko A.V. The Mesozoic-Cenozoic Boundary: Paleomagnetic Characteristic // Russian J. Earth Sci. 2005. V. 7. N 2.
21. Pechersky D.M., Zakharov V.S., Lyubushin A.A. Continuous record of geomagnetic field variations during cooling of the Monchegorsk, Kivakka and Bushveld Early Proterozoic layered intrusions // Russian J. Earth Sci. 2004. V. 6. No 6. P. 391–456.
22. Raup D., Sepkoski J. Mass extinctions in the marine fossil record // Science. 1982. V. 215. P. 1501–1503.
23. Rocchia R., Boclet D., Bonte Ph., Jehanno C., Chen Y., Courtillot V., Mary C., Wezel F. The Cretaceous-Tertiary boundary at Gubbio revisited: vertical extent of the Ir anomaly // Earth Planet. Sci. Lett. 1990. V. 99. P. 206–219.
24. Rohde R.A., Muller R.A. Cycles in the fossil diversity // Nature. 2005. V. 434. P. 209–210.

**GEOMAGNETIC FIELD REVERSALS AND LIFE ON THE EARTH
IN PHANEROZOIC TIME**

Pechersky D.M.

O.Yu. Schmidt Institute of Physics of the Earth, RAS, Moscow

Global paleomagnetic and biostratigraphic data are generalized. As a result it is found out that the direct connection between geomagnetic reversals, biozones and maxima of mass extinction of a biota is absent. At the same time it is noted close to a synchronous total picture of consistent changes of biozones and geomagnetic polarity. It is explained by the general source – the Earth's diurnal rotation. The reversal polarity of a geomagnetic field prevailed during the Phanerozoic that is agreed with the Earth's counterclockwise rotation. Change of polarity of a field, most likely, is connected with acceleration or deceleration of rotation speed of the internal core relative to the Earth's mantle.

Lack of direct interrelation between changes in the biosphere and geomagnetic field indicate a lack of influence of a field on life evolution on Earth. It follows also from the fact that life on Earth developed from primitive unicellular forms to mammals and the man and diversity of biota was grew against a close condition of a geomagnetic field during ~2,5 billion years and irrespective of numerous geomagnetic reversals. Main conclusion: evolutionary development of life on Earth doesn't depend both on large changes of a geomagnetic field, and on the extreme catastrophic events conducting to mass extinction of a biota.

РОЛЬ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КЛИМАТА И ЭКОСИСТЕМ В КЛИМАТИЧЕСКОМ ОТКЛИКЕ НА ВНЕШНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ

Елисеев А.В.

Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН, Москва, Россия

1. Введение

Земная климатическая система (ЗКС), наряду с физическими компонентами – атмосферой, океаном, деятельным слоем суши и криосферой – включает в себя и экосистемы. Экосистемы взаимодействуют с каждой из этих компонент, оказывая влияние на климатические характеристики на большом спектре пространственных и временных масштабов.

Традиционно взаимодействие климата и экосистем подразделяется на биогеохимическую и биогеофизическую составляющие (рис. 1). К первому из них относят процессы, связанные с поглощением химических веществ наземными и морскими системами, а также с последующими преобразованиями этих веществ внутри систем. Остальные процессы относят к биогеофизическим.

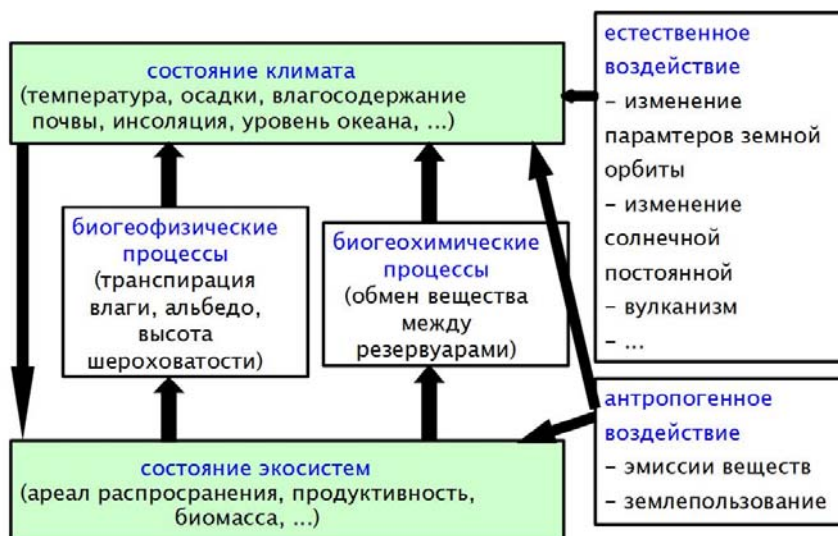


Рис. 1. Взаимодействие климата и экосистем.

Разделение процессов взаимодействия климата и экосистем на биогеофизические и биогеохимические условно. Все эти процессы связаны между собой. В частности, интенсивность переноса влаги растениями из почвы в атмосферу и интенсивность ассимиляции ими углерода из атмосферы связаны между собой на физиологическом уровне. Более того, при изменении типов экосистем в данном регионе изменяются характеристики и биогеофизических, и биогеохимических процессов.

В данной статье будет проведён краткий обзор сведений, касающихся взаимодействия климата и экосистем [6].

2. Биогеофизические процессы

2.1. Влияние типа растительности на поглощение солнечной энергией системы

Альbedo поверхности суши зависит от типа растительности и характеристик почвы. Самое большое альbedo у чистого снега – 0.7–0.9. Альbedo песка – 0.3–0.4, травы 0.20–0.25, лесов – 0.05–0.25, вспаханных почв – от 0.05–0.15 (чернозёмы) до 0.2–0.3 (подзолы), океана – ≤ 0.1 .

Таким образом, замена одного типа экосистемы другим непосредственно приводит к изменению альbedo поверхности, а, следовательно, и к изменению доли солнечной энергии, поглощаемой ЗКС.

В этом и следующем разделах для определённости мы будем говорить лишь об одном (наиболее распространённом) типе изменений экосистем – замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями. Часто при этом происходит дефорестация – замена лесов на травяную растительность (например, зерновые культуры). Как правило, расширение сельскохозяйственных угодий увеличивает альbedo поверхности (более тёмные виды растений заменяются более светлыми), приводя к уменьшению поглощения солнечной энергии климатической системой.

Это наиболее очевидный, но не единственный механизм влияния растительности на альbedo поверхности. Ещё один механизм связан с так называемой "маскировкой" снега древесной растительностью зимой. Выпадающий зимой снег покрывает почву и травяную растительность, резко меняя альbedo поверхности. Однако, выпадая в регионах лесов, он проваливается сквозь ветви, накапливаясь на подстилке. Как следствие, изменение альbedo поверхности (точнее, системы "поверхность-растительность") при выпадении снега в лесах оказывается меньше, чем в степях, полупустынях и пустынях. Например, увеличение альbedo поверхности для травяных экосистем от зимы к лету составляет 50–55%, тогда как для лесов – не более 10% [23]. Если при развитии сельского хозяйства в регионах, покрываемых зимой снегом, происходит замена лесов на травяную растительность, то "маскировка" снега исчезает, что дополнительно увеличивает альbedo поверхности.

Численные эксперименты с климатическими моделями позволили оценить влияние землепользования на изменения климата в последние столетия. В целом, увеличение альbedo поверхности относительно доантропогенного состояния способствовало охлаждению климата на 0.11–0.25°C [7, 16] (рис. 2). Примерно 2/3 такого охлаждения обусловлено дефорестацией в XX веке [7]. Тут следует отметить, что по оценкам [20] увеличение глобальной температуры атмосферы у поверхности в 2003–2012 гг. относительно 1850–1900 гг. составило 0.78°C (с интервалом неопределённости

0.72–0.85°C). Как следствие, 10–20% возможного глобального потепления могло быть скомпенсировано изменением альbedo поверхности из-за дефорестации.

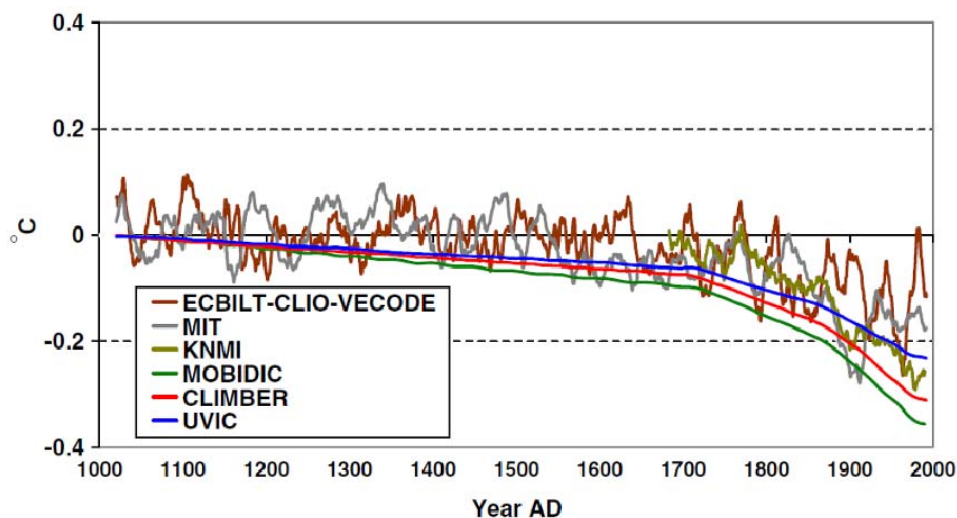


Рис. 2. Изменение среднегодовой приземной температуры Северного полушария из-за дефорестации при 20-летнем скользящем осреднении в климатических моделях (см. легенду) [16].

2.2. Влияние экосистем на перенос влаги между почвой и атмосферой

Растения поглощают влагу своими корнями из почвы и переносят её в атмосферу. Этот процесс называется транспирацией и оказывается весьма важным. Согласно [26], $61 \pm 15\%$ влаги с поверхности суши в атмосферу переносится именно таким образом, тогда как на долю остальных процессов переноса влаги в атмосферу (испарение с поверхности водоёмов, из пор почвы и с поверхности кроны деревьев и травы) приходится 24–54%. Транспирация – процесс, физиологически необходимый растениям для усвоения вещества при фотосинтезе. Как и альbedo поверхности, интенсивность транспирации зависит от типа растительности. Например, коэффициент использования влаги растениями (отношение интенсивности транспирации к интенсивности фотосинтеза) для леса меняется в интервале 2.4–6.7 гС/кгН₂О, для трав – в интервале 2.1–4.4 гС/кгН₂О, для сельскохозяйственных культур – 1.6–4.0 гС/кгН₂О [14].

Как следствие, при замене естественной растительности сельскохозяйственными угодьями изменяется интенсивность транспирации. Это приводит к изменению притока влаги к атмосфере. Такие изменения способны поменять режим осадков. Более того, этот эффект может модифицироваться изменениями температуры, связанными с соответствующим изменением альbedo поверхности (см. предыдущий раздел) и приводящими к изменению содержания водяного пара в атмосфере (в соответствии с уравнением Клаузиуса-Клапейрона).

Из приведённых выше значений коэффициента использования влаги видно, что при дефорестации интенсивность транспирации должна уменьшаться, уменьшая и влагосодержание атмосферы и осадки весной и летом. Подобное было получено в расчётах с КМ ИФА РАН [7], в том числе для основных регионов сельскохозяйственного производства на юге европейской части России (рис. 3). Уменьшение осадков в этих регионах было выявлено и по наблюдениям [20]. По-видимому, оно является следствием как изменения глобальной циркуляции атмосферы, так и землепользования в данном регионе.

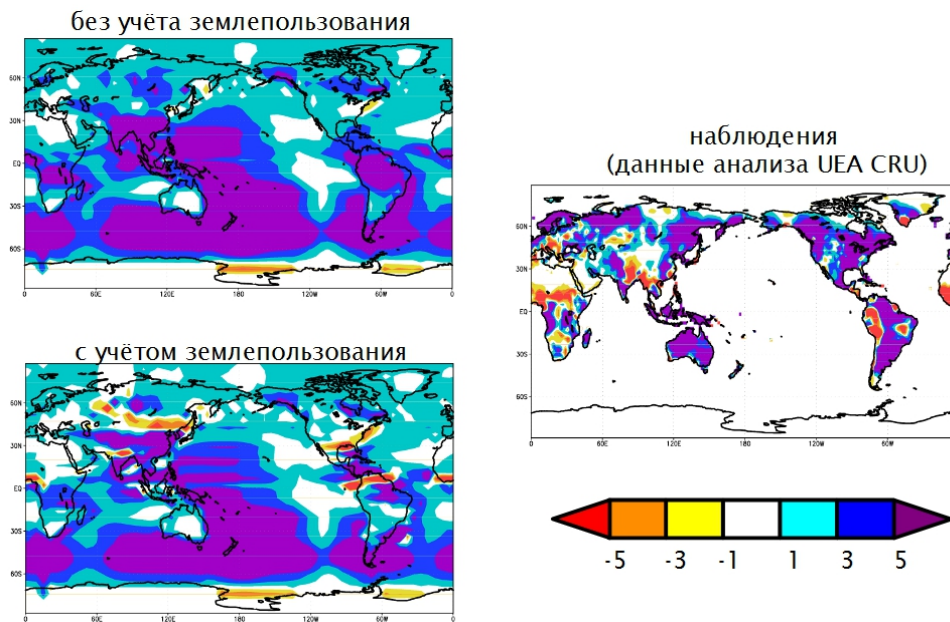


Рис. 3. Изменение годовых осадков [см/год] в XX веке в расчётах с КМ ИФА РАН [7].

Однако при интенсификации земледелия повышение её продуктивности ведёт к более интенсивной транспирации влаги растениями. В частности, увеличение осадков было отмечено в регионах Великих равнин США в последние десятилетия. Оно связано с увеличением продуктивности сельского хозяйства в этом регионе [22].

В заключение этого раздела упомянем ещё один процесс, за счёт которого растительность оказывает влияние на гидрологический цикл. Это перехват дождевой влаги листвой деревьев. Влага, перехваченная листьями, как правило, не попадает в почву, а испаряется в атмосферу. Это уменьшает влагосодержание почвы. В зависимости от вида лесная растительность способна перехватывать до 42% выпадающих осадков [28]. В среднем по всей суше перехватывается 18% выпадающих осадков [28].

Следует отметить, что влияние изменений альбедо и транспирации при дефорестации на баланс энергии в ЗКС взаимно компенсируют друг друга. Как следствие, их суммарный эффект в климатическом отклике на внешнее воздействие оказывается неопределённым по знаку [25].

Взаимодействие климата и экосистем способно приводить к возникновению множественных устойчивых положений равновесия в ЗКС с потенциальным барьером между ними. При этом возможно резкое изменение состояния системы при наличии внешнего воздействия. Наиболее известным примером этого считается исчезновение растительности на западе Сахары в середине голоцена как отклика на изменение характеристик инсоляции (из-за изменения параметров орбиты Земли) при наличии множественных состояний равновесия, связанных с влиянием растительности на количество осадков [18].

3. Биогеохимические процессы

3.1. Углеродный цикл

Как уже отмечалось, биогеохимические процессы представляют собой совокупность явлений, связанных с поглощением, преобразованием и последующим выделением вещества экосистемами. Среди них особую роль играет углеродный цикл, связанный с двумя углеродосодержащими соединениями – углекислым газом CO_2 и метаном CH_4 . Оба эти вещества являются сильными парниковыми газами.

В последние несколько тысячелетий перед началом индустриального периода концентрация углекислого газа в атмосфере была близка к 280 млн^{-1} , что соответствует примерно 600 ГтС (гигатонн углерода, рис. 4). За индустриальный период концентрация увеличилась почти в полтора раза, достигнув 394 млн^{-1} в 2012 г. Соответствующее увеличение массы углерода в атмосфере (около 240 ГтС), однако, оказывается значительно меньше, чем оценки эмиссии CO_2 за счёт сжигания ископаемого топлива и землепользования ($\approx 360 \text{ ГтС}$ и $\approx 180 \text{ ГтС}$, суммарно $\approx 540 \text{ ГтС}$). Это связано с тем, что более половины CO_2 , выделенного за счёт антропогенной деятельности, было поглощено океаном и наземными экосистемами.

Основным источником увеличения массы CO_2 в атмосфере в настоящее время являются антропогенные эмиссии за счёт сжигания ископаемого топлива ($\approx 10 \text{ ГтС/год}$ в конце первого десятилетия XXI века). Меньший вклад даёт эмиссиями за счёт сжигания биомассы при дефорестации (порядка 1 ГтС/год), хотя этот источник доминировал вплоть до начала XX века. Такие процессы, как выветривание почв и вулканизм, дают пренебрежимо малый вклад в баланс углерода в атмосфере: $\approx 0.2 \text{ ГтС/год}$ и $\approx 0.1 \text{ ГтС/год}$ соответственно.

Морская часть углеродного цикла связана с растворением CO_2 в воде, а также функционированием морских экосистем. Океан – один из самых больших резервуаров углерода в земной системе ($\approx 39 \text{ тыс. ГтС}$). Однако большая часть этой массы находится в среднем и глубоком слоях океана с временем отклика порядка нескольких столетий или тысячелетий. Как следствие, на масштабах до нескольких столетий доступны лишь около 2 тыс. ГтС океанического углерода.

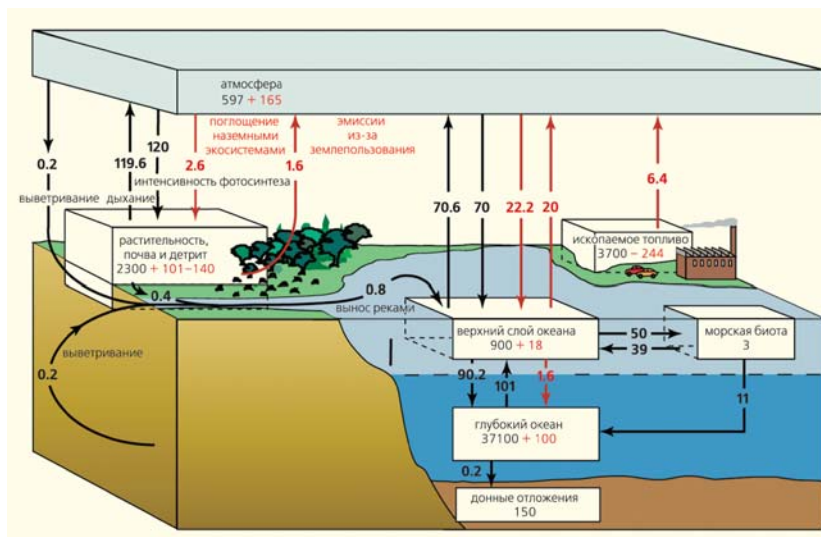


Рис. 4. Глобальный углеродный цикл [19].

Резервуары выражены в ГтС, потоки – в ГтС г.⁻¹

Указаны доиндустриальные значения (чёрным) и их изменения к концу XX века (красным).

Поглощение углекислого газа морской водой происходит в регионах, где парциальное давление растворённого в воде углекислого газа оказывается меньше парциального давления CO_2 в атмосфере. Последнее достигается, если в данном регионе доминирует перенос морской воды от поверхности океана вглубь, например, в средних широтах Северного и Южного полушарий, а также в регионе Атлантики к югу от Гренландии. Суммарное поглощение CO_2 океаном из атмосферы по разным оценкам здесь составляет 60–90 ГтС/год. Однако оно почти полностью компенсируется выделением углекислого газа из регионов апвеллинга, где восходящие течения выносят из глубины на поверхность богатую CO_2 морскую воду (регионы тропиков, Южного океана и регион на северо-западе Тихого океана). Как следствие, суммарное поглощение CO_2 из атмосферы океаном (нетто-поток) оказывается значительно меньше: в конце XX-начале XXI веков он был равен $2.0\text{--}2.3 \pm 0.7$ ГтС/год [20]. Это значение способно изменяться при накоплении углекислого газа в атмосфере, а также при климатических изменениях разной природы. Например, в соответствии с законом Генри растворимость CO_2 в морской воде уменьшается при увеличении температуры, что уменьшает интенсивность поглощения углекислого газа океаном (при прочих равных условиях).

Следует иметь в виду, что система океанических течений образует ряд замкнутых петель. Важнейшей из них является так называемый глобальный конвейер, включающий в себя крупномасштабное опускание океанической воды в Северной Атлантике, поднятие – на севере Тихого и Индийского океанов, а также связывающие эти области поверхностные и глубинные течения. Частью этой циркуляционной петли является Гольфстрим. Ещё одним примером служат крупномасштабные круговороты в тропиках, где преобладающие нисходящие течения (возникающие из-за вращения

Земли и, соответственно, наличия силы Кориолиса) приводят к тому, что вода здесь очень бедна нутриентами. Последнее является причиной того, что продуктивность океанических систем в этих круговоротах очень мала (в связи с чем они также называются олиготрофными). Все циркуляционные системы океана чувствительны к атмосферному воздействию (ветру, температуре, испарению и осадкам; две последних переменных влияют на солёность морской воды а, следовательно, и на её плотность). Климатические изменения, ожидаемые при дальнейшем увеличении антропогенной нагрузки на систему, способны замедлить перенос воды океаническим конвейером (или даже привести к его коллапсу), что приведёт к ослаблению выделения CO_2 в регионах апвеллинга, т.е. более интенсивному поглощению углекислого газа морской водой. Однако по оценкам [30] в XXI веке это меняет накопление CO_2 в атмосфере не более чем на 10 млн^{-1} .

Первичная продукция морских экосистем оценивается величиной 50 ГтС/год [17]. Однако большая часть этого углерода сосредоточена в морском планктоне с малым временем жизни (порядка недели), так что запас углерода в морских экосистемах близок к 1 ГтС . Как следствие, на годовых и больших масштабах по времени этот поток с очень хорошей точностью оказывается сбалансирован при отмирании организмов за счёт выделения углерода в морскую воду и экспорта вещества (скелетов и раковин) на дно. Однако нельзя исключать, что при значительном изменении климата этот поток перестанет быть сбалансирован и начнёт давать заметный вклад в нетто-поток CO_2 между океаном и атмосферой.

Донные отложения (формирующиеся при экспорте скелетов и раковин) способны растворяться в морской воде. Это медленный процесс, важный лишь на масштабах тысячелетий. Его интенсивность, однако, зависит от степени закисленности океана, которая, в свою очередь, увеличивается при накоплении CO_2 в нём. Этот процесс, с одной стороны, увеличивает способность океана поглощать CO_2 из атмосферы, с другой – приводит к гибели моллюсков и кораллов.

Наземная часть углеродного цикла определяется, прежде всего, фотосинтезом растений с суммарной интенсивностью $123 \pm 8 \text{ ГтС/год}$ [15]. Однако, как и в случае океана, этот поток оказывается во многом сбалансирован дыханием растений ($\approx 60 \text{ ГтС/год}$) и разложением углерода, поступившего в почву с опадом листьев и веток и при отмирании растений (также около 60 ГтС/год). Важным процессом являются природные пожары, приводящие к эмиссиям CO_2 в атмосферу около 1.4 ГтС/год . Большая степень взаимной компенсации этих потоков приводит к тому, что нетто-поток углерода из атмосферы в наземные экосистемы (без учёта эмиссий CO_2 в атмосферу при дефорестации) в последнее десятилетие XX века и в первое десятилетие XXI века в среднем оценивается величиной до $2.6 \pm 1.3 \text{ ГтС/год}$ [20].

Запас углерода в наземной растительности оценивается величиной 450–650 ГтС. На изменение этого запаса влияет, во-первых, состояние климата, определяющего условия жизни растений в данном регионе, во-вторых, так называемый эффект фертилизации растительности за счёт CO_2 атмосферы (накопление которого приводит к частичному закрытию устьиц листьев, что позволяет растению эффективнее усваивать углерод при фотосинтезе) [11], в-третьих, дефорестация при землепользовании. Запас углерода почвы по разным оценкам равен от 1.5 тыс. ГтС до 2.5 тыс. ГтС. Эти оценки не включают в себя запас углерода в многолетнемёрзлых грунтах, образовавшийся в предыдущие межледниковья. Количество углерода в вечной мерзлоте может достигать 1–2 тыс. ГтС [24]. При потеплении климата и связанном с ним таянии многолетнемёрзлых грунтов этот углерод может быть включён в активный углеродный цикл. Всё это приводит к тому, что, как и для океана, потоки углерода между атмосферой и наземными экосистемами могут изменяться при накоплении углекислого газа в атмосфере, а также при климатических изменениях. Кроме того, фотосинтез растений может подавляться при загрязнении атмосферы рядом примесей, например озоном или соединениями серы [11].

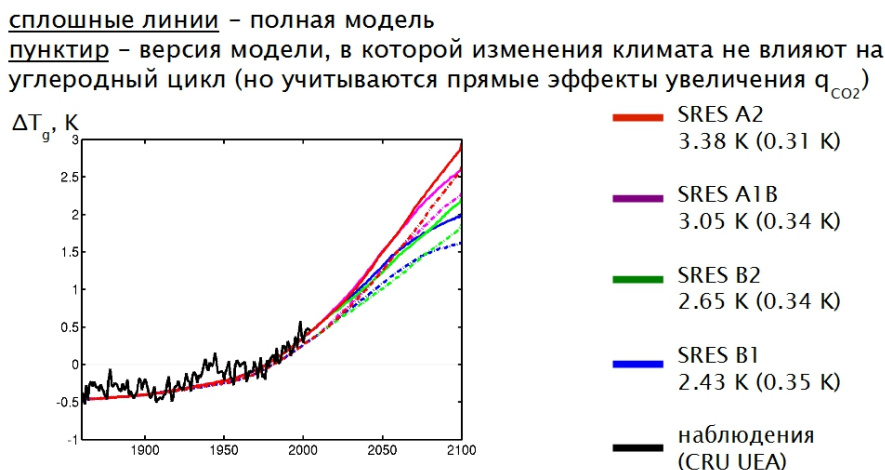


Рис. 5. Изменение глобально осреднённой среднегодовой приземной температуры T_g в расчётах с КМ ИФА РАН [9] при сценариях антропогенного воздействия [19] (см. легенду). Числами в легенде показано изменение T_g в 1860–2100 гг. и (в скобках) дополнительное потепление из-за взаимодействия климата и углеродного цикла.

В последнее примерно десятилетие в ряде мировых центров в климатические модели активно внедряются интерактивные блоки углеродного цикла. В настоящее время разработано более десятка таких моделей и проведено сравнение между ними [21]. Среди климатических моделей с углеродным циклом есть и две российские: глобальные КМ Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) [5, 9, 10] и Института вычислительной математики РАН (ИВМ РАН) [1]. Основным результатом численных экспериментов с такими моделями явилось выявление положи-

тельности обратной связи между климатом и углеродным циклом: климатические изменения, сопровождающие рост содержания CO_2 в атмосфере, в целом ослабляют поглощение углерода океаном и наземными экосистемами. В частности, в XXI веке взаимодействие климата и углеродного цикла усиливает потепление в моделях примерно на 10% [9] (рис. 5).

3.2. Метановый цикл

Важной частью взаимодействия климата и экосистем является цикл метана. Метан – сильный парниковый газ. В пересчёте на одну молекулу сечение поглощения теплового излучения для метана оказывается в 20–25 раз больше соответствующего значения для углекислого газа.

Концентрация метана в атмосфере за индустриальный период значительно выросла, от примерно 700 млрд^{-1} до 1803 млрд^{-1} в 2011 г. [20]. Это соответствует увеличению массы метана в атмосфере на 2.8 Гт (массу метана традиционно выражают не в единицах углерода, в терминах полной массы).

Основной причиной роста содержания метана в атмосфере являются антропогенные эмиссии метана, увеличившиеся с 0.03 ГтС/год в начале XIX века до 0.3 ГтС/год в начале XXI столетия. Около $4/5$ этого потока обусловлено сельским хозяйством (возделыванием риса, разложением сельскохозяйственных органических остатков, ферментацией в кишечниках крупного рогатого скота, сжиганием биомассы), а остальное – утечками из трубопроводов [20]. Естественные потоки метана определяются на 75–80% образованием метана в почве влажных экосистем (здесь огромную роль играют болота), в остальной части – рядом других процессов (жизнедеятельностью термитов, выделением из водоёмов, разложением органических остатков в естественных условиях, выделением из земной коры). Суммарная интенсивность источников метана в атмосферу оценивается величиной $0.5\text{--}0.6 \text{ ГтС/год}$ [20].

Скорость накопления метана в атмосфере в XX – начале XXI века не превышала 0.03 Гт/год , что намного меньше суммарной интенсивности источников метана. Как следствие, суммарная интенсивность источников метана должна быть близка к суммарной интенсивности его стоков. Важнейшим стоком метана в атмосфере является его разрушение при реакции с гидроксил-радикалом OH [24]. За счёт этой реакции разрушается 75–85% метана в атмосфере. Её высокая интенсивность приводит к тому, что среднее время нахождения метана в земной атмосфере (определяемое как отношение массы метана в атмосфере к интенсивности его разрушения) равно $8.7 \pm 1.3 \text{ г}$. [19]. При этом образуется углекислый газ. Дополнительно небольшое количество метана разрушается в стратосфере за счёт реакций с хлором и атомарным кислородом. Около 5% метана окисляется в порах почвы, ненасыщенной влагой.

Интенсивность ряда источников метана увеличивается с ростом температуры. Это справедливо, например, в отношении рисовых полей, влажных экосистем (включая болота), разложения органики [24]. Как следствие, при потеплении климата дополнительное выделение метана может увеличить парниковое воздействие, приводя к дополнительному усилению потепления. Это может быть особенно важно в связи с тем, что бóльшая часть влажных экосистем (бореальные болота, тундра) находится в субполярных широтах, где на междекадных масштабах времени потепление климата оказывается наиболее значимым. Однако расчёты с КМ ИФА РАН и ИВМ РАН показали, что, несмотря на значительное (до 20% относительно версий модели, в которых не учитывается влияние изменений климата на эмиссии CH_4 из почвы) увеличение содержания метана в атмосфере из-за этого, соответствующая модификация климатического отклика на антропогенные эмиссии оказывается очень малой [2, 8] (см. также рис. 6).

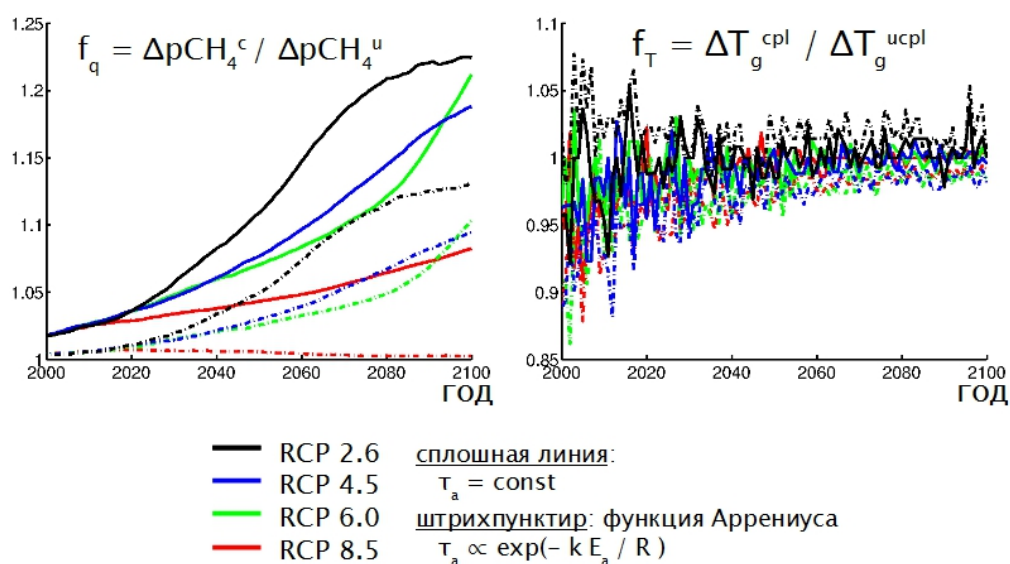


Рис. 6. Интенсивность обратной связи между климатом и метановым циклом в расчётах с КМ ИФА РАН при сценариях антропогенного и естественного воздействия на климат, указанных на легенде. Интенсивность обратной связи определена как отношение изменений концентрации CH_4 в атмосфере (слева) и глобально осреднённой приземной температуры (справа) между расчётами с полной моделью (обозначена индексом "с") и с версией модели без учёта влияния изменений климата на метановый цикл (обозначена индексом "u"). Расчёты проведены с двумя вариантами модели с разной зависимостью времени жизни метана в атмосфере τ_a от температуры.

Ещё одним потенциально важным источником метана являются газогидраты. Они формируются, когда из-за наличия определённых примесей (в частности, метана) структура кристаллической решётки льда меняется с кубической на гексагональную. Газогидраты могут существовать в условиях либо высокого давления (как правило, ≥ 120 атм.; это возможно, например, в океанических регионах из-за веса воды), либо очень холодного климата (например, на суше в регионах распространения вечной мерзлоты).

Как следствие, газогидраты могут разрушаться с выделением CH_4 при потеплении климата или при уменьшении уровня океана. Общий запас метана в них оценивается величиной 0.5–2.5 тыс. ГтС [24]. Как следствие, выделение CH_4 из газогидратов в принципе способно создать значительный парниковый эффект и привести к резкому потеплению климата. Выделение метана из газогидратов – одна из возможных причин формирования очень тёплого климата 55 млн. лет назад [29].

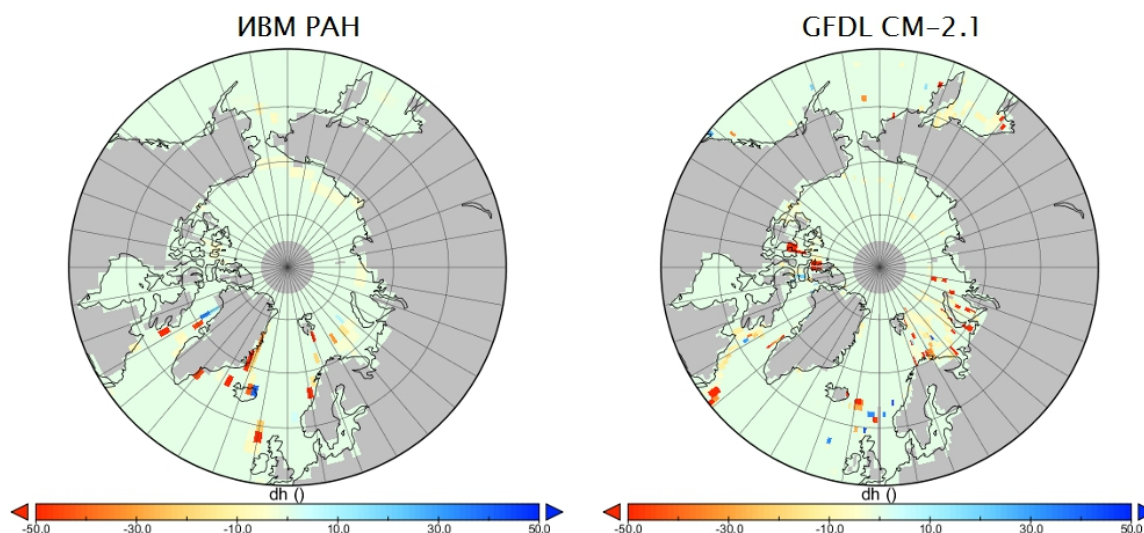


Рис. 7. Возможные изменения толщины слоя устойчивости H метангидратов в XXI веке в расчётах с моделью донных отложений ИФА РАН при задании изменений придонной температуры океана в соответствии с результатами численных экспериментов с двумя моделями общей циркуляции (см. легенду) при сценарии антропогенного воздействия SRES A2 [4]. Такое изменение H без учёта окисления CH_4 в слое сульфатных отложений морского дна и в морской воде соответствует выделению метана 60 Гт за столетие.

В ледниковые периоды накопление воды в ледовых щитах приводило к понижению уровня океана (в последний ледниковый период – на ≈ 120 м). Это должно было способствовать диссоциации метангидратов океанического дна. Однако обнажение шельфа сопровождалось его охлаждением на несколько десятков градусов, что, как считается, наоборот приводило к формированию гидратов метана [12]. В XXI веке, в отличие от эмиссий CH_4 из влажной почвы, прогрев океанического дна осуществляется очень медленно даже при наиболее агрессивных возможных сценариях антропогенного воздействия на систему. Как следствие, резкого усиления парникового эффекта в этот период из-за разложения газогидратов ожидать не следует [4] (рис. 7).

3.3. Азотный и фосфорный циклы

Важную роль играют также циклы азота и фосфора – веществ, необходимых живым организмам для нормального функционирования. Наряду с важностью для экосистем, ряд их соединений влияет на распространение

радиации в атмосфере. В настоящее время делаются первые попытки включения этих циклов в глобальные климатические модели.

Несмотря на то, что около 78% объёма атмосферы составляет азот, для многих процессов в экосистемах этот элемент является лимитирующим фактором. Это связано с доминированием в земной атмосфере молекулярного азота, который представляет собой химически устойчивое соединение и не усваивается фотосинтезирующими организмами. Недостаток минеральных форм почвенного азота негативно сказывается на развитии растительного покрова, приводя к угнетению наземных растений, и тем самым сдерживает поглощение углерода наземными экосистемами [3, 13] (рис. 8). Запасы азота в наземных экосистемах состоят из азота в растительности (10–16 ГтN), в биомассе животных (≈ 0.2 ГтN), минерального (доступного растениям) азота почвы (16–140 ГтN), органического (поглощение которого растениями возможно лишь после перехода в минеральную форму) азота почвы (70–820 ГтN) [3]. В целом лимитирование фотосинтеза растительности азотом оказывается важным вне тропиков. В тропиках продуктивность растений может быть ограничена доступностью фосфора; лимитирование этим элементом может быть важным и в средних широтах.

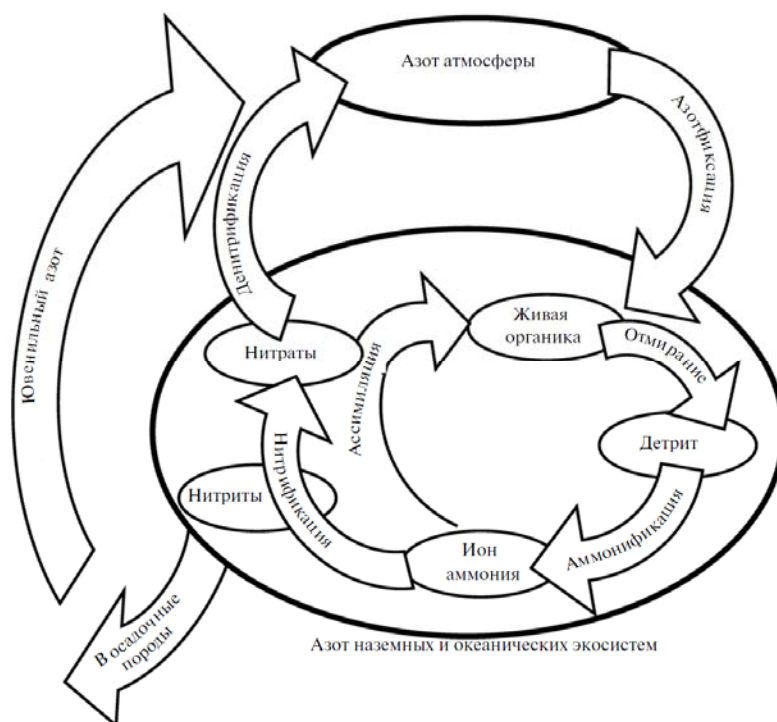


Рис. 8. Глобальный азотный цикл (рис. 2 из [3]).

В океанических фотосинтезирующих экосистемах содержание азота и фосфора можно оценить по классическому соотношению Редфилда $C:N:P = 106:16:1$ (каждым 106 атомам углерода соответствуют 16 атомов азота и 1 атом фосфора), выполняющемуся с точностью не хуже 20%. Это соответствует ≈ 0.2 ГтN (см. также [3]) и ≈ 0.02 Гт фосфора. Подобно

наземным экосистемам, недостаток этих элементов способен подавить продуктивность морских экосистем. Кроме того, ≈ 0.2 ГтN содержится в биомассе морских животных, 45–900 ГтN – в океаническом детрите, 100–700 ГтN – в растворённых в океане неорганических соединениях азота. Наибольшим по массе (10–22 тыс. Гт N), но не участвующим в активном азотном цикле, является резервуар растворённого в океане молекулярного азота N₂ [3].

Ограничение интенсивности фотосинтеза количеством доступного азота способно заметно модифицировать обратную связь между климатом и углеродным циклом [3, 27].

4. Заключение

Климатические изменения, наблюдавшиеся на протяжении истории Земли и ожидаемые в будущем, способны существенно изменить состояние наземных и океанических экосистем. Взаимодействие климата и экосистем, в свою очередь, способно заметно изменить климатический отклик на внешние воздействия.

Литература

1. *Володин Е.М.* Модель общей циркуляции атмосферы и океана с углеродным циклом // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 3. С. 298–313.
2. *Володин Е.М.* Цикл метана в модели климата ИВМ РАН // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 163–170.
3. *Голубятников Л.Л., Мохов И.И., Елисеев А.В.* Цикл азота в земной климатической системе и его моделирование // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2013. Т. 49. № 3. С. 255–270.
4. *Денисов С.Н., Аржанов М.М., Елисеев А.В., Мохов И.И.* Оценка отклика субэвальных залежей метангидратов на возможные изменения климата в XXI веке // ДАН. 2011. Т. 441. № 5. С. 685–688.
5. *Елисеев А.В.* Оценка изменения характеристик климата и углеродного цикла в XXI веке с учётом неопределённости значений параметров наземной биоты // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 2. С. 147–170.
6. *Елисеев А.В.* Взаимодействие климата и экосистем: исследования на стыке наук // Природа. 2013. № 9. С. 10–16.
7. *Елисеев А.В., Мохов И.И.* Влияние учёта радиационного эффекта изменения альбедо поверхности суши при землепользовании на воспроизведение климата XVI–XXI веков // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2011. Т. 47. № 1. С. 18–34.
8. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Аржанов М.М. и др.* Учет взаимодействия метанового цикла и процессов в болотных экосистемах в климатической модели промежуточной сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2008. Т. 44. № 2. С. 147–162.
9. *Елисеев А.В., Мохов И.И., Карпенко А.А.* Взаимодействие климата и углеродного цикла в XX–XXI веках в модели климата промежуточной степени сложности // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2007. Т. 43. № 1. С. 3–17.
10. *Мохов И.И., Елисеев А.В.* Моделирование глобальных климатических изменений в XX–XXIII веках при новых сценариях антропогенных воздействий RCP // ДАН. 2012. Т. 443. № 6. С. 732–736.

11. Семенов С.М., Кунина И.М., Кухта Б.А. Сравнение антропогенных изменений приземных концентраций O₃, SO₂ и CO₂ в Европе по экологическому критерию // ДАН. 1998. Т. 361. № 2. С. 275–279.
12. Сергиенко В.И., Лобковский Л.И., Семилетов И.П. и др. Деградация подводной мерзлоты и разрушение гидратов шельфа морей Восточной Арктики как возможная причина “метановой катастрофы”: некоторые результаты комплексных исследований 2011 года // ДАН. 2012. Т. 446. № 3. С. 330–335.
13. Arneeth A., Harrison S.P., Zaehle S., et al. Terrestrial biogeochemical feedbacks in the climate system // Nature Geosci. 2010. V. 3. № 8. P. 525-532. doi 10.1038/ngeo905.
14. Beer C., Ciais P., Reichstein M., et al. Temporal and among-site variability of inherent water use efficiency at the ecosystem level // Glob. Biogeochem. Cycles. 2009. V. 23. № 2. GB2018. doi 10.1029/2008GB003233.
15. Beer C., Reichstein M., Tomelleri E., et al. Terrestrial gross carbon dioxide uptake: Global distribution and covariation with climate // Science. 2010. V. 329. № 5993. P. 834–838. doi 10.1126/science.1184984
16. Brovkin V., Claussen M., Driesschaert E. Biogeophysical effects of historical land cover changes simulated by six Earth system models of intermediate complexity" // Clim. Dyn. 2006. V. 26. № 6. P. 587–600. doi 10.1007/s00382-005-0092-6.
17. Carr M.E., Friedrichs M.A.M., Schmeltz M., et al. A comparison of global estimates of marine primary production from ocean color // Deep-Sea Res. II. V. 53. № 5–7. P. 741–770. doi 10.1016/j.dsr2.2006.01.028.
18. Claussen M., Kubatzki C., Brovkin V., et al. Simulation of an abrupt change in Saharan vegetation in the Mid-Holocene // Geophys. Res. Lett. 1999. V. 26. № 14. P. 2037–2040. doi 10.1029/1999GL900494.
19. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Solomon S., Qin D., Manning M. et al. (eds.). Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2007. 996 p. (http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/contents.html)
20. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Stocker T., Qin D., Plattner G.-K., et al. (eds.). Cambridge/New York: Cambridge University Press. 2007. 1535 p. (<http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>).
21. Friedlingstein P., Cox P., Betts R., et al. Climate-carbon cycle feedback analysis: Results from the C⁴MIP model intercomparison // J. Climate. 2006. V. 19. № 22. P. 3337–3353.
22. Groisman P.Ya., Knight R.W., Karl T.R. Changes in intense precipitation over the central United States // J. Hydrometeorology. 2012. V. 13. № 1. P. 47–66. doi 10.1175/JHM-D-11-039.1
23. Jin Y., Schaaf C.B., Gao F., et al. How does snow impact the albedo of vegetated land surfaces as analyzed with MODIS data? // Geophys. Res. Lett. 2002. V. 29. № 10. 1374. doi 10.1029/2001GL014132.
24. O'Connor F.M., Boucher O., Gedney N., et al. Possible role of wetlands, permafrost, and methane hydrates in the methane cycle under future climate change: A review // Rev. Geophys. 2010. V. 48. № 4. RG4005. doi 10.1029/2010RG000326.
25. Pitman A.J., de Noblet-Ducoudré N., Cruz F.T., et al. Uncertainties in climate responses to past land cover change: First results from the LUCID intercomparison study // Geophys. Res. Lett. 2009. V. 36. № 14. L14814. doi 10.1029/2009GL039076.
26. Schlesinger W.H., Jasechko S. Transpiration in the global water cycle // Agricul. For. Meteorol. 2014. V. 189-190. P. 115-117. doi 10.1016/j.agrformet.2014.01.011.
27. Sokolov A.P., Kicklighter D.W., Melillo J.M., et al. Consequences of considering carbon-nitrogen interactions on the feedbacks between climate and the terrestrial carbon cycle // J. Climate. 2008. V. 21. № 15. P. 3776–3796. doi 10.1175/2008JCLI2038.1.

28. Wang D., Wang G., Anagnostou E.N. Evaluation of canopy interception schemes in land surface models // *J. Hydrol.* 2007. V. 347. № 3–4. P. 308–318. doi 10.1016/j.jhydrol.2007.09.041.
29. Zachos J.C., Bohaty S.M., John C.M. et al. The Palaeocene-Eocene carbon isotope excursion: Constraints from individual shell planktonic foraminifer records // *Philos. Trans. R. Soc. A.* 2007. V. 365. № 1856. P. 1829–1842. doi 10.1098/rsta.2007.2045.

A ROLE WHICH INTERACTION BETWEEN THE CLIMATE AND ECOSYSTEMS PLAY IN SHAPING THE CLIMATE RESPONSE TO EXTERNAL FORCING

Eliseev A.V.

*A.M. Obukhov Institute of Atmospheric Physics, Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia*

The Earth system, in addition to its physical compartments (the atmosphere, the ocean, the soil, and the cryosphere), also includes ecosystems. The latter interact with all other compartments and affect climate variations at a large number of spatial and temporal scales. According to the simulations with global climate models, an increase of albedo due to land use in the 20th century has compensated 10–20% of the global warming during this century. In addition, a replacement of the natural vegetation by crops suppresses moisture transport by terrestrial plants from the soil to the atmosphere and, hence, local precipitation. In some cases, biogeophysical processes might lead to multistability at a regional scale. The latter serves as an effective amplifier of small external forcing. For instance, these process may be responsible to disappearance of vegetation in western Sahara in the mid-Holocene. Among the biogeochemical processes, the most important role for climate is played by the carbon cycle. The uptake of carbon by the ocean and by the terrestrial ecosystems depends on the climate state. The latter dependence results in a feedback between the climate and the carbon cycle. From the simulations with global climate models it is found that this feedback is positive: it amplifies the greenhouse-gases-induced warming, by about 10% in the 21st century. The climate-carbon cycle feedback may be modified by interaction between the carbon cycle and other biogeochemical cycles, e.g., with the nitrogen cycle. Climate changes may also change the emission of methane from wet soil. It is found that the climate-methane cycle feedback, despite markedly amplifying the CH₄ build up in the atmosphere, change the climate response to external forcing very insignificantly.

ПОЛЯРНЫЙ ЛЕД И КЛИМАТ ЗЕМЛИ

Ковадло П.Г., Язев С.А.

ИГУ, ИСЗФ СО РАН, Иркутск, Россия

Введение

Проблема глобальных изменений климата представляет собой не только академический интерес. Актуальность изучения этого процесса связана с изменением условий и комфорта проживания человечества, параметров окружающей среды, включая газовый состав атмосферы, с проблемой водообеспечения, условиями производства продуктов питания и многим другим. За последние 150 лет систематического инструментального мониторинга состояния атмосферы и океана достоверно показано, что температура поверхности планеты заметно повысилась. Особенно явно этот эффект проявляется в высоких широтах северного и южного полушарий. Выявлен набор возможных причин, повлиявших на этот рост. Широко исследуются последствия роста температуры в разных местах земного шара.

Наиболее ярко и масштабно проявляются явления, связанные с таянием полярных ледников. Обращает на себя особое внимание динамика уменьшения площади плавучей части ледника Северного Ледовитого океана. После 1960-х годов площадь морского льда, согласно спутниковым данным, сократилась на 10–15%, его толщина уменьшилась на 40%. По прогнозам некоторых экспертов, уже через 30 лет Северный Ледовитый океан в теплый период года будет полностью вскрываться из-под льда.

Таяние северных льдов происходит на фоне повышения приземной температуры воздуха. Прогнозируется полное разрушение ледника в течение ближайших нескольких десятков лет. Интенсивно тают и ледники на суше, в том числе Гренландский – крупнейший в Северном полушарии.

Наоборот, площадь плавучей части антарктического ледника продолжает увеличиваться, несмотря на то, что температура надводного слоя воздуха и воды в прибрежной зоне медленно растет [14]. Здесь среднегодовая температура пока отрицательна (около -10°C) даже на широтах, близких к 60° ю. ш. Однако, на фоне роста площади, общий объем Антарктического ледового щита также уменьшается за счет таяния льда и откалывания айсбергов.

Вопрос о том, носят ли процессы разрушения полярных ледников циклический либо необратимый характер, представляет как фундаментальный, так и практический интерес. Являются ли эти процессы лишь индикаторами глобального потепления, или они, будучи составной частью тепловой машины, могут кардинально влиять на изменения климата, как в ближайшей, так и в отдаленной перспективе? Остается открытым и главный вопрос – о причинах наблюдаемых изменений климата.

Рассматриваются три основных типа причин: антропогенный фактор, вариации солнечной активности и собственные планетные климатические циклы [12]. Антропогенный фактор обычно связывают с промышленной генерацией парниковых газов, что приводит к росту глобальной приземной температуры. В качестве механизмов влияния солнечной активности на климат обычно рассматриваются вариации солнечной постоянной и воздействие потоков солнечного ветра на интенсивность галактических космических лучей, в свою очередь, воздействующих на облакообразование и последующие изменения альбедо и парниковых свойств атмосферы Земли. (Заметим, что экспериментальные исследования последних лет, проводимые, в частности, в ЦЕРН, не позволяют считать механизм, связанный с действием космических лучей, эффективным [10–11, 13].)

Различия во взглядах исследователей обычно сводятся к разнице в оценках вклада каждого из типов причин. Крайние точки зрения допускают возможность пренебречь одним из типов причин, например, вкладом солнечного [8], либо, наоборот, антропогенного [1] факторов.

В то же время сам факт существования человечества, способного выжить только в узком диапазоне изменений климата, говорит о существовании мощного механизма, эффективно стабилизирующего климат на протяжении длительного времени. По-видимому, Земле в определенном смысле повезло: планета, во-первых, снабжена нужным количеством воды, во-вторых, она находится на таком расстоянии от Солнца, при котором термостабилизирующие факторы не выходят за пределы своего рабочего диапазона. В результате вода на Земле не превратилась полностью в пар и не исчезла в результате фотодиссоциации, как это, по-видимому, произошло на Венере, и не обратилась полностью в лед, как это произошло на Марсе [9].

В настоящей работе изложены основные положения концепции, которая рассматривает в качестве базовой причины долговременных циклических изменений климата [4, 5]. Это не означает, что отвергается вклад антропогенного либо солнечного факторов. Речь идет о качественной (пока) модели, которая неизбежно приводит к появлению циклических колебаний климата даже при неизменном вкладе солнечного и биосферного (включая антропогенный) факторов. Поскольку все указанные факторы являются переменными, нет сомнений, что на нулевое приближение накладываются дополнительные воздействия (космогенное и биогенное), что приводит к изменениям параметров собственных циклов системы.

Основные факторы, определяющие климат

Рассмотрим основные факторы, влияющие на климат планеты [6].

1. Климат Земли определяется потоком тепла, поступающего от Солнца. Согласно имеющимся данным, по крайней мере, за последние 130 млн. лет на Земле не происходили катастрофические события, которые

могли бы существенно изменить тепловой режим планеты. На этом основании можно считать, что параметры орбиты Земли относительно Солнца оставались и остаются неизменными в течение, по крайней мере, указанного периода времени.

Гипотезы о периодических прохождениях Солнечной системой плотных облаков, уменьшающих проходящий поток солнечного излучения, остаются не более чем гипотезами. По-видимому, можно утверждать, что внешние условия для Земли (поток тепла от Солнца) в первом приближении не меняются. Это означает, что, если пренебречь антропогенным фактором, то наблюдаемые современные изменения климата связаны, скорее всего, с изменениями в режиме перераспределения тепла на поверхности Земли.

2. Существенно, что в тепловой машине планеты утилизируется не весь поток проходящей энергии; значительная ее часть отражается обратно в космос с помощью эффективной системы обратных связей, когда поверхность планеты и облачный слой, меняя альбедо, работают в режиме саморегулирующегося радиатора. В результате этих процессов амплитуда колебаний климата никогда не была настолько большой, чтобы существенно изменить параметры гомеостаза системы. По-видимому, это связано с оптимальным количеством «рабочего тела» планетной тепловой машины – воды, находящейся в трех фазовых состояниях.

3. Основные механизмы стабилизации климата на Земле связаны, прежде всего, с водой и ее фазовыми переходами. Как правило, изменения температуры на Земле считают следствием вариаций концентрации углекислого газа и метана. По-видимому, в действительности основной вклад в парниковый эффект вносит водяной пар, концентрация которого в атмосфере на два порядка превышает концентрацию двуокиси углерода и способна меняться в широких пределах вследствие испарения, конденсации, замерзания, таяния и горизонтального переноса. Роль мощного стабилизатора температуры играет мировой океан. Динамика воды воздействует на локальное альбедо отдельных территорий и глобальное альбедо планеты. Основной вклад в этот эффективный компенсационный механизм вносят облакообразование, формирование снеговых покровов и ледников, и обратные им процессы, т.е. явления, связанные с влиянием «активной воды», – части мировых запасов воды, участвующей в фазовых переходах и горизонтальном переносе океаническими и атмосферными течениями. Вариации альбедо формируют механизм сильной отрицательной обратной связи, реагирующей на изменения температуры, порождаемые внешними факторами – локальными и глобальными вариациями потока солнечной радиации. Последние связаны с наклоном оси вращения Земли к эклиптике, эллиптичностью орбиты, а также гипотетическими флуктуациями энерговыделения Солнца.

4. Обсуждаемые механизмы стабилизации климата действуют в чрезвычайно тонком (по сравнению с радиусом планеты) слое, который можно назвать «климатическим слоем Земли». Он включает в себя верхнюю часть земной коры, где присутствуют подземные воды, поверхностные слои океана, где отмечаются суточные колебания температуры, а также нижнюю часть тропосферы до высоты примерно 2.5 км (где также отмечаются суточные колебания температуры). Данное положение не отрицает необходимости учета вклада более высоких слоев атмосферы, однако влияние последних оказывается несущественным по сравнению с вкладом процессов в климатическом слое.

5. К факторам, влияющим на альбедо Земли, необходимо добавить изменения в биосфере. Биота определяет альбедо подстилающей поверхности почти на всей суше и, отчасти, альбедо океана (через вариации свойств планктона). Она вносит вклад в регуляцию состояния воды в климатическом слое (влияя на процессы влагосодержания почвы, испарения и облакообразования). Важным свойством биоты являются ее способность быстро реагировать на изменения в среде (в первую очередь, на вариации температуры и влажности) и подстраиваться под эти изменения, влияя на альбедо поверхности, а значит, и на температуру. Этот фактор редко учитывается в климатических моделях, тогда как изменения характеристик биоты могут существенно (на первые десятки процентов) менять альбедо локальных участков суши Земли. Антропогенный фактор можно рассматривать как составную часть глобального биотического фактора.

6. Указанные факторы, проявляющие себя, как система обратных связей в тепловой машине Земли, различаются по степени инерционности (их характерные времена варьируют от десятков минут до десятков и даже сотен лет). Суперпозиция действий этих факторов генерирует набор характерных времен, позволяющих механизму обратной связи возвращать систему в первоначальное положение. В результате климат Земли оказывается принципиально непостоянным: набор обратных связей с разной инерционностью должен приводить к тому, что «запаздывающее» влияние долгодействующей обратной связи превращается в новое возмущение. Это неизбежно приводит к генерации колебательных режимов с различными периодами и даже к появлению аперiodических возмущений. В результате климат никогда не был и не будет одинаковым (флуктуации с разными периодами существовали и будут существовать всегда). С другой стороны, высокая эффективность системы обратных связей обеспечивает сохранение состояния тепловой машины Земли в среднем.

Эти рассуждения приводят к важному выводу: даже в случае полностью неизменных внешних условий (стационарность потока солнечного тепла, параметров орбиты Земли и др.) характеристики климата Земли должны меняться со временем.

7. Концепция водяного альbedo-механизма термостабилизации в климатическом слое Земли не отвергает существования дополнительных внешних воздействий на систему. К внешним воздействиям можно отнести все типы процессов за пределами климатического слоя – явления в верхней атмосфере и за ее пределами, включая импактные события, вариации солнечной активности, изменения параметров вращения Земли и ее орбиты (циклы Миланковича), а также явления в литосфере и глубже (вулканизм, вариации геомагнитного поля и т.д.). По-видимому, соотношение вкладов внутренних и внешних изменений в системе было различным на разных этапах формирования планеты. Можно предположить, что в настоящее время внешние факторы не играют определяющей роли в непрерывных климатических изменениях на Земле. На это указывают прямые измерения потока солнечной радиации на орбите, ведущиеся на протяжении почти четырех десятилетий. Наблюдаемые изменения климата, скорее всего, связаны с перераспределением тепла на поверхности Земли. Большую роль в этих процессах, как будет показано ниже, играет динамика полярных ледников.

Тепловой режим планеты

Тепловой режим поверхности планеты определяется неравномерным притоком солнечной радиации: экваториальные широты систематически получают тепла больше, чем высокие широты. Из-за наклона оси вращения Земли на $23^{\circ},44$ относительно нормали к плоскости ее орбиты, значительные площади (~ 42 млн. км² поверхности на полярных широтах, что составляет около 4% поверхности планеты) в течение почти четырех месяцев в году остаются в тени. Отопление этих территорий в этот период осуществляется исключительно за счет притока теплого воздуха с низких широт, а также действия теплых океанических течений.

Существует расхожее выражение «Арктика – кухня погоды», отражающее значимую роль полярных ледников в формировании и изменениях климата Земли. Полярные районы северного и южного полушарий получают гораздо меньше тепла в виде прямой солнечной радиации, чем низкоширотные области. Состояние полярных ледников зависит от притока тепла и влаги с низких широт на территорию расположения ледника. На рис. 1 жирной линией показано распределение энергии поглощенного коротковолнового излучения Солнца в разных широтных поясах Земли; тонкая линия отражает широтное распределение длинноволнового излучения поверхности. Важным является тот факт, что в широтной зоне от 40° ю. ш. до 35° с. ш. Земля получает больше энергии, чем излучает, тогда как на более высоких широтах излучение превышает поступление. Недостающее тепло к полюсам переносят атмосферные и океанические течения с низких широт (вклад этих двух агентов примерно сопоставим).

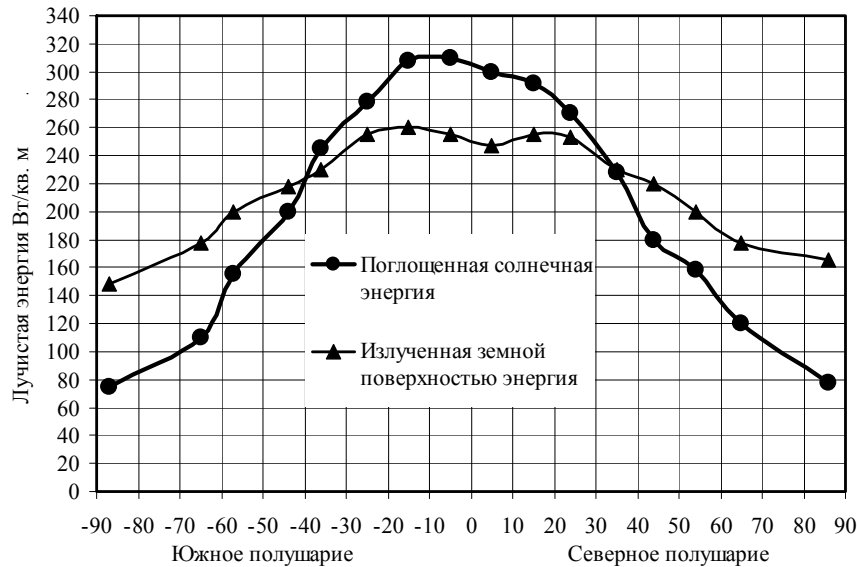


Рис. 1. Распределение энергии поглощенного коротковолнового излучения Солнца и длинноволнового излучения поверхности земного шара на разных широтах

На границах указанного выше интервала широт имеет место лучистое равновесие. Эти границы, если не принимать во внимание иные источники и стоки энергии, разделяют земную поверхность на *энергодефицитные* и *энергоизбыточные* зоны.

В энергодефицитных полярных зонах охлаждение подстилающей поверхности на суше приводит к ее промораживанию и образованию вечной мерзлоты, а дальнейшее накопление влаги в этих зонах – к ее конденсации, замерзанию и, в конечном итоге, к образованию ледников. Таким образом, энергодефицитные полярные зоны являются потенциальными накопителями льда.

Если подстилающей поверхностью в указанной зоне является вода, то она также подвергается замораживанию, и образование льда происходит, при прочих равных условиях, быстрее. Однако для формирования ледника и промерзания водоема до дна водообмен здесь должен быть замкнутым, или, по крайней мере, затрудненным.

Как показано выше, помимо притока энергии с потоком солнечной радиации, происходит и горизонтальный перенос тепла. «Избыточная» энергия, поглощенная атмосферой и океаном в широтном поясе от 40° ю. ш. до 35° с. ш., переносится на территорию дефицита энергии, восполняя недостаток последней. При этом атмосферные потоки беспрепятственно перемещаются по всей поверхности планеты с относительно высокими скоростями, тогда как океанические течения зависят от конфигурации континентов. Отметим, что атмосферные и океанические течения не могут полностью компенсировать дефицит притока лучистой энергии в полярные зоны обоих полушарий. При этом ситуация оказывается асимметричной: в северном полушарии из-за наличия материков с большей площадью и сложной конфигурацией, препятствующих развитию зональных океаниче-

ских течений, ситуация с покрытием дефицита энергии оказывается значительно менее благоприятной, чем в южном полушарии.

Формирование полярных ледовых щитов

Оценим результирующую (с учетом горизонтального переноса тепла) широту границы зоны дефицита энергии, исходя из широтного распределения среднегодовой приземной температуры вдоль меридиана 30° в. д., показанного на рис. 2. Меридиан 30° в. д. проходит в зоне максимальных контрастов температуры. На рисунке представлены средние годовые значения температуры за два периода – с 1948 по 1980 годы и с 1980 по 2013 годы за зимний и летний сезоны (по три месяца) северного полушария (обозначения линий показано на рисунке). В южном полушарии теплые и холодные сезоны повторяются в противофазе. Особенности широтного распределения температуры за два последовательных периода является наличие повышения температуры в зимний сезон (относительно северного полушария) в обоих полушариях на широтах выше 60° .

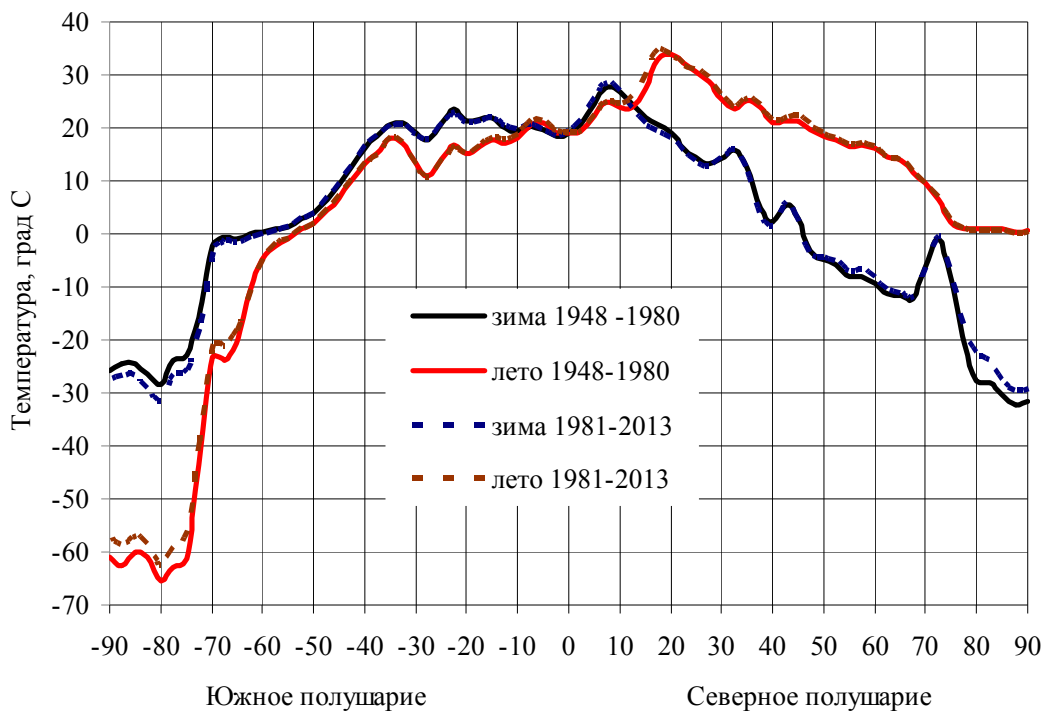


Рис. 2. Распределение среднегодовой приземной температуры воздуха по земному шару вдоль меридиана 30° в. д.

В южном полушарии средняя температура за три месяца теплого сезона опускается ниже нуля $^\circ\text{C}$ на широте около 65° ю. ш. Выше этой широты в зоне энергетического «дефицита» складываются необходимые условия для устойчивого льдообразования. Следует заметить, что в эту зону тепло приносится не только атмосферными потоками, но и океаническими течениями. Однако, тенденция к повышению температуры, наблюдаемая в

оба периода, свидетельствует о смещении изотермы нулевых значений температуры в более высокие широты. Процесс идет за счет увеличения температуры атмосферных и океанических потоков из экваториальных широт. С точки зрения авторов, рост температуры на экваторе, как воздуха, так и воды, при неизменных внешних условиях может осуществляться благодаря постепенному уменьшению расхода тепла на таяние ледников северного полушария.

В летний сезон (три месяца) в северном полушарии, как следует из рис. 2, температура приземного слоя атмосферы не опускается ниже нуля. Это означает, что за рассматриваемые 60 лет здесь не создавались условия для устойчивого накопления плавучих льдов. Логично предполагать, что причиной изменения теплового режима в этой части северного полушария является значительные (по-видимому, необратимые) разрушения плавучей части арктического ледника.

При сокращении объемов оставшейся части плавающих и сухопутных ледников, а также вечной мерзлоты в высоких широтах северного полушария, уменьшаются и затраты тепла на таяние. **Воздух и океаническая вода, поступающие из низких широт в высокие, при прочих равных условиях, в настоящее время охлаждаются меньше, чем ранее.** В результате температура термодинамического равновесия всей системы повышается. Процесс разрушения северного полярного ледника осуществляется под воздействием атмосферного и океанического переноса тепла из низких широт в полярные. Именно по этой причине, согласно гипотезе авторов, происходит наблюдаемый в настоящее время процесс роста температуры приземного слоя Земли.

Этот процесс, благодаря обменным течениям в атмосфере и океане, хотя и в разной степени, охватывает оба полушария и фактически носит глобальный характер. По оценкам изменений температуры приземного слоя, выполненным по данным архива NCEP/NCAR Reanalysis за период 1948–2013 гг., затраты тепла в полярной зоне северного полушария уменьшились в отдельные годы на 9 Вт/м^2 , в экваториальной части – на 3 Вт/м^2 . В южной полярной зоне соответствующие затраты, наоборот, возросли, хотя и незначительно. Эффект охлаждения мирового океана, показанный на рис. 3, снизился – в северном полушарии на 4 Вт/м^2 , в южном полушарии – меньше (на 1 Вт/м^2). В полярной зоне выше 65° южной широты океан продолжает охлаждаться за счет увеличения площади тающих плавучих ледников.

Многочисленные исследования хронологических изменений температуры в разных широтных поясах показывают устойчивый рост температуры приземного слоя воздуха и поверхностного слоя мирового океана. Наблюдения подтверждают факт уменьшение расхода тепла в северном полушарии и повышение температуры нижних слоев атмосферы и верхних слоев океана в обоих полушариях.

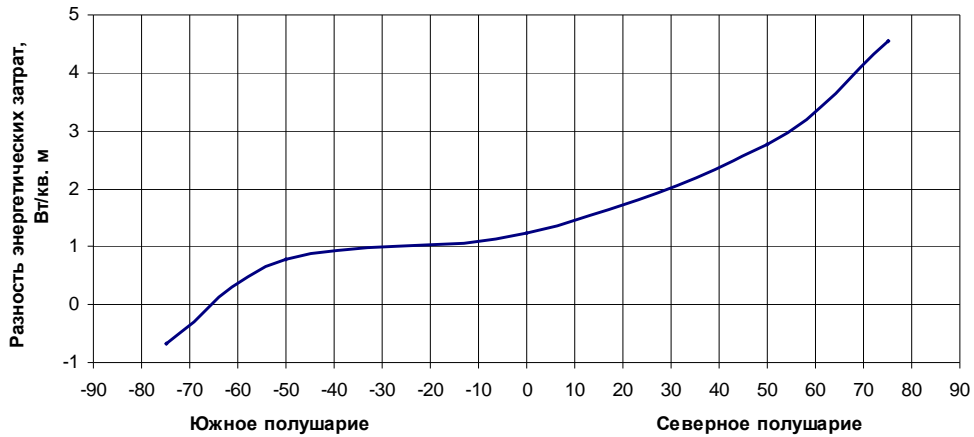


Рис. 3. Энергетические затраты, расходуемые на потепление мирового океана.

Указанная гипотеза предполагает, что вблизи северного полюса «было чему таять», т.е. раньше здесь находился мощный ледовый щит. Сформулируем условия для образования ледников на нашей планете.

Благоприятные энергетические условия образования ледников складываются за пределами широтного интервала 40° ю. ш. до 35° с. ш., в энергодефицитных зонах. При этом ледники могут образовываться только на территориях, изолированных от океанических течений.

Тепловые атмосферные потоки существенно уменьшают зоны дефицита энергии, смещая их границы к полюсам. Можно оценить широту результирующей зоны дефицита энергии, исходя из распределения среднегодовой приземной температуры, показанного на рис. 3. В южном полушарии среднегодовая нулевая изотерма проходит на широте около $56\text{--}57^\circ$. Выше этой широты начинается зона энергетического дефицита и складываются условия, необходимые для устойчивого льдообразования. Следует заметить, что в эту зону тепло приносится не только атмосферными потоками, но частично океаническими течениями, в отличие от северного полушария.

Картина, аналогичная описанной, имеет место и в северном полушарии, однако здесь нулевая изотерма проходит вблизи широты 60° . Зона дефицита энергии смещена к полюсу гораздо дальше потому, что в акваторию Северного Ледовитого океана водными течениями поставляется тепло из Атлантического и Тихого океанов.

Что позволило в прошлом существовать гипотетическому северному леднику? При современном режиме поглощения и излучения лучистой энергии, который, видимо, существенно не менялся на протяжении последних десятков миллионов лет, ледники на земном шаре могли первоначально сформироваться и увеличиваться только на крупных участках суши или на группах островов, расположенных в полярных областях (энергодефицитных зонах). Увеличиваясь по объему и площади, они должны были

оказывать охлаждающее действие на климат высоких и частично умеренных широт, что способствовало дальнейшему росту ледников.

Условия питания атмосферной влагой были более благоприятны для северного полярного ледника, по сравнению с южным, по двум причинам. Во-первых, тепловой экватор Земли не совпадает с географическим и находится на 10° с. ш. Это означает, что прогрев подстилающей поверхности в летние месяцы, а соответственно, и испарение влаги в северном полушарии происходят более интенсивно. Во-вторых, западно-восточный перенос в средней и верхней тропосфере, который блокирует проникновение влажных и теплых атмосферных потоков к высоким широтам обоих полушарий, в южном полушарии является более выраженным, чем в северном, где большие участки суши со сложным рельефом оказывают тормозящее действие на воздушные потоки. Указанные причины, несомненно, повлияли и на скорость роста ледников, которая должна быть выше в северном полушарии. Еще раз укажем, что скорость роста Антарктического ледового щита замедлялась притоком тепла океана, находящегося в непосредственном контакте с ледником.

Согласно предлагаемой гипотезе, **в полярной зоне северного полушария ранее существовала обширная суша (возможно, с замкнутыми промерзшими водоемами), покрытая ледовым щитом, подобно Антарктиде.** Косвенными доказательствами этому является небольшая глубина Северного Ледовитого океана, а также тот факт, что более 70% площади его дна занимают подводные окраины материков, а более 45% указанной площади – шельф. Как указано в работе [7] «...кайнозойская история Арктики похожа на последние стадии эволюции суперконтинента, а сам Северный Ледовитый океан является практически внутриконтинентальным осадочным бассейном».

Еще одно отличие от Антарктиды, по-видимому, заключалось в отсутствии здесь крупных высокогорий, а значит, толщина коры здесь была меньше характерных значений для горных стран. В то же время даже небольшие горные вершины должны были обрастать ледниками с момента своего образования, являясь основой для развития полярных ледников.

Лед должен был накапливаться здесь, благодаря осадкам, как в холодное, так и в теплое время. За продолжительное время полярные ледники разрастались как по высоте, так и по горизонтали. Следует отметить, что скорость прироста толщины ледника определяется двумя факторами: уменьшением концентрации водяного пара с высотой и скоростью сублимации. По горизонтали разрастание ограничено кромкой устойчивого снежного покрова, которая определяется притоком солнечной радиации и адвекцией тепла в высокие широты. Арктический полярный щит рос по высоте и, расширяясь, эффективно продвигался по суше в южном направлении. В принципе, он мог достичь 35 параллели (широты лучистого равновесия), его источники питания находились почти на уровне океана; при

большей высоте подстилающей поверхности пониженная температура могла позволить ему продвинуться на отдельных участках суши (языками) гораздо южнее. Его охлаждающее действие, безусловно, должно было повлиять на растительность и животный мир, сказаться на климате этих широт. Отметим, что в описанных энергетических условиях масштабы ледника должны были достичь своего максимума, после чего его дальнейшая экспансия на юг стала невозможной.

По мере разрастания полярных ледников увеличивалось и альbedo поверхности, следовательно, в полярных областях уменьшался летний приток солнечной радиации, климат здесь становился еще более холодным.

Если полагать, что приток солнечной радиации в низких широтах существенно не изменялся (нет данных, указывающих на то, что режим энерговыделения Солнца заметно флуктуировал), охлаждение полярных зон означало, что разность температур между экватором и полюсами должна была нарастать. Увеличение горизонтальных разностей температуры воздуха приводит к усилению западно-восточного переноса в средней и верхней тропосфере, который является блокирующим элементом в механизме переноса тепла из экваториальных областей в полярные. Так складывалась ситуация с положительной обратной связью. Чем больше становилась разность температур экваториальных и полярных областей, тем существеннее нарастала скорость западно-восточного воздушного переноса благодаря действию силы Кориолиса, а значит, тем меньше тепла проникало из экваториальных областей в полярные. Процессы оледенения в конечном итоге достигли своего максимума. Сухопутные льды в северном полушарии продвинулись в средние широты, и только здесь их остановили большой приток солнечной радиации и обогревающее действие теплого воздуха, переносимого из низких широт.

Таяние полярных ледников и глобальное потепление

Постепенно, с увеличением массы полярных щитов, неизбежно должны были начаться процессы проседания земной коры, причем общая масса ледника при этом продолжала нарастать.

Вследствие более интенсивного накопления полярного льда в северном полушарии, деформация тонкой (океанического типа) земной коры под ледником должна была начаться значительно раньше, чем аналогичный процесс в южном полярном леднике. В результате низменные равнины высокоширотной территории суши северного полушария оказались ниже уровня океана. Просевшее основание ледника начало на некоторых участках омываться теплыми водами Атлантики и Тихого океана. Периферия полярного ледника, попав под действие теплых океанических вод, начала таять, обеспечивая нарастающий доступ тепла к основному телу северного полярного щита. С этого момента началось его разрушение и, как следствие, потепление в средних и высоких широтах. Согласно [2, 3], воз-

никновение покрытого льдами Северного Ледовитого океана произошло 53 млн. лет назад. На протяжении последующего периода огромная масса льда постепенно таяла, а площадь соприкосновения льдов с теплой водой океана росла. Тонкие (порядка первых метров) плавающие остатки некогда гигантского ледяного щита, несмотря на флуктуации, постепенно исчезают на наших глазах. Можно с высокой степенью вероятности утверждать, что мы являемся свидетелями завершающей фазы разрушения северного полярного ледника, которая продлится достаточно долго, – пока не освободятся от вечного льда и не зазеленеют низменные территории Гренландии.

Масштабы ныне не существующего Арктического ледового щита можно представить, сопоставляя размеры гигантского ледника Гренландии (площадь около 2 млн. км²), с нынешней площадью Северного Ледовитого океана (около 15 млн. км²).

Аналогом исчезнувшего Арктического ледового щита является в наше время Антарктический ледовый щит, занимающий огромную территорию в 13.66 млн. км² из 15 млн. км² общей площади Антарктиды. Судя по радиолокационным измерениям, выполненным НАСА, средняя толщина этого покрова равна почти 2,2 км, максимальная толщина превышает 4,7 км, а общий объем антарктического льда близок к 26–27 млн. км³, что составляет около 90% объема всех природных льдов планеты. При современных темпах притока атмосферной влаги в регион ледника, для накопления указанного объема необходим период в сотни тысяч, а возможно и миллионы лет. Согласно В.М. Котлякову [8], ледниковый покров Антарктиды образовался не позднее, чем 5 миллионов лет назад (более вероятно, 30–35 миллионов лет назад). Согласно геофизическим исследованиям, в процессе увеличения Антарктического ледового щита континентальное основание просело в среднем на 500 м, на что указывает его относительно глубоко расположенный шельф, – аналогично тому, что ранее произошло и в северном полушарии. Доступ океанической воды к низменным территориям Антарктиды со временем будет нарастать, объем льда сокращаться и потепление (нулевая изотерма) будет постепенно продвигаться к южному полюсу.

Судя по данным НАСА, к настоящему времени площадь Антарктического ледового щита увеличилась до рекордной отметки 19,3 млн. км². Однако общий объем ледника снизился и продолжает уменьшаться. Основные потери связаны не с таянием тела ледника, толщина которого продолжает расти, а с откалыванием айсбергов.

Описанная схема представляет собой тепловую колебательную систему, с чередующимися периодами похолодания и потепления. По-видимому, освобождение полярных областей ото льда может привести к подъему океанического дна и увеличению площади полярных островов, которые могут стать основой для нового оледенения. К тем же последствиям могут привести и тектонические процессы. Соответствующие периоды могут

иметь существенные различия по продолжительности. В частности, можно указать, что период накопления полярных льдов до времени просадки земной коры и доступа океана к этой территории (т.е. до начала таяния) никак не связан с периодом его таяния.

Следует также отметить, что условия формирования (накопления массы) северного и южного ледников были различны, соответственно условия таяния также не одинаковы. Поэтому продолжительность «жизни» южного ледника лишь в незначительной степени зависит от общей динамики северного ледника. Можно предположить, что вариации температуры на планете в результате взаимодействия двух полярных источников являются связанными и представляют собой некую суперпозицию колебаний.

На этом основании можно сделать ориентировочный прогноз изменения температуры в будущем. На рис. 4 показано изменение средней годовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы Арктики и Антарктики за 50 лет на широтах 60° . Средняя годовая температура приземного слоя воздуха в северном полушарии превысила нулевую отметку вблизи 1997 г. В Антарктике на широте 60° температура приземного слоя атмосферы достигнет нулевого значения примерно через 500 лет (при условии, что будет повышаться такими же темпами, как это происходит за последние 50 лет). Это свидетельствует в пользу медленных колебаний в системе природных процессов, обусловленных устойчивыми отрицательными обратными связями.

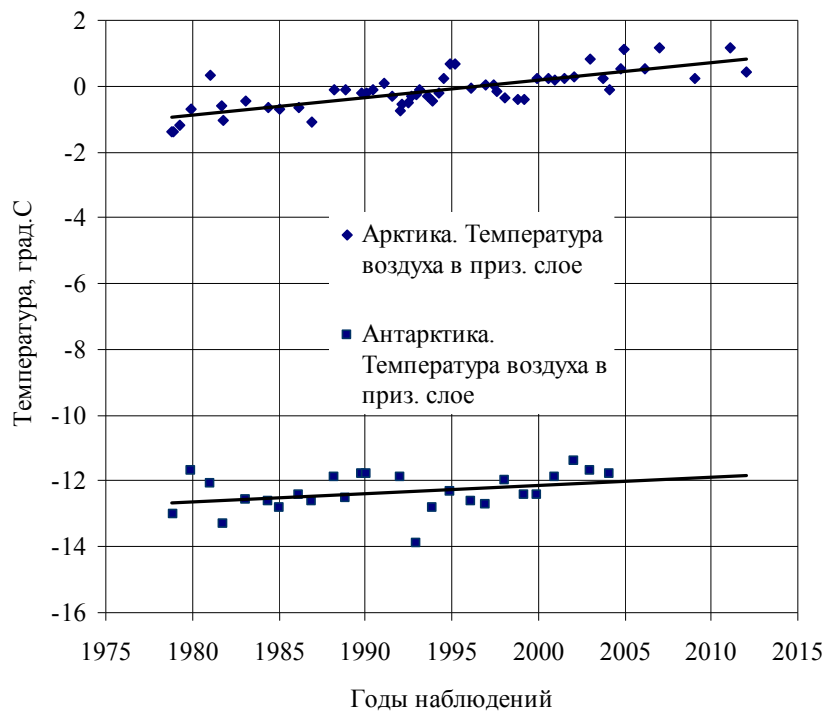


Рис. 4. Изменение средней годовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы в Арктике и Антарктике на широтах 60° .

На рис. 5 показано, с использованием реконструкций, распределение средней годовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы по широтам в разные исторические периоды. Из рис. 5 следует, что в широтной 50° зоне температура на протяжении достаточно длинного периода (~ 165 млн. лет) изменялась в пределах 25–33°C. Это указывает на устойчивость климатообразующих факторов, и прежде всего на стабильный приток солнечной радиации, следовательно, не на катастрофические климатические изменения.

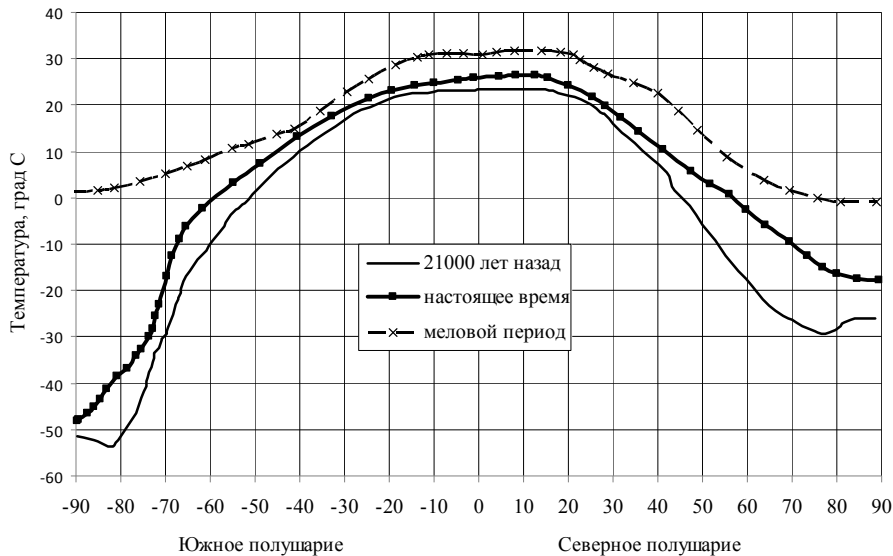


Рис. 5. Распределение средней годовой температуры воздуха в приземном слое атмосферы по широтам в разные исторические периоды.

Согласно имеющимся астрономическим данным, по крайней мере, за последние 130 млн. лет, на Земле не происходили катастрофические события, которые могли бы существенно изменить тепловой режим планеты. На этом основании считается, что параметры орбиты Земли относительно Солнца оставались и остаются неизменными в течение, по крайней мере, указанного периода времени.

С другой стороны, существенные изменения температуры в истории Земли имели место в высоких широтах выше 60 параллели. Отметим, что южный полярный регион по температуре резко отличается (судя по рис. 5) от северного только в широтной зоне выше 70 параллели. Разница температур возникает, вероятно, из-за различий в высоте рельефа над уровнем океана.

Особенно интересным является факт повышенной температуры в полярных широтах обоих полушарий в меловой период. Следуя логике горизонтального переноса тепла атмосферой и океаном, можно полагать, что в указанное время на полюсах отсутствовала суша, следовательно, не могли образовываться «вечные» полярные ледники. Тепловых потоков атмосферы и океана было достаточно, чтобы поддерживать там примерно такую

же среднюю годовую температуру, которая наблюдается в настоящее время на широтах 50–60° в обоих полушариях.

На низких широтах температура превышала современную на 4–6 градусов. В будущем, при полном разрушении полярных ледников, возможно повторение ситуации, близкой по климатическим условиям к меловому периоду истории Земли, при условии стабильности основных климатообразующих факторов. Более 20 тысяч лет назад, когда северный и южный ледники имели значительно большую массу, чем сейчас, температура, как это следует из рис. 6, была ниже современной в средних и полярных широтах на 10–15 градусов, и на 2–4 градуса ниже, чем на экваторе. Этот факт свидетельствует о том, что глобальные изменения климата – процесс длительный. На этот фоновый процесс могут накладываться быстропеременные факторы, однако основная тенденция изменения климата, показанная выше, с высокой вероятностью будет определять климат в долгосрочной перспективе.

Работа поддержана государственным заданием в сфере научной деятельности (проектная часть) № 3.615.2014/К в части систематизации научных результатов.

Литература

1. *Башкирцев В.С., Г.П. Машнич* Солнце и климат Земли / Циклы активности на Солнце и звездах. – СПб, Изд-во ВВМ, 2009, С. 235–240.
2. *Грамберг И.С.* Сравнительная геология и минерагения океанов и их континентальных окраин с позиции стадийного развития океанов // Геотектоника. 2001. № 6. С. 3–19.
3. *Глебовский В.Ю. и др.* История формирования Евразийского бассейна Северного Ледовитого океана по результатам геоисторического анализа аномального магнитного поля // Геотектоника. 2006. № 4. С. 21–42.
4. *Коваadlo П.Г.* К вопросу о собственных климатических циклах Земли / П.Г. Коваadlo, О.С. Кочеткова, С.А. Язев // Избранные проблемы астрономии : материалы III Всерос. астроном. конф. «Небо и Земля», посвящ. 80-летию астрономической обсерватории ИГУ, Иркутск, 22-24 ноября 2011 г. / [науч. ред. С.А. Язев].– Иркутск: Изд-во ИГУ, 2011. С. 273–278.
5. *Коваadlo П.Г., О.С. Кочеткова, С.А. Язев.* Возможные условия формирования цикличности климата // Всероссийская конференция «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений» Тезисы докладов. – Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2012. С. 9–10.
6. *Коваadlo П.Г., С.А. Язев.* К вопросу о механизмах стабилизации климата Земли // Региональный отклик окружающей среды на глобальные изменения в Северо-Восточной и Центральной Азии / Материалы Международной научной конференции (г. Иркутск, 17–21 сентября 2012 г.) – Иркутск: Изд-во Института географии им В.Б. Сочавы СО РАН. 2012. Т.1. С. 24–26.
7. *Коваленко В.И., В.В. Ярмолюк В.В., О.А. Богатиков.* Новейший вулканизм и его связь с процессами межплитного литосферного взаимодействия и глубинной геодинамикой // Экстремальные природные явления и катастрофы: в 2 томах. М., ИФЗ РАН. 2010. С.145–162.

8. *Котляков В.М.* Соотношение естественных и антропогенных причин глобальных изменений климата // *Земля и Вселенная*. 2010. № 5. С. 48–66.
9. *Язев С.А.* Лекции о Солнечной системе – СПб.: Лань. – 2011. – 384 с.
10. *Almeida J. et al.* Molecular understanding of sulphuric acid-amine particle nucleation in the atmosphere / doi.10.1038/nature12663
11. *Duplissy J et al.* Results from CERN pilot CLOUD experiment // *Atmos. Chem. Phys.* 2010. V.10. P. 1635–1647.
12. *Jager de C.* Quantifying and specifying the solar influence on terrestrial surface temperature / C. de Jager, S. Duhau, B. van Geel // *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*. 2010. V. 72. P. 926–937.
13. *Kirkby at al.* Role of sulphuric acid, ammonia and galactic cosmic rays in atmospheric aerosol nucleation / doi:10.1038/nature10343
14. *Zhang J.* Increasing Antarctic Sea Ice under Warming Atmospheric and Oceanic Conditions // *Journal of Climate*. 1 June. 2007. V. 20. P. 2515–2529.

POLAR ICE AND CLIMATE OF THE EARTH

Kovadlo P.G. and Yazev S.A.

Irkutsk State University, Institute of Solar-Terrestrial Physics SD RAS, Irkutsk, Russia

The hypothesis to explain observed warming climate is proposed. It is assumed that land existed in the past at the site of the Arctic Ocean, which sagged under the weight of the Arctic ice sheet. As a result of the lowering land ocean began to wash the glacier, this led to its melting. Nowadays, the final stage of the process is observed. Melting outer Polar Regions of the Northern Hemisphere ice is the main cause of the observed warming. The details of the proposed mechanism and a number of additional effects are discussed.

К СИСТЕМНОМУ И МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОМУ ИЗУЧЕНИЮ СОЛНЕЧНО-ЗЕМНЫХ СВЯЗЕЙ

Смольков Г.Я.¹, Баркин Ю.В.²

¹ФГБНУ ИСЗФ СО РАН, Иркутск, smolkov@iszf.irk.ru

²ГАИШ МГУ, Москва, barkin@inbox.ru

*Есть два вида глупцов.
Одни верят в то, что не является истиной.
Другие отказываются признавать истину.
С. Кьеркегор*

Физика солнечно-земных связей – одна из основных проблем современного естествознания, поскольку эти связи определяют состояние и изменчивость среды обитания и деятельности человечества. Не системное изучение солнечно-земных связей, лишённое объективного учёта всех исходных внешних причин, без междисциплинарного объяснения механизмов их воздействия на Землю, неизбежно приводит к вынужденному отношению необъяснимых процессов и явлений к «природным аномалиям», затрудняет прогноз изменения природной среды. Ещё широко используемые констатация, статистический и корреляционный анализы не сопровождаются должной интерпретацией изучаемого. Наряду с солнечной активностью и потоками галактических космических лучей необходимо учитывать эндогенную активность Земли, обусловленную внешним гравитационным воздействием на нашу планету, в том числе возмущение Солнечной системы в целом извне.

Введение

Физика солнечно-земных связей (СЗС) – одна из основных проблем современного естествознания [1, 2]. Актуальность изучения и объяснения природы СЗС состоит в необходимости предупреждения и минимизации ущербов при использовании современных технологий. СЗС определяют состояние и изменчивость природной среды обитания и деятельности человечества [3, 4]. Их изменчивость обуславливается как исходными (внешними), так и производными (наземными) факторами. К первым до сих пор традиционно относили солнечные иррадиацию, геоэффективные электромагнитное излучение, потоки энергичных частиц и солнечный ветер, а также потоки галактических космических лучей (ГКЛ). Вторые характеризуют эндогенную активность планеты, навязываемую и контролируемую окружающими небесными телами: геодинамические, геодезические и геофизические процессы, такие как возбуждение и относительные смещения оболочек Земли, их деформации, изменения формы, нестабильность скорости суточного вращения Земли и движения ее полюсов, нута-

ция ядра, а также тектоника, сейсмика, процессы дегазации и многие другие [5, 6]. В последнее время активно исследуются последствия антропогенных процессов (пагубное землепользование, выбросы в атмосферу CO₂ и др. вредных веществ и газов). Всё это свидетельствует о сложном многофакторном характере СЗС и необходимости системного и междисциплинарного изучения их проявлений.

К сожалению, современные исследования в науках о Земле так и оставили без ответа вопросы об активности природных процессов и их наблюдаемых пространственно-временных свойствах. Не смотря на многочисленные попытки исследования космического фактора внешнего воздействия на Землю [7–10] и изучения роли гравитационного взаимодействия Земли с Луной, Солнцем и планетами [11]. Все имеющиеся геодинамические модели были не в силах объяснить многие и широко наблюдаемые природные явления. Отсутствовало мотивированное объяснение энергетики планетарных процессов и их цикличности. Лишь в 2002 г. был предложен высокоэффективный механизм возбуждения и вынужденной относительной раскачки и поворотов оболочек Земли (других планет и спутников) под действием гравитационного притяжения окружающих небесных тел [5]. Было показано, что этот механизм является чрезвычайно мощным источником эндогенной активности с ярко-выраженными циклическими проявлениями в различных шкалах времени. Эндогенная энергия планеты (спутника) черпается из гравитационного воздействия со стороны внешних небесных тел, или, в конечном итоге, из энергии поступательно-вращательных движений всех взаимодействующих тел и их оболочек. Энергетика данного механизма позволяет объяснить энергетический бюджет Земли и других активных небесных тел [12]. На основе этого механизма уже получили объяснение с механической и энергетической точек зрения многие геодинамические явления и планетарные геофизические процессы, решены фундаментальные проблемы наук о Земле и планетных наук [13–18]. Получены оценки мощностей диссипации для вязкоупругих деформаций мантии Земли при заданных относительных смещениях центров масс ядра и мантии. Указанные смещения находят отражение в смещениях центра масс Земли, которые доступны для современных наблюдений методами космической геодезии, начиная с 1993 года. Для выявленного по данным наблюдений спектра колебаний определена мощность диссипации упругой энергии мантии для каждого из колебаний по отдельности и интегральный эффект. Показано, что суммарная мощность диссипации характеризуется исключительно гигантским значением около $10^{14} \div 10^{15}$ Вт и является достаточной для объяснения современной эндогенной активности Земли. При этом получает объяснение дискутируемое веками представление о циклических вариациях активности всех планетарных природных процессов [5, 12].

Разработанная количественная геодинамическая модель Земли подтверждается приемлемым соответствием оценок вариаций параметров геодинамических и геофизических процессов с результатами мониторинга природной среды [5–18]. Гравитационное воздействие на Землю как на систему оболочек (в первую очередь на ядро и мантию) со стороны Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения тел Солнечной системы, и движения самой солнечной системы в силовом поле Галактики обуславливает эндогенную активность Земли. Она проявляется эволюционными и спорадическими отклонениями от трендов усреднённых параметров геодинамических процессов, периодическими, глобально асимметричными, нелинейными, происходящими синхронно. Причинами или сопутствующими факторами вековых трендов и спорадических вариаций положения ядра в частности являются процессы плавления и затвердевания, «обвалы» участков подошвы мантии, прогретых под напором ядра или ослабленных асимметрично направлению скачка ядра, под гравитационным воздействием тел солнечной системы на оболочки Земли [19]. Прямым указанием на подобные процессы служит, например, скачок в значении периода свободной нутации жидкого ядра Земли (почти на 5–10%) [20, 21] скачки. Поскольку этот период по теории Пуанкаре обратно пропорционален сжатию полости ядра, то соответственно, такое большое изменение должно испытывать само сжатие. Подобные изменения вполне естественно связать с обрушениями подошвы мантии и со значительными вариациями осевых моментов инерции жидкого ядра.

Важный интерес представляет также изучение факторов воздействия непосредственно на Солнечную систему и основания для этого имеются. Так данные МЗ Вояджер 1 показали обстоятельства взаимодействия Солнечной системы с межзвёздной средой [22, 23]. Сообщение о такого рода внешнем воздействии ак. В.А. Амбарцумяна на заседании Президиума СО АН СССР ещё в 1956 г. [24] подтверждено NASA News в 1999–2013 гг.

Фундаментальные и прикладные исследования СЗС в интересах многих современных отраслей должны выполняться с учётом всего вышеизложенного. Одним из главных направлений наук о Земле в настоящее время признано изучение взаимодействия глубинных геодинамических процессов с явлениями, происходящими во внешних оболочках Земли (литосфере, атмосфере и магнитосфере) [25]. Хотя авторы ограничиваются некоторыми логическими построениями, не прибегая к конкретным численным оценкам динамических эффектов. На этом фоне гораздо выигрышнее смотрится механизм вынужденных смещений и колебаний ядра и мантии Земли [5]. С помощью этого механизма были решены важнейшие проблемы в науках о Земле и планетах [6, 13–18]. Причем многие геодинамические явления получили четкое аналитическое описание, а их геофизические и геодинамические параметры численные оценки в хорошем согласии с данными наблюдений.

Подходы к изучению солнечно-земных связей

В действительности, к большому сожалению, единого (общепризнанного) мнения обо всех исходных факторах и их вкладах в изменения геофизических и геодинамических процессов и явлений (например, в геодинамике, геологии, геодезии, океанологии, климатологии и др.) до сих пор нет. Имеется большая разобщённость изучения природы СЗС специалистами различных профессий, неполный учёт, смешение и даже искажение исходных причин изучаемых вариаций параметров природной среды, попытки их объяснения понятиями лишь своего профессионального направления. В итоге имеют место подходы к изучению СЗС, сходные с «Поверхностным описанием поверхности Земли». А порой и просто-напросто ошибочные подходы, например, при изучении нарастания уровня океана альтиметрическими методами, при интерпретации процессов потепления, роли послеледникового отступления [26–29] и др.

Механизм активизации сейсмической и вулканической деятельности Земли

Землетрясения и извержения вулканов являются наиболее яркими и чувствительными индикаторами современной геодинамической активности Земли. В.Е. Хаин и Э.Н. Халилов [30] объясняют её только качественно, используя установленные корреляционные особенности и предложенный ими принцип причинно-следственной связи различных природных процессов. Однако физический механизм установленных связей авторы фактически не предлагают. Согласно геодинамической концепции [5] на роль подобного механизма подходит механизм вынужденных колебаний ядра и мантии Земли, который позволяет объяснить вековые, циклические и скачкообразные изменения сейсмической и вулканической активности в их единстве со всеми другими природными планетарными процессами на Земле [31, 32]. Активизация сейсмического планетарного процесса связана с накоплением и сбросами упругой энергии в слоях мантии. Активизация вулканического процесса связана с изменениями теплового потока Земли и перераспределениями магматических масс. Но основным источником энергии, управляющим указанными процессами, является подвижное колеблющееся ядро [14].

Климатические изменения и их механизм

Весьма актуальными являются изменения регионального и глобального климата. Наличие глобального потепления, наконец, признано Межправительственной группой экспертов по изменению климата (IPCC) несомненным, но его основной причиной по-прежнему считается парниковый газ, т.е. антропогенный фактор (IPCC Report, 4 April 2014) [33]. Различные ученые в поисках причины потепления перебрали фактически все возможные факторы, порой весьма далекие по своей природе от климатических

изменений. Указываются дрейфы географического и геомагнитного полюсов Земли, вариации вращения Земли и повышение эндогенной, конкретно, вулканической активности Земли. Сравнение роста содержания парниковых газов в атмосфере и вулканической активности Земли может являться косвенным свидетельством существования определённой связи между этими процессами. На основе различных корреляционных методов исследований они ошибочно допускают возможность влияния солнечной активности (радиации) на геодинамические процессы, в частности, на вулканическую и сейсмическую активности [30, с. 417–420]. Авторы признали, что их выводы, безусловно, не являются бесспорными и могут претерпеть дополнения или изменения при проведении дальнейших исследований, а также в результате исследований других учёных [30, с. 434]. Другие авторы обсуждают и пытаются объяснить природные процессы промежуточными эффектами и наземными откликами, не зная всех их первичных причин. Так, в генетической концепции Земли единственно возможное объяснение эндогенной активности Земли и всех планет Солнечной системы и их спутников считается обусловленность водородной дегазацией их жидких ядер [34]. Что является всего лишь одним из процессов в комплексе явлений эндогенной активности, глубинной геодинамики. Имеются и другие не менее экстравагантные гипотезы (некоторые из них см. в обзоре [35], а также гипотезу В.Н. Малинина при рассмотрении причин изменения уровня мирового океана [36]). Среди них: антропогенные изменения в атмосфере, на поверхности Земли и в среде околоземного космоса, проявления собственных колебаний в климатической системе Земли и др. Другие учёные к основным причинам потепления относят и солнечную активность [35, 37]. Считается, что около 97% ученых убеждены в техногенном характере потепления. По результатам исследования, выполненного международной группой ученых, глобальное потепление считается вызванным деятельностью человека [38]. Но несущественная роль CO₂ в изменчивости климата была показана Р.У. Вудом ещё около 100 лет назад. Указывается на важную роль воздействия на климат вековой variability солнечной геомагнитной активности и различных антропогенных источников в их совокупности [39]. Ведущие климатологи США до сих пор называют процесс происходящего глобального потепления «температурной аномалией» [40]. В Роскомгидромете до сих пор используются вероятностные модели для прогноза погоды с их оправдываемостью порядка 60%, отмечены зависимости от многих факторов, одним из них считается явление Эль-Ниньо. Анализ влияния разных факторов на температуру не выявил ни одного явно доминирующего фактора [41]. Для оценки реального количественного вклада, как солнечной активности, так и антропогенных факторов в изменения климата предложено учитывать изменения циркуляции в атмосфере и океане и эффективность энергообмена между океаном и атмосферой [42, 43].

Механизм потепления и инверсионные полярные изменения климата Земли в прошлые и в современную эпохи

В работах Ю.В. Баркина [44–47] обсуждаются и интерпретируются явления инверсии климатических изменений на Земле, их современные проявления на основе механизма вынужденной раскачки ядра и мантии Земли. Вязко-упругие деформации мантии, сопровождающие колебания ядра, управляют интегральным тепловым потоком планеты и управляют его перераспределением между полушариями. Аналогичные явления широко наблюдаются на других телах солнечной системы [13], а явление инверсии активности природных процессов (чередование активности между полушариями) является вернейшим признаком активного действия механизма возбуждения оболочек небесных тел [6, 14]. При этом полушария могут меняться ролями циклически с определенными частотами и периодами (причем в различных шкалах времени) или вековым образом и даже скачкообразно (резкие изменения) [20, 21, 45–47]. Полушария с контрастными изменениями природных процессов не обязательно являются северным и южным, а их ориентация и положение определяется направлениями соответствующих циклических радиальных смещений геоцентра (или относительных смещений ядра и мантии). Здесь речь идет, конечно, о всех природных процессах, а также о физических полях Земли. Но мы кратко остановимся на анализе инверсионных изменений климата на Земле. Подобные инверсионные корреляции в вариациях климата Гренландии и Антарктиды были установлены по данным ледовых кернов для последнего ледникового периода [48]. В результате специальной процедуры по сглаживанию резких скачкообразных вариаций климата в Гренландии авторам удалось выявить планетарное явление инверсионных изменений климата в южном и северном полушариях Земли – «климатические качели». Подобного рода инверсионные климатические изменения в вариациях климата Гренландии и Антарктиды были обнаружены как в фанерозое, так и в сравнительно короткой шкале времени современной эпохи [47, 48].

О циклах оледенений и потеплений Земли

В работах Ю.В. Баркина [44, 47] был предложен механизм и описан сценарий формирования оледенений и потеплений Земли и их инверсионных и асимметричных проявлений. Эти планетарные тепловые процессы связаны с гравитационными вынужденными колебаниями системы ядро-мантия Земли, контролирующими и направляющими подачу тепла в верхние слои мантии и на поверхность Земли. Действие этого механизма должно проявляться в различных шкалах времени. В частности значительные изменения климата должны происходить с периодами в десятки и сотни тысяч лет. При этом возбуждение системы ядро-мантия обуславливается планетными вековыми орбитальными возмущениями и возмущениями

вращения Земли, которые, как известно, характеризуются значительными амплитудами. Но и в короткой шкале времени вариации климата с межгодовыми и декадными периодами также должны наблюдаться, как динамические следствия раскачки системы ядро-мантия Земли с теми же периодами. Колебания ядра и мантии приводят к вязко-упругим деформациям всех слоев мантии, к циклическим выделениям тепла и к формированию переменного теплового потока, оказывающего воздействие на активность океанических, атмосферных и вообще всех синоптических процессов. В конечном итоге ядро самым активным образом участвует в формировании и изменениях климата планеты, как глобального, так и в северном и южном полушариях планеты [12]. Однако колебаниями и смещениями ядра управляют Луна, Солнце и планеты.

Природа и механизм солнечно-земных и солнечно-планетных связей

В этом проявляется родство и семейственность, взаимосвязь всех тел солнечной системы, общность стилей вариаций и синхронность их природных процессов. Системы оболочек Солнца и планет также испытывают возбуждение, причем синхронно, под гравитационным воздействием со стороны всех членов солнечной системы. Это одна из важнейших черт солнечно-земных и вообще солнечно-планетных связей. Сказанное подтверждается, например, тем, что скачки в вариациях природных процессов на Солнце, Луне, Земле, Марсе и других телах солнечной системы произошли синхронно в период 1997–1998 г. [49]. Ядра указанных тел возбудились и оказали гравитационное воздействие на все свои оболочки и природные процессы. Относительные смещения, повороты оболочек и деформации черпают энергию из огромного “котла” энергии поступательно-вращательного движения всех тел Солнечной системы.

Смещения ядра определяют геодинамические и тектонические изменения оболочек Земли (в частности, всех слоев мантии и литосферы) и определяют активность, синхронность и единство, инверсию, скачкообразность и т.п. всех планетарных природных процессов, таких как вулканизм, сейсмическая активность, атмосферные процессы и процессы в океане и др. и, естественно, определяют и направляют тепловой поток Земли, все планетарные климатические изменения [5, 13, 14, 16]. Они являются синхронными с оледенениями, но не являются строго циклическими, а имеют пилообразный, ступенчатый характер [45–47].

Угроза активизации природных процессов для Земли и для северных районов России

Имеющиеся геофизические, геодинамические данные и данные космической геодезии убедительно свидетельствуют о том, что в современную эпоху (последние десятилетия) происходит вековой дрейф ядра в

северном направлении с медленно нарастающей скоростью [15, 50]. Поэтому все природные процессы, развиваясь монотонно и циклически, активизируются с лидирующей ролью их вариаций в северном полушарии и более того в северных районах России.

Этот процесс может продолжаться в ближайшие десятилетия и столетия, что таит в себе большую угрозу для цивилизации [47]. Число катастроф и аварий, в том числе на атомных станциях, будет нарастать, климатические условия будут все более жесткими и трудными для биосферы в целом. Проблема и трудность положения заключается в том, что указанные геодинамические явления не зависят и не могут зависеть от воли человека. От человека зависит лишь – не создавать дополнительные риски и трудности для жизни на Земле. Именно Россия в наибольшей степени подвержена действию обсуждаемых механизмов направленных климатических изменений на планете. Центр масс Земли, а по нашей модели и центр масс ядра Земли, смещается к полуострову Таймыр [15]. Следовательно, северные районы Сибири (и всей России) подвергаются наиболее интенсивным воздействиям гравитационным с стороны ядра, что в конечном итоге приводит к активным климатическим изменениям и общему потеплению в этих северных районах по сравнению с любыми другими районами планеты. Эти медленные изменения и другие геодинамические и геофизические следствия динамики вынужденной относительной динамики оболочек Земли могут играть важную роль в экономике страны и должны учитываться в будущих планах ее развития [47].

О роли солнечной радиации

Если следовать традиционным взглядам на природу СЗС, то можно отметить, что вклад солнечной радиации (СА), с чем прежде всего соотносят геофизические вариации, например, климата, сильно зависит от временного интервала в связи с дифференциальным характером солнечно-земных связей на разных временных масштабах. Оказывается, радиация не является единственным и определяющим фактором: в интервалах до 25 лет – вклад СА менее 2%, на протяжении десятков лет – область роста вклада СА, а порядка 100 лет – вклад до 30–40%, и на 1000-летней шкале средний вклад СА в дисперсию температурных изменений составляет порядка 20% [51]; а на большей временной шкале предполагаются уже космофизические факторы [7, 8, 52]. Следовательно, воздействием СА возможно объяснить действительно лишь часть изменений климата (но с необходимостью установления физических механизмов). Со времени обнаружения неприливных вариаций вращения Земли появилось немало гипотез, направленных на объяснение этих изменений [4, 53]. Среди климатических факторов назывались: движение полюсов Земли, механические воздействия на атмосферу Земли, глобальный водообмен, обмен момента импульса между

мантией и жидким ядром Земли, наконец, гравитационного воздействия [11] по геомодели Ю.В. Баркина.

Стандартные подходы к изучению СЗС, приведенные в качестве наиболее показательных, страдают недостаточной системностью, отсутствием кооперации специалистов необходимых профилей. Неудивительно, что при таком различии мнений об исходных факторах и подходов к изучению СЗС, невозможно представить логически и физически обоснованной их сути, глобальной и региональной пространственно-временной картины, достоверные прогнозы их изменений. Безусловно, это сказывается на научном и экономическом аспектах и без того кризисной современности. Вынужденное отнесение к «природным аномалиям», вследствие невозможности объяснения процессов и явлений, инициирует поиск неучтённого внешнего фактора, чем, как выяснилось, является эндогенная активность Земли, обусловленная внешним гравитационным воздействием [5, 6, 12–14] и др.

Концепция эндогенной активности Земли и созданная на её основе геодинамическая модель планеты [12–14] заслуживают неотложной популяризации и настоятельной рекомендации их учёта в изучении СЗС. Они разработаны в благоприятных информационных условиях, появившихся с выходом человека в ОКП, использованием орбитальных технологий практически глобального мониторинга Земли (метеорологического, геодезического, гравиметрического, сейсмотомаграфического, альтиметрического и др.). Это позволило напрямую и глобально отслеживать изменение формы Земли, поведение геодинамических и геофизических параметров, температурных режимов суши и океанов и др., избежать непроверяемых предположений и др. ограничений. Уже первые исследования на основе новой геодинамической модели подтвердили ее правомочность и эффективность при изучении цикличности и энергетики процессов [12], при объяснении вековых вариаций силы тяжести [15], при объяснение медленных нарастаний уровня океана, как глобального, так и средних уровней океана в северном и южном полушариях [18], скачкообразных изменений активности природных процессов [20, 21], повышенной и контрастной активности полярных регионов планеты [13, 47], вековых и циклических вариаций сейсмической активности [14, 17], при изучении тектоники плит, плем тектоники и суперконтинентальной цикличности в геологии [54] и многих других процессов и явлений в науках о Земле и планетах. Согласно развиваемой концепции оболочки представляют собой систему взаимодействующих небесных тел, возбуждаемую гравитационными силами со стороны внешних небесных тел. Наряду с основными оболочками (ядро, мантия и др.) укажем на возможную динамическую роль тонких оболочек, слоев, неоднородных структур их составляющих. Среди них: линзовидно-слоистая, пластинчато-слоистая, чешуйчато-слоистая и ритмично-слоистая структура оболочек, состоящая из переслаиваний и смены пространствен-

ного простираения самых различных по составу, строению и физико-механическим свойствам слоёв, линз, чешуй [55, с. 259].

Можно констатировать, что Земля находится одновременно под воздействием непрерывно изменяющихся потоков излучения Солнца, солнечного ветра, ГКЛ, а также гравитационных сил со стороны Луны, Солнца и других планет. Поэтому природные процессы, происходящие в оболочках Земли, обуславливаются не только СА и ГКЛ, но и эндогенной активностью планеты, возбуждаемой внешними телами. Гравитационное воздействие на Землю осуществляется как непосредственно каждым, так и корпоративно всеми телами Солнечной системы в процессе её движения относительно барицентра (её центра масс) и в целом под влиянием Галактики. Это воздействие приводит к малым относительным смещениям, поворотам, деформациям и иным изменениям ядра, мантии и других оболочек Земли. Указанные относительные смещения ядра приводят к вариациям её фигуры и, в частности, к формированию «грушевидной» формы [5, 6], [12–14]. Поэтому суть СЗС не ограничивается понятиями, привычными при изучении и учёте космической погоды, обусловленной откликами на СА и потоки ГКЛ.

Эндогенная энергия расходуется циклически, причем в строгой зависимости от особенностей орбитального движения внешних небесных тел. Явление цикличности природных процессов и их инверсия является универсальным и наблюдается во всех шкалах времени от часов до геологических периодов [13]. Короткопериодические и декадные вариации природных процессов диктуются относительными смещениями оболочек Земли под действием гравитационного притяжения Луны, Солнца и планет.

Активность природных процессов обладает свойством планетарной асимметрии. Явление зеркальности или инверсии природных процессов вызвано полярными изменениями напряжённого состояния в противоположных полушариях Земли, определяемых направлением относительного смещения оболочек. Аналогичные явления цикличности, зеркальности и инверсии природных процессов наблюдаются на других планетах и спутниках Солнечной системы [13, 16].

Подтверждения гравитационного воздействия на систему Земля

С позиций геомодели вынужденных колебаний ядра и мантии Земли детально были исследованы скачкообразные изменения активности различных геофизических и геодинамических явлений в работах [20, 56], рассматриваемых как следствия фундаментального явления – скачка центра масс ядра относительно центра масс мантии. В работе [20] указанное явление получило название “галлопирование ядра”. Сам факт подобного галлопирования ядра был выявлен по однонаправленному скачку центра масс Земли, предсказанному и обнаруженному на основе данных спутниковых наблюдений системы DORIS [59]. Скачок центра масс Земли примерно на

20 мм вдоль полярной оси, резкий изгиб на 90° траектории эпицентра центра масс на поверхности Земли, скачок в значении коэффициента второй зональной гармоник J_2 (на $2.5 \cdot 10^{-10}$), скачок в значении силы тяжести на гравиметрической станции в Медичине (на 5.5 микрогалл), скачкообразное повышение среднего глобального уровня океана на 7.2 мм, скачки средних уровней океана в северном и южном полушариях (15 мм, 0 мм) и скачки других природных процессов, произошедшие в 1997–1998 гг. Концепция эндогенной активности Земли и её геодинамическая модель наглядно подтверждены комплексом гелиогеодинамических скачкообразных событий, синхронно происшедших в 1997–1998 гг. [20, 49, 56]. Отмечается систематический характер повторных скачков ядра и природных процессов в другие годы, в частности, в 1986–1987, 2001–2002, 2010–2012 и др. Причем, что особенно важно, скачки природных процессов происходят не только на Земле, но и на Солнце, Луне, Марсе и других телах солнечной системы, причем синхронно [49].

В докладах 2010 г. Международного Комитета по проблемам глобальных изменений геологической среды GEOCHANGE (научных организаций и ученых более чем из тридцати стран) [57] и Глобальной Системы Обнаружения Наводнений (Global Flood Detection System, Experimental system aiming at providing alerts for flood disasters) были отмечены указанные скачкообразные изменения ряда природных процессов, а также добавлены некоторые новые (Халилов, 2010) [57]. По совокупности эти синхронно происшедшие изменения природных условий авторами были названы глобальным «энергетическим скачком» процессов во всех слоях Земли – литосфере, гидросфере, атмосфере и магнитосфере. Начало глобального «энергетического скачка» авторы соотносят с 1998 г. Также допускается гипотеза, что скачок мог бы быть обусловлен воздействием на Солнечную систему в целом извне. В этой связи упоминается даже взрыв 23.02.1987 г. сверхновой звезды SN1987A в Большом Магеллановом Облаке (спутнике нашей Галактики). Однако авторы даже не обсуждают возможный физический механизм возбуждения Солнца и планет в Солнечной системе.

Наш механизм вынужденных колебаний и смещений оболочек Солнца, планет и спутников под гравитационным воздействием всех тел солнечной системы [5, 6] позволяет дать подобное объяснение. И, в частности, интерпретировать явление синхронности скачков на различных телах солнечной системы [49]. Вследствие небесно-механического взаимодействия тел солнечной системы оболочек Солнца, планет и спутников возбуждаются синхронно, что находит отражение в синхронных вариациях их природных процессов. В результате получают определенную интерпретацию скачкообразное изменение среднего радиуса Солнца, амплитуды солнечного излучения [49, 60], скорости распространения КВМ и долготное распределение всех эруптивных протуберанцев в микроволновом излучении (Рис. 1) [61], образование солнечных пятен (Рис. 2) [62].

Вспышки нейтринного излучения были зарегистрированы несколькими лабораториями. Но за несколько секунд до регистрации первых импульсов нейтрино сработала гравитационная волновая антенна в Италии. Зафиксированный поток энергии был необычайно высок. Если носителем потока энергии, зафиксированного гравитационным детектором, кроме гравитационной волны была и скалярная волна, то поток вполне мог соответствовать вспышке сверхновой [62]. Это лишь возможная временная корреляция, для которой нет ни какого физического механизма и она должна рассматриваться как гипотеза.

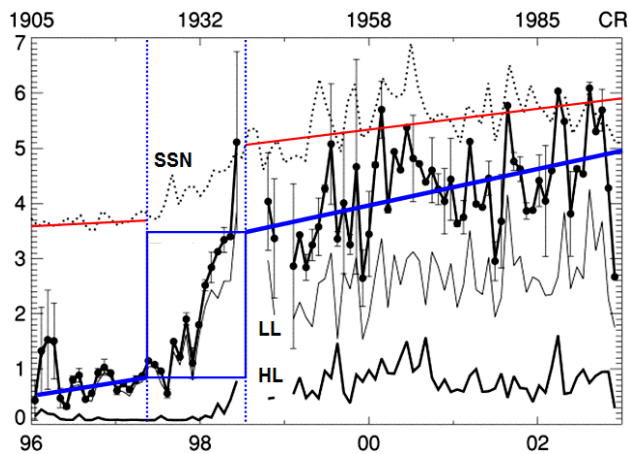


Рис. 1. Скорости распространения CMEs, усреднённые за кэррингтоновские периоды по данным LASCO (жирная линия с темными кружками) по сравнению с ежедневными значениями SSNs. Погрешности за каждый оборот оценены по данным SOHO. LL и HL – поведение скоростей низко- и высокоширотных CMEs, соответственно. [61].

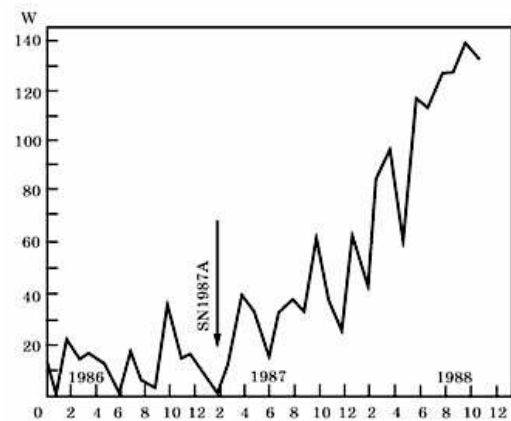
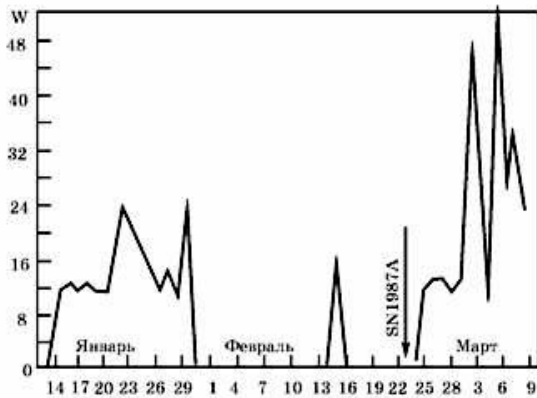


Рис. 2. Стимулирование зарождения активных областей (слева) и интенсивности развития 23 цикла СА (справа) возможной внешней причиной [62]. 23 цикл СА оказался неординарным – с низкой амплитудой и увеличенной длительностью, что по результатам исследований аритмии СА свидетельствует о сбое её 11-летней цикличности [63].

Отмечая значительное повышение геодинамической активности нашей планеты с 1998 г., Международный Комитет GEOCHANGE по-прежнему ориентируется на внешнее воздействие только солнечной активности, основываясь лишь на корреляционных связях без объяснения их физических механизмов, не придавая значения вкладу гравитационного

воздействия на Землю и не учитывая изменений глубинной геодинамики. Роль которой весьма ясно и иллюстративно была показана ранее в работах Ю.В. Баркина, в том числе, для скачкообразных изменений активности процессов (и не только в 1998 г.). Скачки происходят довольно систематически, например, они для различных природных процессов имели место в 1975–1976, 1986–1987, 1997–1998, 2010–2013, причем на различных телах солнечной системы и в строгой корреляции с вариациями циклической активности Солнца (в частности, с известным периодом около 11.1 г.). Но солнечная радиация здесь не играет ведущей роли и остается как бы в стороне. Таким образом, имеются признаки и надежные наблюдательные данные, свидетельствующие, что колебания основных оболочек Солнца и планет происходят синхронно и взаимосвязано. Особо обратим внимание на свойство неинерциальности относительного движения оболочек в системе координат барицентра солнечной системы. Движение центра масс Солнца в барицентрической системе координат сильно коррелирует с геодинамическими и геофизическими процессами. Указанные явления и динамические факторы предстоит изучить более детально в ближайшем будущем.

Заключение

*В конце концов, останутся на теории,
в которой закономерно связанными вещами
будут не вероятности, но факты.
А. Эйнштейн*

Результаты выполненных исследований природы солнечно-земных связей свидетельствуют о том, что физика солнечно-земных связей находится ещё на поисковой стадии. Для её преодоления необходимо:

- в солнечно-земной физике наряду с солнечной активностью и потоками ГКЛ учитывать последствия гравитационного воздействия на Землю со стороны Луны, Солнца и других планет в процессе барицентрического движения Солнечной системы в целом в гравитационном поле Галактики, а также возможность воздействия на Солнечную систему извне;

- признание обязательным выполнение системных исследований солнечно-земных связей с междисциплинарным выяснением физических механизмов возмущений,

- целевые программы междисциплинарных координируемых дальнейших исследований солнечно-земных связей.

Работа выполнена по теме № 16.1.6 плана НИР ФГБУН ИСЗФ СО РАН на 2014 г. согласно перечню приоритетных направлений, программ и проектов фундаментальных исследований СО РАН на 2013–2016 гг., в т.ч. солнечно-земных связей, а также по проекту РФФИ N 11-05-01134-а. Соавторы благодарны за материалы, заимствованные в Интернете.

Литература

1. Современные глобальные изменения природной среды: в 4 т. / Коллектив авторов; отв. ред. *Н.С. Касимов*, проф. *Р.К. Клиге*. – М.: Научный мир, 2006. – Т. 1. – 696 с., Т. 2. – 775 с.; Факторы глобальных изменений. 2012. – Т. 3. – 444 с., Т. 4. – 540 с.
2. *Монин А.С., Шишков Ю.А.* Климат как проблема физики // *Успехи физ. наук*. 2000. Т. 170. № 4. С. 419–445.
3. *Смольков Г.Я., Базаржапов А.Д., Петрухин В.Ф.* Исходные природные причины экологических рисков, нарушающих экологическую безопасность // *Солнечно-земная физика*. Изд-во СО РАН. 2012. Вып. 20. С. 131–138.
4. *Heliophysics Envolving Solar Activity and the Climates of Space and Earth / C.J. Achrijver and G.L. Siscoe eds.* – Cambridge University Press. – 2010. – 495 p.
5. *Баркин Ю.В.* Объяснение эндогенной активности планет и спутников и её цикличности // *Известия наук о Земле РАЕН*, 2002. М.: ВИНТИ. Вып. 9. С. 45–97.
6. *Barkin Yu.V.* Unified and universal mechanism of active life of the Earth and others celestial bodies: to solution of the fundamental and modern problems of geosciences and planetology // *Reports of “AstroKazan – 2011” International astronomical congress (August 22–30, Kazan, Russia)*. 2011. pp. 147–164.
7. *Обридко В.Н.* Космические факторы земной погоды // Тез. докладов Всерос. конф. «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений», Иркутск, 19–22.06.2012 г. С. 20.
8. *Дергачёв В.А., Распопов О.М.* а) Долговременные изменения солнечной активности, геомагнитного поля и палеоклиматических данных, там же, Там же, С. 22. б) Долговременная солнечная активность – контролирующий фактор глобального потепления 20-го века // *Солнечно-земная физика*. Изд-во СО РАН, Вып. 12, Т. 2, с. 272–275; в) *Распопов О.М., Дергачёв В.А и др.* Интерпретация физических причин глобального и регионального климатических откликов на долговременные вариации солнечной активности. – Там же, с. 276–278.
9. *Кропоткин П.Н., Трапезников Ю.А.* Вариации угловой скорости вращения Земли, колебания полюса и скорости дрейфа геомагнитного поля и их возможная связь с геотектоническими процессами // *Известия АН СССР. Сер. геол.* 1963. № 14. С. 32–50.
10. *Горькавый Н.Н., Трапезников Ю.А., Фридман А.М.* О глобальной составляющей сейсмического процесса и ее связи с наблюдаемыми особенностями вращения Земли // *Доклады РАН*. 1994. Т. 338, № 4. С. 525–527.
11. *Сидоренков Н.С.* Нестабильности вращения Земли и глобальные изменения природных процессов // *Современные глобальные изменения природной среды*. – М.: Научный мир, 2006. Т. 2. С. 737–748.
12. *Баркин Ю.В.* Объяснение энергетики и цикличности эндогенной активности Земли, инверсионные изменения климата. Сб. научных трудов. Физические проблемы экологии (экологическая физика). 2013. Т. 19. С. 54–69. Физ-фат МГУ. <http://www.100-bal.ru/astroioiya/13113/index.html>.
13. *Barkin Yu.V.* Moons and planets: mechanism of their active life // *Proceedings of International Conference “Astronomy and World Heritage: across Time and Continents” (Kazan, 19–24.08. 2009)*. KSU. 2009, P. 142–161.
14. *Баркин Ю.В.* Вынужденные колебания системы ядро-мантия Земли и их отражение в геологических, геодинамических и геофизических процессах // «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т.V. – М.: ГЕОС. 2009. С. 210–214.
15. *Баркин Ю.В.* Дрейф центра масс Земли и вековые вариации силы тяжести // *Геофизические исследования*. 2010. Том. 11. Спецвыпуск. С. 18–31.

16. Баркин Ю.В. Механизм активной жизни Земли и других небесных тел // Известия РАН, секция наук о Земле. 2011. С. 452–457.
17. Баркин Ю.В. Относительные смещения ядра и мантии Земли и их роль в сейсмическом процессе // Международная конференция, посвященная 250-летию Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН «Геология: история, теория, практика» (14–16 октября 2009 года). М.: ГГМ РАН. 2009. С. 20–24.
18. Баркин Ю.В. Объяснение вековых изменений среднего глобального уровня океана и средних уровней океана в северном и южном полушариях Земли // Вестник МГУ. Серия 3: физ., астроном. 2011. № 4, Р. 75–83.
19. Barkin Yu.V. The mechanism of translational displacements of the core of the Earth at inversion molten and solidification of substance at core-mantle-boundary in opposite hemispheres // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 19-24 April 2009). Geophysical Research Abstracts. 2009. Vol. 11, abstract # EGU2009-6241. 2p. <http://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2009/EGU2009-6241-1.pdf>.
20. Barkin Yu.V. Step-by-step synchronous variations of geodynamical and geophysical processes and their uniform mechanism: events of 1997–1998 years // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 19-24 April 2009). Geophysical Research Abstracts. 2009. Vol. 11, abstract # EGU2009-3382. 2 p.
21. Баркин Ю.В. Срывы и скачки в относительном положении ядра и мантии и катастрофические последствия наиболее опасные для человечества // Геология морей и океанов: Материалы XIX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. – М.: ГЕОС. 2011. С. 33–37.
22. NASA News: http://science1.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2009/23dec_voyager/; http://science.nasa.gov/science-news/science-at-nasa/2013/12sep_voyager1/; Voyager 1 Reaches Interstellar Space Sept. 12, 2013 // [http://science.nasa.gov/science-news/Voyager 1 left the solar system a year ago](http://science.nasa.gov/science-news/Voyager%201%20left%20the%20solar%20system%20a%20year%20ago). NASA: Solar System is passing a Galactic Cloud.
23. Проворникова Е.А. Нестационарные течения частично-ионизованной плазмы с учетом эффектов перезарядки на границе гелиосферы и в межзвездной среде // Автореферат диссертации на соискание уч. ст. к.ф.-м.н., Кафедра аэромеханики и газовой динамики механ.-математического факультета ФГОУ ВПО МГУ. М.: 2013. 12 с.
24. Леонов Е.А. Космос и сверхдолгосрочный гидрологический прогноз. – СПб: Алетея; Наука. 2010. – 352 с.
25. Хаин В.Е. О главных направлениях в современных науках о Земле // Вестник РАН. 2009. Т. 79, № 1. С. 41–43.
26. Баркин Ю.В. Глобальное возрастание среднего уровня океана и ошибочная трактовка роли тепловых факторов // «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т. IV. М.: ГЕОС. 2007. С. 18–20.
27. Barkin Yu.V. Prediction of erroneous altimetry velocities and an explanation of observably coastal velocities of increase of a global mean sea level and mean sea levels in northern and southern hemispheres // «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т. V. – М.: ГЕОС. 2009. С. 183–187.
28. Barkin Yu.V. Crisis in geosciences in epoch of altimetry measurements and ways of its overcoming // «Геология морей и океанов: Материалы XVII Международной научной конференции (школы) по морской геологии». Т. V. – М.: ГЕОС. 2009. С. 188–192.

29. *Barkin Yu.V.* Mechanism of non-tidal acceleration and secular pole drift of the Earth and prediction of similar phenomena for Mars // Proceedings of the 6th Orlov Conference “The study of the Earth as a planet by methods of geophysics, geodesy, and astronomy” devoted to the 100th anniversary of E.P. Fedorov, June 22–24, 2009, MAO NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine. – Kiev: “Akadempriodyka”. 2010. P. 104–107. <http://www.mao.kiev.ua/orlov-2009/Proceedings.pdf>.
30. *Хаин В.Е., Халилов Э.Н.* Цикличность геодинамических процессов: её возможная природа. – М.: Научный мир, 2009. – 520 с.
31. *Баркин Ю.В.* Относительные смещения ядра и мантии Земли и их роль в сейсмическом процессе // Международная конференция, посвященная 250-летию Государственного геологического музея им. В.И. Вернадского РАН «Геология: история, теория, практика» (14–16 октября 2009 года). М.: ГГМ РАН. 2009. С. 20–24.
32. *Белов С.В., Шестопалов И.П., Харин Е.П., Соловьев А.А., Баркин Ю.В.* Вулканическая и сейсмическая активность Земли: пространственно-временные закономерности и связь с солнечной и геомагнитной активностью // Новые технологии. Физика. 2010. Т. 2. N 2. С. 3–12.
33. <http://www.universetoday.com/110973/sobering-ipcc-report-warming-is-unequivocal/> Sobering IPCC Report: “Warming is Unequivocal”
34. *Маракушев А.А.* Происхождение Земли и природа её эндогенной активности. – М.: Наука, 1999. – 255 с.
35. *Язев С.А., Леви К.Г., Задонина Н.В.* Глобальное потепление и вопросы научной методологии // Изв. ИГУ, Серия «Науки о Земле», 2009. Том 1. № 1. С. 198–213.
36. *Малинин В.Н.* Уровень океана: Настоящее и будущее. – СПб: РГГМУ, 2012. – 260 с.
37. *Леви К.Г., Задонина Н.В., Язев С.А.* Современная геодинамика и гелиогеодинамика: учебное пособие. – Иркутск: Изд-во ИГУ, 2012. – 539 с.
38. Около 97% ученых убеждены в техногенном характере потепления / – РИА Новости 16.05.2013 Интернет-ресурс: <http://ebull.ru/dl/digest-020.pdf>.
39. *Авакян С.В.* а) Проблема климата как задача солнечно-земной физики // Солнечно-земная физика. Изд-во СО РАН, 2012, Вып. 21. С. 18–27; б) Физика солнечно-земных связей: некоторые результаты, проблемы и новые подходы // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т. 48. № 4. С.435–442.
40. *Hansen J., Ruedy R., Sato M., Imhoff M., Lawrence W., Easterling D., Peterson T., Karl T.* A closer look at United States and global surface temperature change // Journal of Geophysical Research: Atmospheres (1984–2012). 2001. Vol. 106. Issue D20, p. 23947–23963.
41. *Гусакова М.А., Карлин Л.Н.* Оценка вклада парниковых газов, водяного пара и облачности в изменение глобальной приповерхностной температуры воздуха // Метеорология и гидрология. 2014. № 3. С. 19–26.
42. *Жеребцов Г.А., Коваленко В.А.* Влияние солнечной активности на погодно-климатические характеристики тропосферы // Солнечно-земная физика, 2012. Вып. 21. С. 98–106.
43. *Лавёров Н.П., Медведев А.А.* Космические исследования и технологии: расширение знаний об окружающем мире. – М.: Доброе слово, 2012. – 180 с.
44. *Barkin Yu.V.* Dynamics of the Earth shells and variations of paleoclimate // Proceedings of Milutin Milankovitch Anniversary Symposium “Paleoclimate and the Earth climate system” (Belgrade, Serbia, 30 August – 2 September, 2004). Belgrade, Serbian Academy of Sciences and Art. 2004. P. 161–164.
45. *Barkin Yu.V.* Inversion of periodic and trend variations of climate in opposite hemispheres of the Earth and their mechanism // Proceedings of IUGG XXIV General Assem-

- bly, Perugia, Italy 2007: Earth: Our Changing Planet (Perugia, Italy, July 2-13, 2007) (P) – IAPSO, JPS001. 2007. P. 1674. 2p. [www. iugg2007perugia.it](http://www.iugg2007perugia.it).
46. *Barkin Yu.V.* Warming: mechanism and latitude dependence // EGU General Assembly (Vienna, Austria, 2–7 May 2010). Geophysical Research Abstracts. 2010. Vol. 12, abstract # EGU2010-6014. 3p. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2010EGUGA.12.6014B>
 47. *Баркин Ю.В.* Циклические инверсионные изменения климата в северном и южном полушариях Земли: биполярные «климатические качели» и их механизм, проявления его действия в современную эпоху и значение для климата России. В коллективной монографии «Научные аспекты экологических проблем России» / Под общей ред. Ю.А. Израэля и Н.Г. Рыбальского. – М.: НИА-Природа, 2012, с. 46–51 (349 с).
 48. *Barker S., Diz P., Vautravers M.J., Pike J., Knorr G., Hall I.R. & Broecker W.S.* Interhemispheric Atlantic seesaw response during the last deglaciation. *Nature*, 457, 1097-1102 (26 February 2009) | doi:10.1038/nature07770.
 49. *Баркин Ю.В.* Синхронные скачки в процессах и явлениях на Земле, Луне и Солнце в 1997–1998 гг. и их единый механизм // Геология морей и океанов: Материалы XX Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Т. V. М.: ГЕОС. 2013. С. 21–25.
 50. *Баркин Ю.В.* Данные современной космической геодезии свидетельствуют о северном полярном дрейфе ядра Земли относительно мантии. Научная конференция "Ломоносовские чтения – 2013". Секция "Физика": Сборник тезисов докладов. – М., Физический факультет МГУ, 2013. С. 209–212.
 51. *Наговицын Ю.А.* Солнечная активность и солнечно-земные связи на различных временных шкалах // Тезисы докладов Всерос. конференции «Солнечная активность и природа глобальных и региональных климатических изменений» (19–22.06.2012 г., Иркутск), С. 20.
 52. Хаин В.Е., Короновский Н.В. Планета Земля от ядра до ионосферы. – 2-е изд. – М.: КДУ, 2008. – 244 с.
 53. *Sundara Raman K.* Space Weather – Sun Earth Relations // *International Journal of Astronomy and Astropysics*, 2011. № 1. С. 10–14.
 54. *Гончаров М.А., Разницын Ю.Н., Баркин Ю.В.* Северная компонента дрейфа континентов в фанерозое: структурные следствия и возможная причина // Доклады Академии Наук. 2014. Т. 455. № 5. С. 550–552.
 55. *Великанов А.Е.* О природе магнитного поля Земли и передвижении магнитных и географических полюсов // Геофизика XXI столетия: 2005 год. Сб. трудов VII геофизических чтений (3–5.03.2005 г., Москва). – М.: Научный мир, 2006. – 496 с.
 56. *Баркин Ю.В.* Механизм тектонической активности Земли: глубинная геодинамика, ее современные проявления // Фундаментальные проблемы геотектоники. Материалы XL Тектонического совещания. Т. 1. – М.: ГЕОС. 2007. С. 59–62.
 57. *Халилов Э.Н.* Доклад Международного комитета GEOCHANGE о «Глобальном энергетическом скачке на нашей планете, начиная с 1998 г.» (2010) // www.climatechange2013.org.
 58. *Смольков Г.Я., Баркин Ю.В., Базаржапов А.Д., Щепкина В.Л.* Скачкообразные изменения трендов геодинамических и геофизических явлений в 1997–1998 гг. // Солнечно-земная физика. – Изд-во СО РАН (2013), (в печати) // Тезисы докладов Всерос. конф. по солнечно-земной физике. Иркутск, ИСЗФ СО РАН, 2013. С. 39–40.
 59. *Zotov L.V., Barkin Yu.V., Lubushin A.A.* Geocenter motion and its geodynamical content // “Space Geodynamics and Modeling of the Global Geodynamic Processes”, Novosibirsk, Russian Federation, 22–26 September, 2008; Russian Academy of Sciences, Tro-

- fimuk Inst. Of Petrol. Geol. And Geophys., SB RAS. – Novosibirsk: Academic Publishing House “Geo”. 2009. P. 98–101.
60. *Chapman G.A., Dobias J.J., Walton S.R.* On the variability of the apparent solar radius // The Astrophysical Journal, 681:1698-1702, 2008 July 10.
 61. *Gopalswamy N., Lara A., Yashiro S., Howard R.A.* Coronal mass ejections and solar polarity reversal // The Astrophysical Journal, 598:L63-L66, 2003 November 20.
 62. *Брюшинкин С.М.* 1990 г. Взрыв сверхновой потряс Солнце и Землю? 2012 г. Да! // <http://my.mail.ru/community/catastrof/44A20163B09E556E.html>; <http://knu.znate.ru/docs/index-477390.html>.
 63. *Козлов В.И., Козлов В.В.* Аритмия Солнца. В космических лучах. – Якутск: Изд-во ФГБУН Институт мерзлотоведения СО РАН, 2014. – 238 с.

TOWARD SYSTEMATIC AND INTERDISCIPLINARY STUDY OF SOLAR-TERRESTRIAL RELATIONS

Smolkov G.Ya.¹, Barkin Yu.V.²

¹*Institute of Solar-Terrestrial Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk*
smolkov@iszf.irk.ru

²*Sternberg Astronomical Institute, Moscow State University, Moscow*
barkin@inbox.ru

Physics of solar-terrestrial relations is one of fundamental issues for present-day science, because these relations determine the state and variability of the mankind habitat and activity. Non-system studying solar-terrestrial relations deprived of the objective account for all primary external causes, without interdisciplinary explaining mechanisms for their effect on the Earth, inevitably results in the forced attributing inexplicable processes and phenomena to "natural anomalies," impedes forecasting variations in the environment. Statement, statistical and correlation analyses, still widely used, are not accompanied by due interpretation of the studied. Along with solar activity and galactic cosmic ray flows, one should take into account the Earth endogenous activity caused by an external gravity forcing on the shells of our planet (core, mantle, etc.) including disturbance of the Solar system integrally from outside.

КОСМИЧЕСКИЕ ЛУЧИ – ФАКТОР ЭВОЛЮЦИИ БИОСФЕРЫ

Мирошниченко Л.И.^{1,2}

¹*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова (ИЗМИРАН), Москва, Троицк, 142190, Россия,*

²*Научно-исследовательский институт ядерной физики (НИИЯФ МГУ)
им. Д.В. Скобельцына Московского Государственного Университета
им. М.В. Ломоносова, Воробьёвы Горы, 119234, Москва, Россия, leonty@izmiran.ru*

Введение

Не вызывает сомнений, что космическое окружение Земли в прошлом неизбежно оказывало прямое и/или косвенное влияние [1–4] на условия земной жизни и эволюцию биосферы. К космическим факторам относят потоки газа и пыли, кометы и астероиды, космические лучи (энергичные частицы галактического и/или солнечного происхождения), межпланетную плазму (солнечный ветер) и электромагнитные излучения различных энергий (длин волн, частот). Большой интерес представляют радиационные условия и их вариации, особенно в отдалённом прошлом (на геологической шкале времени). Солнце, важнейшее, неперемное условие для существования земной биосферы, также является потенциальным источником опасных излучений. Ниже, в дополнение к [3], суммируются данные наблюдений и результаты исследовательских работ, проведенных и/или опубликованных, в основном, после 2012 г. Эти исследования находятся фактически в пограничной области между Астробиологией и Космической Погодой. Основное внимание уделено космическим лучам (КЛ) галактического и солнечного происхождения (ГКЛ и СКЛ).

Космические лучи в прошлом

Ранее [3] нами была описана история проблемы «Космические лучи и биосфера», а также рассмотрены основные экспериментальные данные о влиянии КЛ на эволюцию биосферы. В частности, были рассмотрены регулярные вариации ГКЛ в далёком прошлом Солнечной системы (по метеоритным данным), возможная частота спорадических событий, а именно, взрывов Сверхновых и гигантских солнечных вспышек [4, 5]. В этой области исследований всё ещё остаётся немало астрофизических и биологических проблем, требующих изучения с современных позиций, с учётом новых моделей структуры и эволюции Галактики, а также экспериментальных указаний о важной роли КЛ в эволюции биосферы [3]. Осуществляемые в настоящее время и планируемые на ближайшие годы программы космических исследований укрепляют наши надежды на лучшее понимание основ Астробиологии. В частности, вклад ближайших звёзд-карликов в поток КЛ на орбите Земли, по-видимому, должен быть пересмотрен в свете новейших наблюдательных данных [6].

При оценке роли и вклада ГКЛ необходимо учитывать реальную шкалу времени для изучаемых этапов эволюции биосферы (Таблица 1). Фактический «возраст» наблюдаемых потоков ГКЛ ограничен величиной 10–100 миллионов лет (подробнее см. [21]). Это означает, что при пересечении Солнцем галактических рукавов в процессе его движения вокруг центра Галактики земная биосфера могла подвергаться воздействию ГКЛ разной интенсивности, возраста и происхождения. Между тем, уже во времена Ч. Дарвина (и даже ранее) появились данные о том, что в развитии биосферы, по-видимому, нельзя исключать неравномерностей («скачков»). К ним можно отнести известный Кембрийский «взрыв» (КВ) – резкое (по геологическим меркам) увеличение количества многоклеточных, обитавших на Земле, около 540–480 миллионов лет назад. Сам Дарвин (1859) вынужден был признать это событие единственным, но тяжелейшим вызовом его теории эволюции. С другой стороны, поскольку ряд космических факторов имеют случайную и/или спорадическую природу (кометы, астероиды, вспышки Сверхновых звезд, солнечные вспышки), то представляется вероятным, что и развитие биосферы не было равномерным.

Таблица 1. Геологическая шкала времени и биосфера Земли
(адаптировано по [21] с учётом новейших данных).

День (сутки)	10^5 с
Длительность жизни человека	10^9 с (100 лет)
Возраст цивилизации	10^4 лет
Длительность существования человека	10^6 лет
Последняя инверсия геомагнитного поля	7.8×10^5 лет
Возраст галактических космических лучей (ГКЛ)	$\leq 10^8$ лет
Длительность существования млекопитающих	10^8 лет
Кембрийский взрыв	5.4×10^8 лет
Длительность существования многоклеточных организмов	$(2.0-2.5) \times 10^9$ лет
Длительность существования биосферы (возникновение одноклеточных водорослей)	3.5×10^9 лет
Возраст Земли	$(4.54 \pm 1\%) \times 10^9$ лет

Если возраст Земли $((4.54 \pm 1\%) \times 10^9$ лет) принять за сутки, то жизнь на Земле существует всего 17.5 часа, млекопитающие – около 30 минут, а человек – только последние 18 секунд. Возраст ГКЛ, регистрируемых у Земли в настоящее время, по этой шкале не превышает получаса.

До последнего времени считали, что КВ является аномалией [4], несовместимой с современными представлениями об эволюции биосферы. Внезапное, почти одновременное возникновение многих групп животных в Кембрийский период получило название «дилеммы Дарвина», так как подобная аномалия не могла возникнуть в рамках естественного отбора. До сих пор одно из самых популярных объяснений КВ – это быстрый переход животных к минеральному экзоскелету из-за увеличения концентрации солей кальция. Американские геологи предложили своё объясне-

ние этому явлению [7]. По их мнению, причиной «взрыва» могло стать изменение ионного состава морской воды по чисто геологическим причинам – обнажение древних слоев и их реакция с водой и кислородом. По-видимому, к концу исследуемого периода в воду попало много кальция, железа, кремния и калия. При этом организмы приспособились использовать новые материалы для собственных нужд – возникло явление биоминерализации.

До сих пор, однако, ни одного надежного анализа скорости самого «взрыва» не проводилось – она считалась просто очень высокой. Чтобы оценить эту принципиально важную величину, австралийские учёные-палеонтологи [8] провели количественный анализ скорости эволюции членистоногих, разделение которых на крупные группы произошло как раз в Кембрийский период. Было установлено, что скорость эволюции в Кембрийский период хоть и была высокой, но на самом деле не является аномальной: она оказалась примерно в 4.0–5.5 раза больше, чем скорость эволюции в последующие периоды. Таким образом, Кембрийский взрыв вполне можно примирить с теорией эволюции Дарвина. Заметим, кстати, что по метеоритным данным (см. подробнее [3]), поток ГКЛ в эпоху Кембрийского взрыва был примерно в 3 раза ниже, чем в настоящее время. Вклад от вспышек Сверхновых всё ещё остаётся под вопросом.

С другой стороны, в протекании природных процессов наблюдается определённая ритмика, причём на больших интервалах времени различные процессы могут даже синхронизироваться по иерархическому принципу, при наличии сильного ритмозадающего источника (например, активности Солнца). В этом свете многие факты из области гелиобиологии [1] могут быть адекватно истолкованы на основе концепции эволюционно-адаптационного синдрома [2]. Отсюда следует, что наряду с поиском новых данных о космофизических факторах, остаются актуальными, по крайней мере, три задачи [4]: 1) построение теоретических моделей с учетом возможных интенсивностей излучений, воздействовавших на биосферу в прошлом; 2) выяснение радиационных условий на поверхности Земли и особенностей поведения биосферы в периоды инверсий геомагнитного поля (в качестве «макета» для проведения соответствующих расчётов уровня радиации можно взять магнитосферу Урана); 3) изучение современного отклика биосистем на космофизические факторы как атавистической реакции на изменение условий среды обитания.

Древние вспышки на Солнце и биосфера

Радиационные условия вблизи Земли, возмущения в ионосфере, состояние озонового слоя, ионизация верхней атмосферы и другие геофизические явления во многом определяются вариациями потоков энергичных частиц [1], которые ускоряются на Солнце или вблизи него (СКЛ). На орбите Земли эти частицы регистрируются в виде солнечных протонных событий (СПС). Масштабы и значимость таких событий (их геоэффектив-

ность) меняются в зависимости от уровня солнечной активности (СА). Частота регистрации СПС зависит от текущей стадии 11-летнего цикла СА (спад или подъём) [2]. Особый интерес представляют экстремальные солнечные вспышки и «древние» протонные события [3, 5], частота и мощность которых могла быть различной в различные эпохи эволюции Солнца, в частности, в эпоху «молодого» Солнца, при другом уровне его активности. Мощность СПС обычно оценивают по интегральным значениям (флюенсам) потока частиц СКЛ за всё время конкретного события. Наши оценки [5] указывают на крутой обрыв функции распределения СПС в области малых вероятностей (т.е. больших флюенсов СКЛ). Это следует из анализа всех имеющихся (косвенных и прямых) данных о СКЛ за последние ~1200÷1300 лет [5, 9]. Для экстраполяции этих результатов в прошлое и будущее нужны соответствующие модели «раннего» и «позднего» Солнца.

Косвенные данные о потоках СКЛ в прошлом могут быть получены из природных архивов (нитраты в антарктическом и арктическом льдах, радиоуглерод в кольцах деревьев, другие космогенные изотопы) [1, 3, 9]. К настоящему времени имеются данные об экстремальных СПС за период более 1200 лет (начиная с AD775 года н.э.). Среди таких событий наиболее известна вспышка 1 сентября 1859 г. («событие Кэррингтона», СК) [10]. Что касается недавно идентифицированного события AD775 [9], то наша оценка флюенса солнечных протонов с энергией ≥ 30 МэВ (2.96×10^9 см⁻²) на порядок ниже [1], чем флюенс для СК (1.88×10^{10} см⁻²). Однако если следовать модели события [11], то получим величину $(2.0 \div 3.0) \times 10^{10}$ см⁻². Скорее всего, суммарный флюенс AD775 был связан с сильным (но не исключительно сильным) СПС (или серией СПС) [9]. С другой стороны, имеющиеся оценки флюенсов по древним СПС, основанные на сценарии и спектре крупнейшего в истории прямых наблюдений события 23 февраля 1956 года (например, [12]), представляются не вполне убедительными.

В целом, имеющиеся данные наблюдений по СКЛ пока не позволяют точно оценить максимальные возможности солнечного ускорителя. Это существенно ограничивает экстраполяцию полученных результатов в прошлое и будущее, на периоды с уровнем солнечной активности, отличным от современного уровня [5]. Тем не менее, данные о солнечных космических лучах и их геофизических эффектах позволяют лучше понять механизмы солнечно-земных связей [1]. В свою очередь, это важно для моделирования эволюции биосферы Земли в прошлом и будущем [2], а также для поиска возможных очагов жизни на Марсе и других телах Солнечной системы [3]. В конечном счёте, при более реалистичной модели Солнца станет возможным более уверенное обсуждение роли факторов, влияющих на происхождение и эволюцию жизни на Земле.

Поиски марсианской биосферы

Как известно, Марс лишён плотной атмосферы и сильного магнитного поля. Поэтому частицы ГКЛ и СКЛ могут эффективно бомбардировать поверхность Марса. Это приводит к формированию фона радиации, который может почти в 100 раз превышать радиационный фон на поверхности Земли. Отсюда понятен интерес к теоретическому и экспериментальному изучению вариаций реального фона от КЛ, их влияния на биологические объекты и биомаркеры в ходе длительной марсианской эволюции [13]. Если жизнь на Марсе существует или существовала в прошлом, то разумно полагать, что в её основе были органические молекулы, которые, по аналогии с земной жизнью, являются уязвимыми для частиц космического излучения [13–17].

Недавно были опубликованы первые результаты прямых измерений радиационных условий на трассе полёта космической лаборатории «Mars Science Laboratory» к Марсу [18]. Не меньший интерес представляют данные детектора RAD (Radiation Assessment Detector) по измерению радиационного фона непосредственно на поверхности Марса – в кратере Gale, где с 7 августа 2012 года находится марсоход Curiosity [19]. Эти измерения позволили получить поверхностную дозу, которую с помощью транспортных моделей можно экстраполировать на подпочвенные слои, чтобы оценить летальные дозы и времена выживания микробиологических объектов [13–17]. Радиационное окружение Марса может также играть ключевую роль в химическом изменении реголита и марсианских горных пород на геологических масштабах времени, воздействуя на сохранность органики, включая потенциальные органические биопризнаки древнего марсианского окружения [14, 15]. Во всяком случае, данные RAD могут служить базовой линией отсчёта для оценок уровня радиации в этих более защищённых средах и тем самым служить основой для понимания пределов сохранности органического вещества в почве и горных породах кратера Gale.

Обнаружение органического вещества на Марсе является одной из главных целей текущей и будущих марсианских экспедиций. Однако при этом, как отметили авторы [17], деградацией органических молекул за счёт облучения космическими лучами часто пренебрегают. Авторы [17] вычислили скорости накопления доз радиации от СКЛ и ГКЛ на различных глубинах под марсианской поверхностью. Оказалось, что за 1 миллиард лет облучения обнажённых пород Марса накапливается доза ~ 500 MGy (Mega-Grey) в слое 0÷2 см и ~50 MGy на глубинах 5÷10 см. Это означает, что сохранность древних сложных органических молекул на небольших глубинах (до ~10 см) под поверхностью горных пород является в высшей степени проблематичной, если время экспозиции обнажённых пород превышает 300 миллионов лет. С другой стороны, было показано, что более простые органические молекулы с массой ~100 атомных единиц должны иметь хорошие шансы для выживания на небольшой глубине под поверхностью горных пород.

В нескольких работах моделировался ожидаемый радиационный режим под поверхностью Марса (например, [14, 15]), но значения доз до сих пор зависели от модели радиационной обстановки на поверхности. Авторы [14, 15] принимали поглощённую дозу ~ 150 mGy/year, тогда как в [13, 17] принималась доза 50 ± 5 mGy/year. Поглощённая доза, измеренная детектором RAD (76 mGy/year на поверхности) позволяет более точно оценивать дозы под поверхностью. В свою очередь, оценки деградации органического вещества на различных глубинах могут оказаться очень полезными для экспериментального обнаружения жизни на Марсе [3] по наблюдаемым косвенным признакам жизнедеятельности микроорганизмов в подповерхностных слоях марсианской почвы (см., например, [20]).

Работа выполнена при поддержке Программы 28 Российской Академии Наук (Подпрограмма 1) и Российского Фонда Фундаментальных Исследований (проект 14-02-90424 Укр_a).

Литература

1. *Мирошниченко Л.И.* Физика Солнца и солнечно-земных связей. – Москва, НИИЯФ МГУ: Университетская книга, 2011, 174 с.
lib.qserty.ru/static/tutorials/133_Miroshnichenko_2011.pdf
2. *Обридо В.Н., Мирошниченко Л.И., Рагульская М.В., Хабарова О.В., Храмова Е.Г., Кацова М.М., Лившиц М.А.* Космические факторы эволюции биосферы: Новые направления исследований // Проблемы эволюции биосферы. Серия «Гео-биологические системы в прошлом». Москва, Палеонтологический Институт РАН, 2013, с. 66–94, <http://www.paleo.ru/institute/files/biosphere.pdf>.
3. *Miroshnichenko L.I.* Cosmic Rays and Evolution of the Biosphere: Search for New Approaches // Proc. Int. Conference “Space Weather Effects on Humans in Space and on Earth”. 2013, v.1, p.110–136, <http://www.iki.rssi.ru/print.htm>.
4. *Мирошниченко Л.И., Хабарова О.В.* Космофизическая ситуация в эпоху Кембрийского эволюционного взрыва // Серия «Гео-биологические системы». Труды конференции «Становление скелета у различных групп организмов и биоминерализация в истории Земли» // Москва, Палеонтологический ж. 2014. № 14.
5. *Miroshnichenko L.I., Nymmik R.A.* Extreme fluxes in solar energetic particle events: Methodological and physical limitations // Radiation Measurements. 2014. V. 61. P. 6–15.
6. *Adriani O., Barbarino J.C., Bazilevskaia G.A. et al.* (in all 65 authors of PAMELA Collaboration). PAMELA measurements of cosmic-ray proton and helium spectra // Science Express, 3 March 2011, p.1–5.
7. *Peters S.E. and Gaines R.R.* Formation of the ‘Great Unconformity’ as a trigger for the Cambrian explosion // Nature | Letter, 2012, v.484, p.363-366, doi:10.1038/nature10969.
8. *Lee M.S.Y., Soubrier J., and Edgecombe G.D.* Rates of phenotypic and genomic evolution during the Cambrian Explosion. // Current Biology. 2013. V. 23. No.19. P. 1889–1895.
9. *Usoskin I.G. and Kovaltsov G.A.* Occurrence of extreme solar particle events: Assessment from historical proxy data // Astrophys. J. 2012. V. 757. 92 (6 pp.) [DOI], [ADS], [arXiv:1207.5932]
10. *McCracken K.G., Dreschhoff G.A.M., Zeller E.J., Smart D.F., and Shea M.A.* Solar cosmic ray events for the period 1561–1994. 1. Identification in polar ice, 1561–1950 // J. Geophys. Res. 2001. V. 106. No.A10. 21585–21598.
11. *Thomas B.C., Melott A.L., Arkenberg K.R., Snyder B.R.* II. Terrestrial effects of possible astrophysical sources of an AD 774-775 increase in carbon-14 production // Geophys. Res. Lett. 2013. V. 40. 1237–1240. doi:10.1002/grl.50222.

12. Cliver E.W., Tylka A.J., Dietrich W.F., and Ling A.G. On a solar origin for the cosmogenic nuclide event of 775 a.d. // *Astrophys. J.* 2014. V. 781. 32 (4 pp.).
13. Pavlov A.K., Blinov A.V., Konstantinov A.N. Sterilization of Martian surface by cosmic radiation // *Planet. Space Sci.* 2002. V. 50. 669–673. doi: 10.1016/S0032-0633(01)00113-1.
14. Dartnell L., Desorgher L., Ward J., Coates A. Modelling the surface and subsurface Martian radiation environment: Implications for astrobiology // *Geophys. Res. Lett.* 2007. V. 34. L02207. doi:10.1029/2006GL027494.
15. Dartnell L.R., Desorgher L., Ward J.M., Coates A.J. Martian sub-surface ionizing radiation: Biosignatures and geology // *Biogeosciences.* 2007. V. 4. P. 545–558, doi: 10.5194/bg-4-545-2007.
16. Dartnell R. Ionizing radiation and life // *Astrobiology.* 2011. V. 11. P. 551–582. doi: 10.1089/ast.2010.0528; pmid: 21774684.
17. Pavlov A.A., Vasilyev G., Ostryakov V.M., Pavlov A.K., Mahaffy P. Degradation of the organic molecules in the shallow subsurface of Mars due to irradiation by cosmic rays // *Geophys. Res. Lett.* 2012. V. 39. L13202, doi: 10.1029/2012GL052166.
18. Zeitlin C., Hassler D.M., Cucinotta F.A. et al. (in all 17 authors). Measurements of energetic particle radiation in transit to Mars on the Mars Science Laboratory // *Science.* 2013. V. 340. P. 1080–1084, www.sciencemag.org.
19. Hassler D.M., Zeitlin C., Wimmer-Schweingruber R.F. et al. (in all 23 authors + MSL Team). Mars' surface radiation environment measured with the Mars Science Laboratory's Curiosity Rover // *Science.* V. 343. P. 1244797-1 - 1244797-6. DOI: 10.1126/science.1244797, 2014.
20. Levin G.V. It's time to realize there is life on Mars // *EARTH*, October 2010, p.86, http://gillevin.com/Mars/EARTHComment_8=9-10.pdf, 2010.
21. Miroshnichenko L.I. Biological effects of cosmic rays // In: *Mutagenesis on Exposure to Physical Factors.* – Moscow: Nauka, 1980, p.187–205 (in Russian).

COSMIC RAYS AS A FACTOR OF BIOSPHERIC EVOLUTION

Miroshnichenko L.I.^{1,2}

¹*N.V. Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation (IZMIRAN), Russian Academy of Sciences, Troitsk, Moscow, 142190, Russia*

²*M.V. Lomonosov Moscow State University, D.V. Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP), 119234 Moscow, Russia
leonty@izmiran.ru*

There are no doubts that the Earth's space environment in the past inevitably has exerted direct and/or indirect influence [1–4] on the conditions of terrestrial life and biospheric evolution. Well-known space factors are usually the fluxes of cosmic dust and gas, comets and asteroids, cosmic rays (energetic particles of galactic and/or solar origin), interplanetary plasma (solar wind) and electromagnetic radiation of different energies, wave lengths, or frequencies. Of great interest are radiation conditions and their variations, especially in the remote past (over the geological time scales). The Sun, the most important and indispensable condition for the existence of the Earth's biosphere, is also a potential source of dangerous emissions. In continuation of (and in addition to) our review paper [3], below we summarize the observational data and results of theoretical works that have been carried out and/or published mainly after 2012. These studies are actually in the frontier region between the Astrobiology and Space Weather. Our main attention is paid to cosmic rays (CR) of galactic and solar origin (GCR and SCR, respectively).

BIOLOGICAL EFFECTIVENESS OF COSMIC RAYS NEAR THE EARTH SURFACE

Belisheva N.K.

FGBUN Kola Science Centre Russian Academy of Science, Apatity, Russia

The earth is continually bombarded by high-energy particles that originate in outer space. These cosmic rays (CR) interact with the nuclei of atmospheric constituents, producing a cascade of interactions and secondary reaction products that contribute to CR exposures that decrease in intensity with depth in the atmosphere, from aircraft altitudes to ground level.

Primary cosmic particles are divided on galactic and solar origin. Galactic cosmic rays (GCR) incident on the top of the atmosphere consist of a nucleonic component, which in aggregate accounts for 98% of the total, and electrons, which account for the remaining 2%. The nucleonic component is primarily protons (88%) and alpha particles (11%), with the remainder heavier nuclei [1]. These primary cosmic particles have an energy spectrum that extends from 10^8 eV to over 10^{20} eV.

Another component of cosmic rays is generated near the surface of the sun by magnetic disturbances. These solar particle events are comprised mostly of protons of energies generally below 100 MeV and only rarely above 10 GeV (10^{10} eV). These particles can produce significant dose rates at high altitudes, but only the most energetic affect dose rates at ground level. Solar particle events can, in addition, disturb the earth's magnetic field in such away as to change the galactic particle intensity.

The only solar particle events of interest for radiation protection are those in which high-energy particles are produced that can increase ground-level radiation. The largest event yet observed occurred on 23 February 1956, during which the rates of neutron counts at ground level rose to 3600% above normal background levels [2].

The high-energy particles incident on the atmosphere interact with atoms and molecules in the air and generate a complex set of secondary charged and uncharged particles, including protons, neutrons, pions and lower-Z nuclei. The secondary nucleons in turn generate more nucleons, producing a nucleonic cascade in the atmosphere [3]. Because of their longer mean free path, neutrons dominate the nucleonic component at lower altitudes. As a result of the various interactions, the neutron energy distribution peaks between 50 and 500 MeV; a lower energy peak, around 1 MeV, is produced by nuclear deexcitation (evaporation). Both components are important in dose assessment.

Many measurements have been made of the altitude profile of the charged-particle and photon ionization and the absorbed dose rate in free air at ground level. The dose rate values may be considered as averages over the 11-year solar

activity cycle, with the total range of variation about 10%. Since mostly muons are involved, a radiation weighting factor of unity is appropriate [4], yielding the same values for the effective dose rate, i.e. 31 nSv h^{-1} or $270 \text{ } \mu\text{Sv a}^{-1}$.

It is much more difficult to estimate the neutron contribution to effective dose rate at sea level. Incoming protons that initiate the CR neutron field are strongly affected by the earth's magnetic field, with the effect that the neutron fluence rate in equatorial regions is less than that in polar regions. Investigators have recognized the importance of the latitude effect, but it has not been carefully quantified by reliable measurements. Florek et al. [5], quoting results of the Los Alamos LAHET code system calculation, suggest that the equatorial neutron fluence rate at sea level is one fifth the polar rate and that the rate at 50° latitude is 80% of the polar rate. Nakamura et al. [6], combining measurements made at Tokyo (24°N) with those for higher latitudes [7, 8], obtained a narrower range for the pole to equator variation, i.e. the equatorial rate about one fourth of the polar rate.

For both the directly ionizing and photon component and the neutron component of cosmic rays, there is a substantial altitude effect. For the directly ionizing and photon component the population-weighted average dose rate is 1.25 times that at sea level, and for neutrons 2.5 times. The population-weighted average value corresponds to the dose rate that occurs at 900 m above sea level. The calculations cited by Florek et al. [5] and the attenuation factor indicate that the effective dose rate from neutrons would increase by a factor of 2.1 between sea level and 900 m elevation. For the directly ionizing and photon component, the world average effective dose rate is $340 \text{ } \mu\text{Sv a}^{-1}$ (31 nSv h^{-1} or $270 \text{ } \mu\text{Sv a}^{-1}$ multiplied by the altitude factor of 1.25); for the neutron component, the average value is $120 \text{ } \mu\text{Sv a}^{-1}$ ($48 \text{ } \mu\text{Sv a}^{-1}$ multiplied by the altitude factor of 2.5). These results apply to exposures outdoors [9].

So as CR are a natural source of ionizing radiation, the biological effects caused by the CR must comply with damages of genetic substance induced by ionizing radiation. The effectiveness of ionizing radiations to induce biological alterations depends on the way how the energy is deposited in the system. Densely ionizing radiations are more effective than photons or fast electrons the quantitative extent is given by the "relative biological effectiveness (RBE)" which is defined as the ratio of the doses to create the same effect by the reference radiation (commonly ^{60}Co - γ -radiation) and by the radiation in question. A common descriptor of radiation quality is "linear energy transfer" (LET), the energy locally imparted by a charged particle per unit distance traversed. LET is conceptually different from "stopping power" which stands for the energy lost by the incoming particle. LET does not take into account the microscopic structure of energy deposition and has, therefore, some limitations. RBE depends on LET but not in unambiguous manner as the same LET can be achieved by different ions depending on their charge and speed [10].

As it was demonstrated the densely ionizing (high linear-energy-transfer, LET) radiations, such as neutrons and α -particles, could have a greater biological effectiveness than sparsely ionizing (low-LET) X-rays or γ -rays [11, 12]. For many relevant effects in mammalian systems there is a general tendency to increasing RBE with increasing LET, up to a maximum (at $\sim 100\text{--}200 \text{ keV } \mu\text{m}^{-1}$ for α -particles) followed by a decrease at very high LET [10].

Direct mechanistic analysis of experimental data for neutrons or fast heavy ions are confounded by a variety of complications. For example, from fission neutrons the cell receives a very wide variety of tracks, mostly of recoil protons of energies about 0–10 MeV, LETs $\sim 4\text{--}90 \text{ keV}\mu\text{m}^{-1}$ and ranges about 0–1200 μm , including some tracks which stop, start, cross or are entirely internal to a cell nucleus. Furthermore, there is always a dose-component from accompanying low-LET γ -rays. Interpretation of effects from fast heavy ions is complicated by their long delta-ray electrons, which may travel across many cells (even millimetre distances) and irradiate them with essentially low-LET electrons. Mechanistic understanding of effects of neutrons should be aided by synthesis of understanding of the mechanisms of action of the charged particles in the recoil spectrum [10].

Damages of cellular DNA (or deoxyribonucleic acid, contained in cellular nuclei, Fig.1) arised under exposure of particles with high LET, are a main danger for cells. The nucleus of each cell contains approximately 1.8 meters of

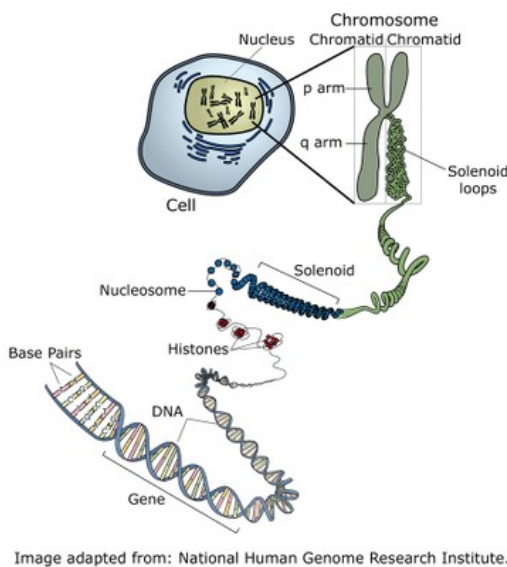


Fig. 1.

the q arm is the long arm. In their replicated form, each chromosome consists of two **chromatids** [13].

A high-LET track is more likely to damage a cellular structures than a single low-LET track. However, on the basis of equal absorbed dose (approximately equal average numbers of ionizations per unit volume), there are two competing trends. The small numbers of high-LET tracks per unit dose (approximately proportional to $1/\text{LET}$) are less likely to pass through any given target or micro-

scopic region of the cell, but if they do they are more likely to cause substantial damage. On this basis alone it is not obvious *a priori* whether 1 α -particle would be more biologically damaging to the DNA of a cell than would several hundred electrons, for a similar dose to the cell nucleus. High-LET-track correlations are apparent at all of levels of tissue, cellular, nuclear organizations [14]. It is believed that intense fluxes of secondary cosmic rays, which include particles with high LET radiation could cause lesions at the cellular level, similar to disorders induced by ionizing radiation with high-LET and with low-LET tracks.

Our studies were performed during a great solar proton events with Ground Level Enhancements (GLE) in the secondary cosmic rays, detected by ground based neutron monitor (Polar Geophysical Institute, Neutron monitor station at Apatity). The year 1989 has manifested an exceptionally large number of sunspots and solar flares, energetic particle events in the near-Earth space environment, and ground level neutron enhancements. Three very energetic solar proton events (SPE) were observed during the period of 19–31 (GLE 43, GLE 44, GLE 45) October 1989 on board geosynchronous satellites GOES 6 and GOES 7. In each case, ground based neutron monitors have detected exceptionally high neutron intensity increases.

The aim of this report is demonstration of the experimental evidence of ground-based radiation effects in biological systems induced by CR.

Biological effects of a Great Solar proton events in October 1989

Six separate biological experiments were conducted on 15–31 October 1989 (Fig. 2) on three cellular lines growing in cultures: At the beginning of each experiment, cellular monolayers from the culture flasks were dispersed and a single cell suspension in culture medium were inoculated into the antibiotic flask in quantity of 50 000 cells, where cells adhered to the surface of the cover glasses. During the period of cell cultivation on the cover glasses, 3–5 samples of antibiotic flasks for each cell lines, in each experiment, every 3, 6, and 12 h were selected for fixation of cells (Fig. 3). Before cell fixation, 1 μ Ku/ml of 3 H-thymidine was added for 30 min for far visualization of nuclei with DNA synthesizing activity. The glasses with adhering cells marked by the 3 H-thymidine, were covered by a photo-emulsion (Ilford), were kept for three months in the dark, were developed, were stained with hematoxilin-eosin, and were then made permanent preparations for far analysis. Permanent preparations were analyzed by epi-fluorescence microscope Zeiss Axioskop 2, coupled with image device and software for image analysis (Media Cybernetics, Inc.). Cells with single nuclei, with gigantic nuclear, with micro nuclear, and with multinuclear cells (MNC) were counted with the microscope by using 10–20 fields of view. The morphofunctional dynamics were estimated by index of MNC (percentage of MNC in the cell population normalized against the mean MNC during the quiet period (15–18 October 1989). For analysis of morphofunctional dynamics, the

indices of MNC in six separated experiments were averaged on coinciding time serious points for each cellular line.

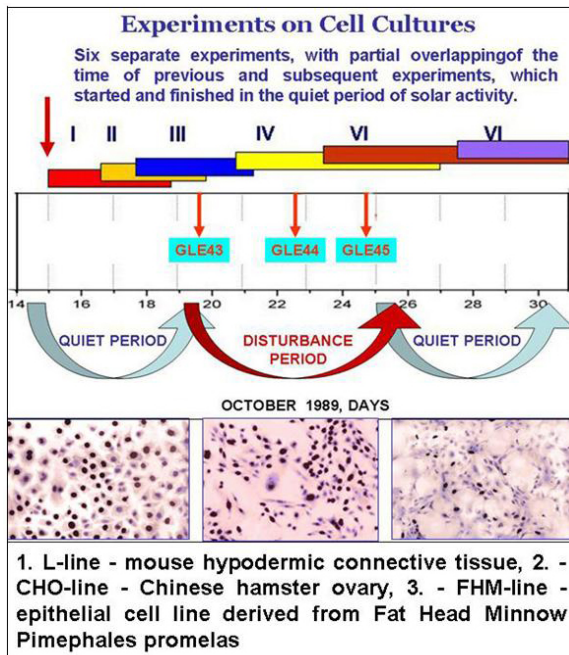


Fig. 2.

NRLMSISE-00 model. The source of primary protons with the given energy

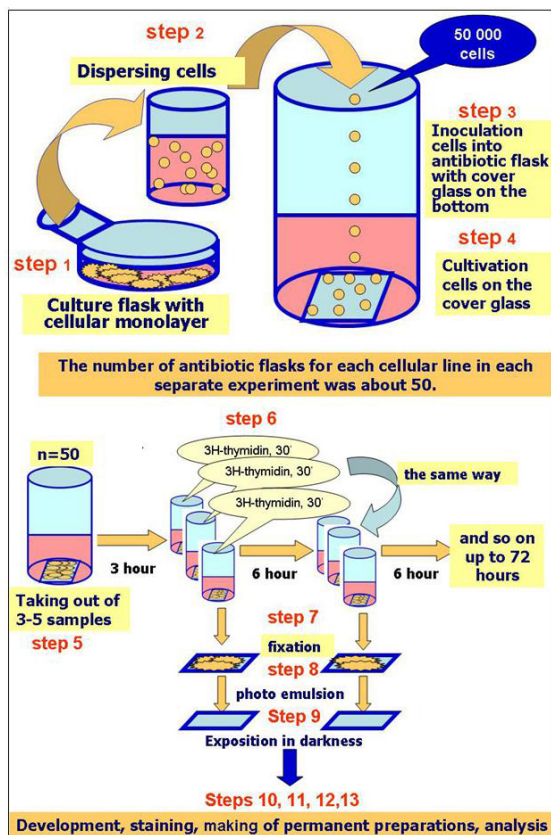


Fig. 3.

The data on solar activity and high energetic particles were downloaded from the site <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/>.

Ground-based neutron monitor data were provided by the station of neutron monitor of the Polar Geophysical Institute (PGI), KSC RAS in Apatity (67.34°N, 33.24°E). The Monte Carlo PLANETOCOSMICS code based on GEANT4 [16] has been used for calculation of particle cascades in the atmosphere during SPE, associating with Ground Level Enhancements (GLE43, GLE 44, GLE45). The representation of physical properties of the atmosphere was realized by the

NRLMSISE-00 model. The source of primary protons with the given energy distribution (0,5–10 GeV) on boundary of the atmosphere (80 km) has been used in calculation of secondary solar particle generation (data of E. Mauricev). The solar proton data (GOES 6, GOES 7), the long-term balloon measurements, ground-based neutron monitors observations were selected to calculate the particle fluxes on the level of Apatity (950 g/cm²) for GLEs events in October 1989. Resulting fluxes were obtained, as integral [16]. Ambient and Personal Dose equivalent per Unit Neutron Fluence, $H^*(10)/\Phi$ was applied for calculation neutron doses [15]. According to Summary of recommended radiation weighting factors and Q–L relationships the neutron spectrum was shared on energy ranges in correspondence to quantities of weighting factors [15].

Extraordinary phenomena (Fig. 4) were detected in the morphofunctional state of three different cellular cultures during performed experiments [17].

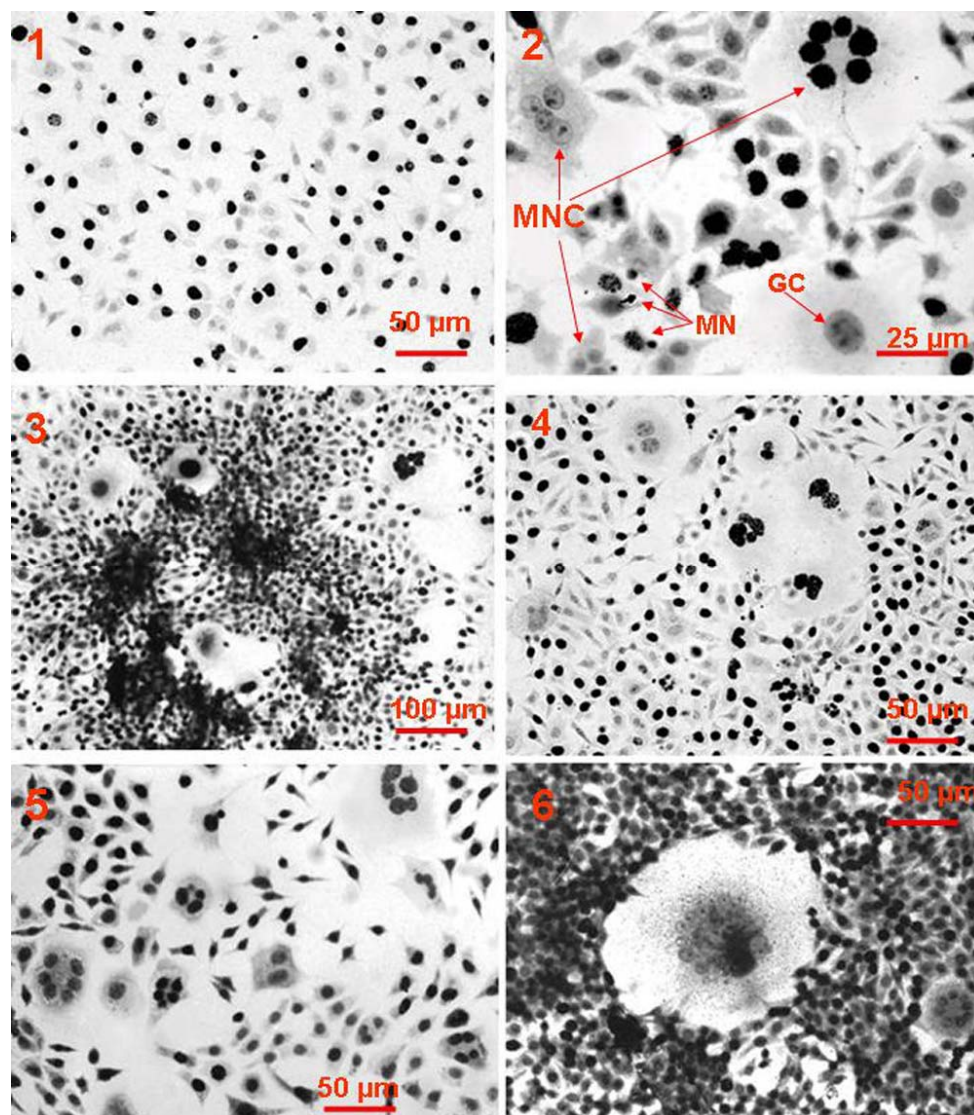


Fig. 4.

In Figure 4 are shown the state of cellular culture L-line in quiet period (15–18 October 1989), (1) and during CLEs (19–25 October 1989) (2–6). Phenomena in state cellular cultures during GLEs were manifested as an abrupt increase of multinuclear cells (MNC), Fig. 4(2–6); gigantic cells (GC), Fig.4 (2–6); multiple disorders of cellular and nuclear substances, including the appearance of cells with apoptosis (Fig. 4(4,6)) and micronuclei (Fig. 4(2,5)); local region of clustered damages (Fig. 4(3–6)); coherent manifestation of signatures (2–6) in the three lines (Fig. 5).

Some of damages were typical under exposure of ionizing radiation on the cells: MNC, GC, apoptosis, micronuclei (including a small region of clustered damages [18–24] Clustered damages of nuclear substances were similar to the

“bystander” responses, involving damage to the nearby cells that were not directly traversed by the radiation [12, 14, 20, 23, 25].

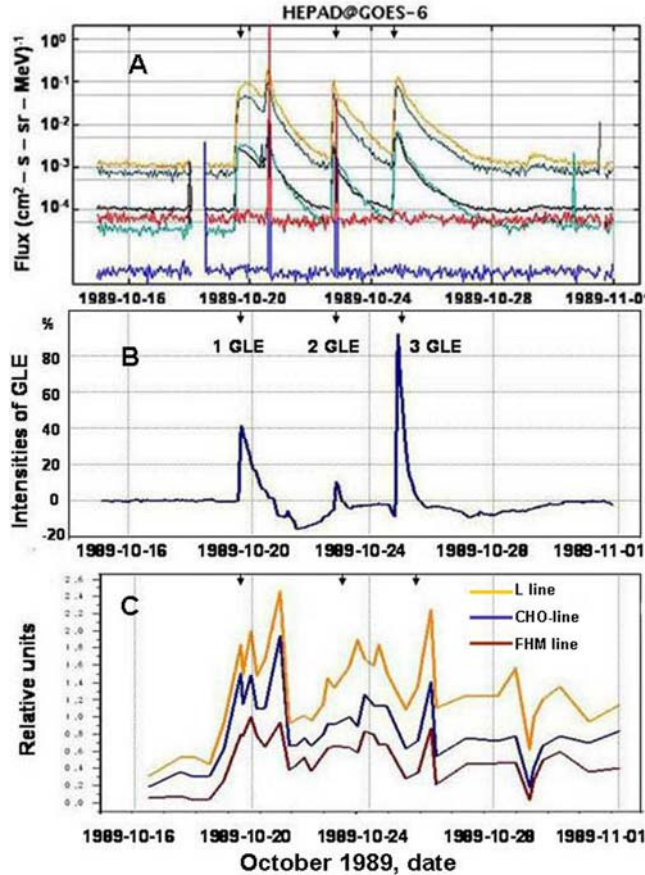


Fig. 5.

coefficients between the MNC indices, protons with energies $>850\text{MeV}$, and neutron count rate [17]. “The three GLEs observed in October 1989 correspond very well with the three main flux onsets and increases in spectrum hardness” [26]. The second arrival (Fig. 5) of more plentiful but lower energy particles dramatically increases the flux [26] is not detected by the neutron monitors, however damages in the cellular line were induced by lower energy particles than during first arrival of most energetic particles. Thus, the cellular and nuclear disorders could be induced by a cascade of secondary particles, which are generated in the upper atmosphere by solar energetic particles with both hard and softer spectra and are able to achieve the Earth’s surface.

The CRs near the Earth’s surface are presented by secondary particles, where more than 97% of hadronic component are neutrons at sea level [27]. Neutrons under interaction with matter produce the recoiling nucleus (charged proton), which is the source of ionizing events. The low-energy protons form densely ionizing tracks (high LET) which are efficient in producing biological injury. Differential energetic neutron fluxes at the depth of the atmosphere 950g/cm^2 have been selected to calculate the neutron fluencies during GLE 43, GLE 44, GLE 45 (Figure 6). Two-component structure of increase of high energy par-

Dynamics of MNC indices have revealed synchronous appearances of DNA damages and identical types of lesions in three cellular lines (Fig. 5). Timing of the dynamics of the MNC-indices (Fig. 5, C), the arrival of fluxes of solar energetic particles detected by the GOES-6 satellite in the Earth’s orbit (Fig. 5, A), and data obtained by the ground-based neutron monitor (Fig. 5, B), show that the increase of the intensity of ionizing radiation on the Earth’s surface in association with solar proton events are additional evidence for a cause-effect relation between solar energetic particles and the revealed phenomena. The first arrival of most energetic particles, which produce a dramatic hardening of the spectrum but not much change in the flux [26] is apparent in the correlation

ticles were detected in solar proton intensity associated with GLE 43, 44, 45. A peak of a short fast (fc) component with following peak of a delayed (dc) component was found during increase of proton intensity in these solar events. Neutron fluxes generated by fast (fc) and by delayed (dc) components of solar protons were separately considered in this research. Differential particle fluxes for

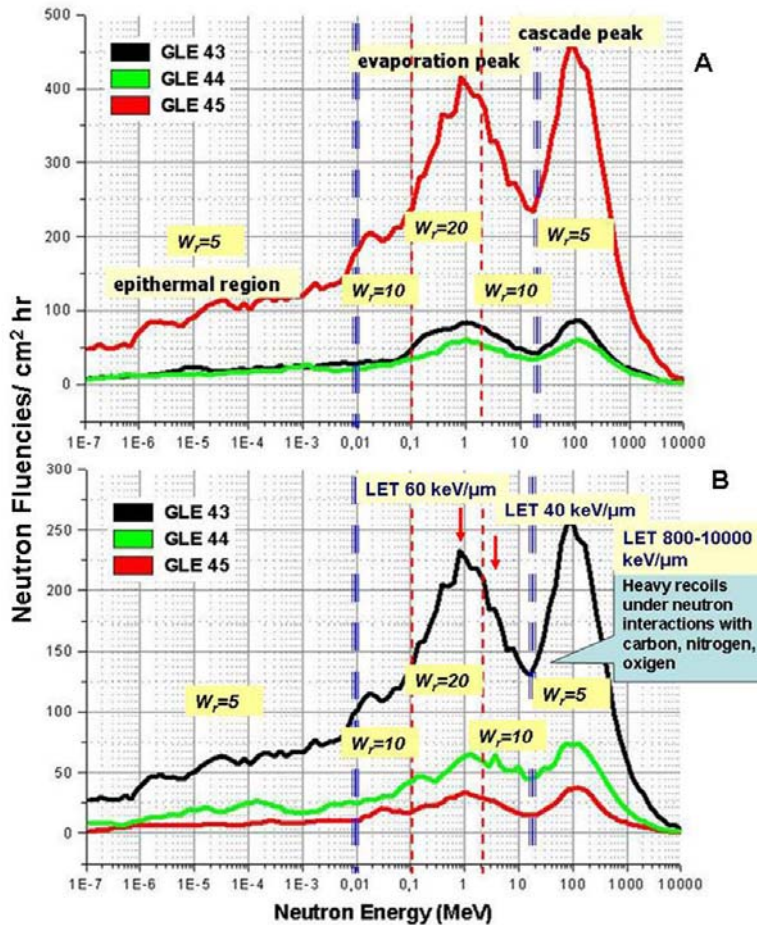


Fig. 6.

The neutron fluencies calculated for fast and for delay components of three GLEs were divided on energy ranges according to type and energy range in Table 1. (Figure 7, A): fast components – red and delay components – blue columns. Separated doses from contributions by fast (red) and by delay (blue) components of neutron energy ranges were assessed according to [15], Figure 7, B. demonstrates contributions of the neutron fluxes with certain energy range from fast and delayed components of solar protons to the Ambient Dose Equivalent per unit neutron fluence, $H^*(10)/\Phi$ (pSv cm² hr). Abscise: 1. < 10 keV, $W_r = 5$; 2. 10 keV to 100 keV, $W_r = 10$; 3. > 100 keV to 2 MeV, $W_r = 20$; 4. > 2 MeV to 20 MeV $W_r = 10$; 5. > 20 MeV, $W_r = 5$; 6. Total Fluence (fast and delay components) (A), total doses of fast and delayed components (B). Ordinate: Neutron density fluxes (neutrons/cm² hr).

the three cases GLE (43, 44, 45) generated by fast and delay components with different RBE expressed across weighting factors (W_r) which correspond to LET are demonstrated in Figure 6. Neutron fluxes generated by fast (A) and delay (B) components of solar particles on latitude of Apatity (67.57° N, 33.40° E, 0.65 GV, 950 g/cm²); W_r –weighting factors corresponding of neutron energy range RBE; LET (keV per micron) of certain neutron energy ranges are shown in the Figure 6.

Table 1 demonstrates correspondence of a certain types and energy ranges to Radiation weighting factors [15].

Table 1.

Type and energy range	Radiation weighting factor
Photons, all energies	1
Electrons and muons ^a , all energies ^b	1
Neutrons, energy:	
< 10 keV	5
10–100 keV	10
0.1–2 MeV	20
2–20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, energy	
> 2 MeV	5
α -particles, fission fragments, heavy nuclei	20

One can see in Figure 9, that neutron fluxes beginning from energy range > 100 keV to 2 MeV ($Wr = 20$) make a significant contribution to Ambient Dose Equivalent per unit neutron fluence in three GLEs. And, if the primary contribution to the Ambient Dose Equivalent in GLE 43 was made by delay component (blue color, Fig.7), so as in GLE 44, the main contribution to Ambient Dose

Equivalent in GLE 45 was contributed by fast component (red color, Fig. 7). By the fact that fast component in GLE 45 had a most hard spectrum, the maximum bio effective-ness of solar proton events was revealed during GLE 45. The data obtained from the analysis of cellular culture state during three cases of GLEs shown the maximum alterations in cellular cultures during GLE 45.

The fragmentation of chromatin (dispersion of DNA), the damage of nucleosomes with their further lysis, a manifestation of super fluidity DNA detectable by merging of the contents of the nuclei in a few cells, multiple tracks from charged particles traversing through the cell monolayer during GLE were found in the cellular cultures. Some of these effects, induced by secondary particles of solar proton events in cellular cultures are shown in Figures 8, 9.

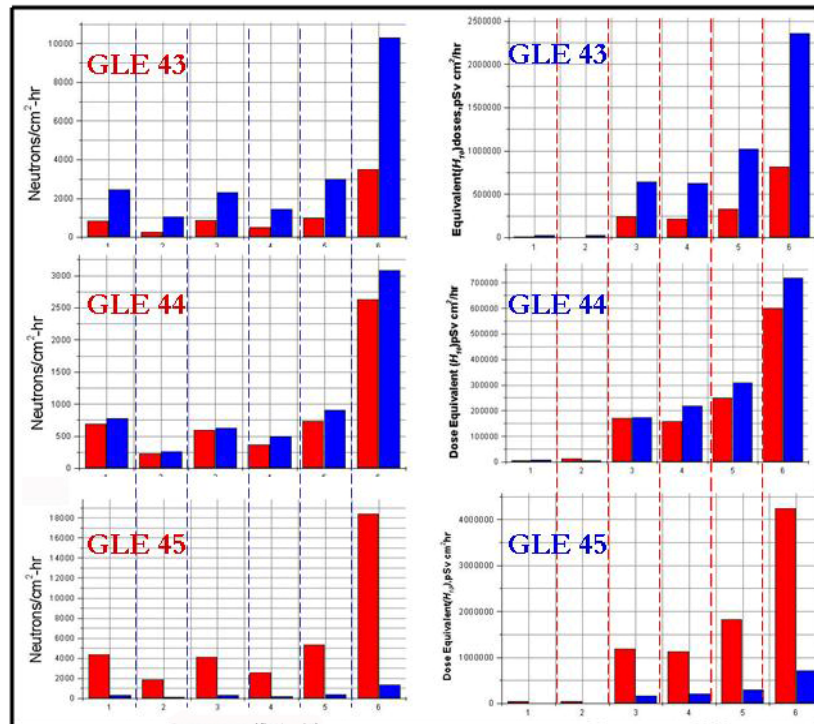


Fig. 7.

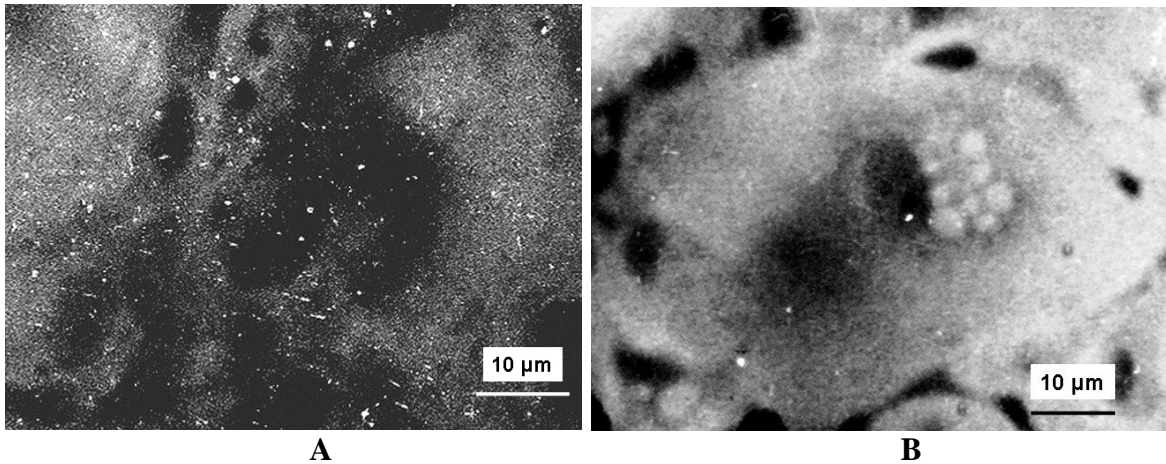
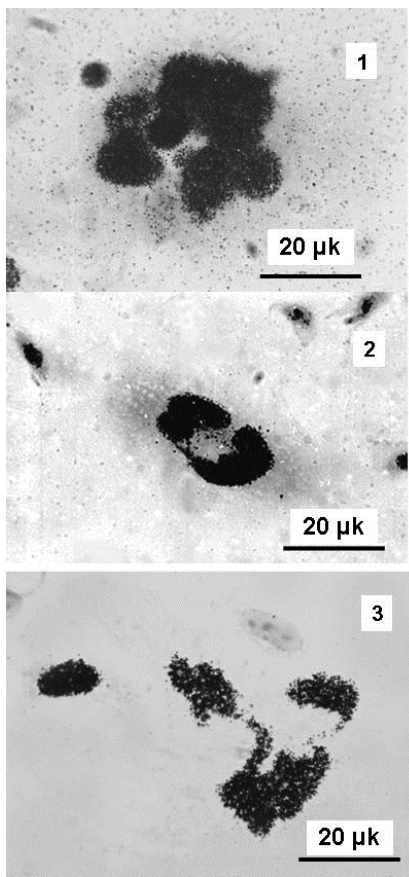


Fig. 8.



DNA damages: 1 L-line, 2- CHO line, 3- FHM line

Fig. 9.

Practically the all structures of cellular nuclei shown in Figure 1 were damaged in the cells which were traversed by charged particles. Figure 8 shows tracks from charged particles in cellular culture FHM line during GLE 45. Holes in nuclei (A) and denaturation of DNA strands with release of energy at the peak of Bragg (evaporation of water in the end of particle way) one can see in Figure 8, (B).

Figure 9 demonstrates diverse DNA damages in the L line (1), CHO line (2), FHM line (3). Multiple DNA damages in cellular cultures during the solar proton events in October 1989 associated with increase of the neutron intensity near the Earth surface are result of the passage of energetic photons, electrons and ions which produces a track of ionized and excited atoms and molecules within the irradiated matter.

Presented data is evidence of high effectiveness of the secondary solar cosmic rays during GLEs. Comparison of the tracks from secondary particles in the own experimental data with images of tracks from heavy charged ions traversing through single cellular nucleus [22]

demonstrated the similarity between exposure of charged particles on the cells in experiments [22] and exposure of secondary cosmic rays on biological objects. Hence one be suggested that particles with high LET radiation, fragments and recoils, as well as the neutrons generated in the nuclear cascade during GLEs could be responsible for the diverse phenomena observed in the cell cultures near the Earth's surface.

Sum fluxes and doses from three GLEs are presented in Table 2. Total fluxes (fc+dc) during GLE 43, 44, 45 were estimated as 13801.7, 5714.1, 19807.1 n/cm²-hr. The summary calculation gives previous estimations of number of particles and ambient dose equivalent during GLE's events: near the 40 000 neutrons in the all energy range per hour have passed through the every cellular monolayer during three GLE events. It is mean, that in average, every second cell were passed by one or several particles. The integral ambient dose equivalent from three cases of GLE consists of about 217 μSv per three days. This is almost half of daily doses which were measured on the board of space stations 535 μSv/day [28] and more than average annual *Effective dose rate* (μSv a⁻¹) under outdoors, altitude adjusted conditions exposure of neutrons (124 μSv a⁻¹).

Table 2.

GLE 43, October 19, 1989	fc+dc n/ cm²-h	microSv cm²/h	microSv cm²/day
>100keV-2 MeV	3196,553	0,892439	21,41854
2-20 MeV	1971,491	0,855875	20,54101
>20 MeV	3986,709	1,359558	32,6294
Total Flux/dose	13801,7	3,172976	76,15142
GLE 44, October 22, 1989			
>100keV-2 MeV	1222,858	0,345826	8,299832
2-20 MeV	870,4813	0,379227	9,10144
>20 MeV	1647,177	0,560509	13,45223
Total Flux/dose	5714,104	1,319835	31,67604
GLE 45, October 24, 1989			
>100keV-2 MeV	4463,907	1,279829	30,71591
2-20 MeV	2792,778	1,20574	28,93775
>20 MeV	5785,201	1,974703	47,39288
Total Flux/dose	19807,1	4,559667	109,432

Effects of daily variations of cosmic rays in ground-based experiments

We have shown that the regular solar-daily variations of cosmic rays and the sporadic increase of their intensity are associated with fluctuations of MNC indices reflecting the dynamics of cellular fusion [29] The studies were performed with continuous cell lines growing *in vitro* : CHO line; FHM line; and RTG line- the rainbow trout (*Salmo gairdneri*) gonad-cells. A comparison of the state of cellular cultures of different origin (fish and hamster) growing under similar conditions, and identical cultures growing under different conditions (at

37° and at 20°) allows identifying universal cellular response on hit of the secondary cosmic rays into cells. The dynamics of cellular culture state were estimated by index of MNC (percentage of MNC in the cellular population).

In the course of the analysis of cellular functional state the multiple lesions associated with cellular nuclear were found. Binuclear cells (BNC), cells with gigantic nuclei (GN), apoptosis (Ap), micronuclei, holes in the distorted cells were revealed (Figure 10). In Figure 10 arrows show the multiple lesions and

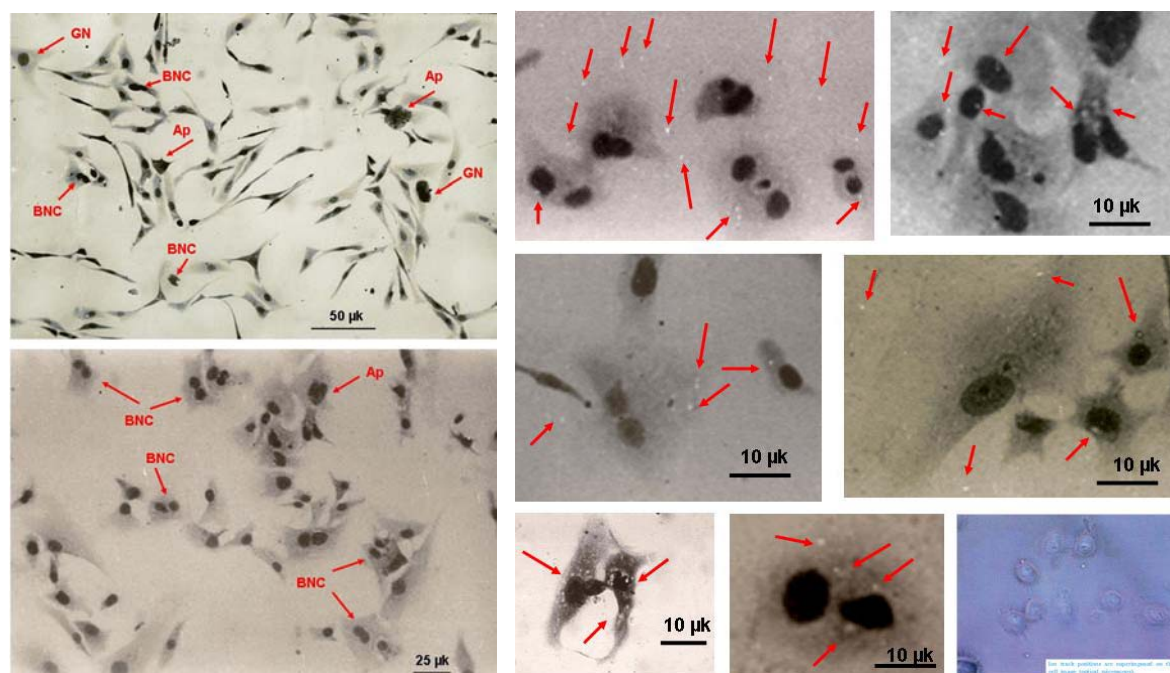


Fig. 10.

“holes” in cellular culture of RTG line. Holes are similar with track of heavy charge particles traversing the cellular samples in the space experiments (blue image in the right corner). Concordance between variations of neutron intensity and dynamics of indices MNC, lesions in cellular nuclei, holes in the cells and cellular environment are evidence of the passage of energetic photons, electrons and ions which produces a track of ionized and excited atoms and molecules within the irradiated matter. Charged particles in the composition of the secondary cosmic rays are detected by tracks arising in result of traversing particles through cellular monolayer.

Figure 11 shows the simultaneous changes in the variations of neutron intensity near the Earth surface and in the dynamics of MNC indices reflecting the cell fusion in the tested cellular lines. The variations in the neutron count rate intensity (Fig. 11; 1) and in the indices of MNC in cellular cultures: (2) CHO line and (3) RTG line growing at 37°C and (4) RTG line growing at room temperature (20°C) on August 19–22 (top picture) and October 12–17, 1990 (bottom picture). The abscissa shows the numbers of corresponding to the dates of experiments: (top picture) August 19 (1,2,3), August 20 (4,5,6), August 21 (7,8), and

August 22 (9,10); (bottom picture) October 12 (1,2,3), October 13 (4), October 15 (5,6), October 16 (7,8), and October 17 (9).

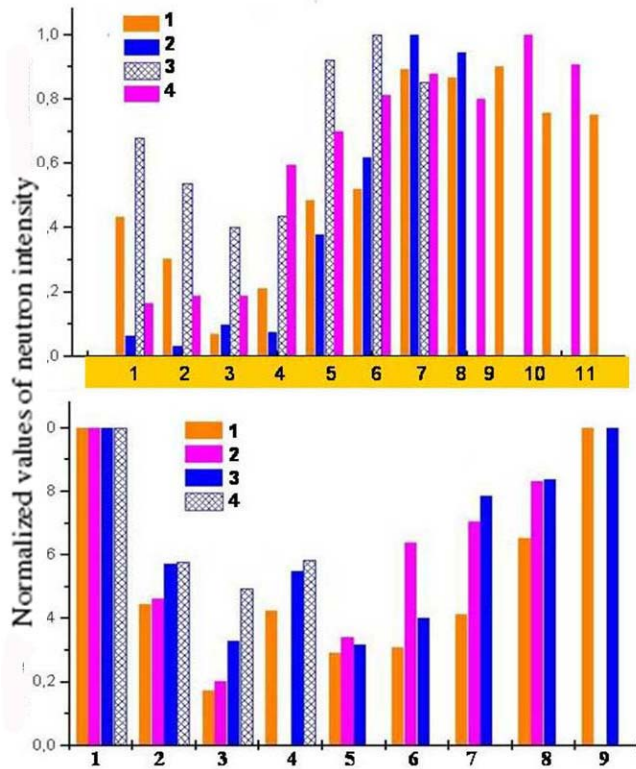


Fig 11.

Thus, we discovered that variations in the intensity of the neutron component of cosmic rays near the earth's surface are accompanied by biological phenomena, which manifests itself as cell fusion in cell cultures. Synchronous cell fusion in the all cell lines irrespective of their origin and culturing conditions is indicative about similar response of cell systems on the exposure of background variations of the neutron component, which may be represented by neutrons of different energy ranges including the neutrons with high LET and high RBE. One can suppose that the tracks from charged particles traversing through cells and cellular nuclei induce cellular fusion.

Conclusions

The direct evidence of effects of CR on biological systems is presented in this report. This evidence has been obtained in the experiments on three cellular lines growing in vitro during solar proton events (SPE) accompanied by three cases of GLEs in October 1989.

Diverse phenomena associated with DNA lesions were found on the three cellular lines: tracks from charged particles traversing through cells, disorders of nuclei, multinuclear cells and cells with gigantic nuclei, micronuclei, apoptosis and other lesions. These disorders one can consider as result of the hit of charged particles from secondary solar cosmic rays in cellular targets.

The dynamics of the formation of multinuclear cells was simultaneous in the three cellular lines, the curves of dynamics coincident with the profiles of solar energetic particles arriving at near Earth space, and the main peaks in the number of multinuclear cells coincident with three cases of GLEs detected by a ground based neutron monitor.

The secondary solar cosmic particles near the Earth surface during GLE events in October 1989 have generated the cascades of ions, including the heavy charge ions and nuclear recoils. These secondaries corresponded to products of

nuclear interactions between fast neutrons and biological matter in the energetic range of the evaporation and the cascade peaks.

The total neutron fluxes during GLEs were calculated on the base of simulation of the particle cascades in the atmosphere by using of the Monte Carlo PLANETOCOSMICS (code GEANT4). Calculation of neutron fluxes gives preliminary estimations of number of particles and ambient dose equivalent during GLE's events (217 $\mu\text{Sv cm}^2$ per three days) that is almost half of daily doses which were measured on the board of space stations 535 $\mu\text{Sv/day}$ [28] and more than average annual Effective dose rate ($\mu\text{Sv a}^{-1}$) under outdoors, altitude adjusted conditions of exposure of neutrons (124 $\mu\text{Sv a}^{-1}$) [9].

The disorders of genetic matter in the three cellular lines, neutron fluxes and ambient dose equivalent are direct evidence of high biological effectiveness of the solar proton events in October 1989.

The degree of expressions of found lesions depend on the intensity of neutron component of the secondary cosmic rays near the Earth's surface.

The tracks from particles traversing through biological objects are evidence that charge particles may be responsible for lesions in the different cells.

Synchronous cell fusion in the all cell lines irrespective of their origin and culturing conditions is indicative of the similar response of cell systems to background variations of the neutron component, which may be represented by neutrons of different energy ranges including the neutrons with high LET and high RBE.

The results of the ground-based experiments on cellular cultures demonstrated the high biological effectiveness of the secondary cosmic rays.

References

1. *Gaisser, T.K.* Cosmic Rays and Particle Physics. Cambridge University Press, Cambridge, 1990.
2. *Shea, M.F. and Smart, D.F.* History of solar proton event observations, in: Proc. Suppl. Nuclear Physics B, 39, 16–25, 1995.
3. *Allkofer O.C., P.K.F. Grieder.* Fachinformationszentrum Energie, Physik, Mathematik, 1984 – 379 p.
4. International Commission on Radiological Protection. 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP 21(1–3). ICRP Publication 60. Pergamon Press, Oxford, 1991.
5. *Florek, M., J. Masarik, I. Szarka et al.* Natural neutron fluence rate and the equivalent dose in localities with different elevation and latitude. Radiat. Prot. Dosim. 67(3): 187–192 (1996).
6. *Nakamura, T., Y. Uwamino and T. Ohkubo.* Altitude variation of cosmic-ray neutrons. Health Phys. 53(5): 509–517 (1987).
7. *Hajnal, F., J.E. McLaughlin, M.S. Weinstein et al.* 1970 sea-level cosmic-ray neutron measurements. HASL-241 (1971).
8. *Hewitt, J.E., L. Hughes, J.B. McCaslin et al.* Exposure to cosmic-ray neutrons at commercial jet aircraft altitudes. p. 855–881 in: Natural Radiation Environment III, Volume 2. CONF-780422 (1980).

9. United Nations. Sources and Effects of Radiation. Vol. I: Sources; Vo. II: United Nations Scientific Committee on of Atomic Radiation, 2000 Report to the Assembly, with scientific annexes: ANNEX B. Exposures from natural radiation sources (156 p.) United sales publications E.00.IX.3 and Nations, New York, 2000.
10. *Kiefer Jü.* The physical basis for the biological action of heavy ions// *New J. Phys.* 10 (2008) 075004. doi:10.1088/1367-2630/10/7/075004
11. *Sverdlov, A.G.* Biologic Action of Neutrons and Chemical Protection, Nauka, Leningrad, 223, 1974.
12. *Akoev, I.G. and Yurov, S.S.* The results of biological experiments in space and biophysical interpretation of hadronic effects, in: Questions of biological effects and dosimetry of heavy charged particles and high-energy hadrons, edited by: I.G. Akoev, Puschino Scientific Center, 126–143, 1984.
13. <http://www2.le.ac.uk/departments/genetics/vgec/schoolscolleges/topics/dna-genes-chromosomes>
14. *Goodhead D.T.* Mechanisms for the Biological Effectiveness of High-LET Radiations// *J. Radiat. Res.*, 40: SUPPL., 1–13 (1999).
15. IAEA Safety Standards Series. Assessment of Occupational Exposure Due to External Sources of Radiation. Safety Guide. No. RS-G-1.3. IAEA. Venna. 1999. 89 p.
16. *Maurchev E.A., Yu.V. Balabin, E.V. Vashenyuk and B.B. Gvozdevsky.* Transport of solar protons through the atmosphere during GLE // 2013 *J. Phys.: Conf. Ser.* **409** 012200 doi:10.1088/1742-6596/409/1/012200
17. *Belisheva N.K., H. Lammer, H.K. Biernat, and E.V. Vashenyuk.* The effect of cosmic rays on biological systems – an investigation during GLE events// *Astrophys. Space Sci. Trans.*, 8, 7–17, 2012 www.astrophys-space-sci-trans.net/8/7/2012/
18. *Holley, W.R. and Chatterjee, A.* Clusters of DNA Damage Induced by Ionizing Radiation: Formation of Short DNA Fragments. I. Theoretical Modeling// *Radiat. Res.* 145, 188–199 (1996).
19. *Nikjo H., I.P. O'Neill, W.E. Wilson and D.T. Goodhead.* Computational Approach for Determining the Spectrum of DNA Damage Induced by Ionizing Radiation// *RADIATION RESEARCH* 156, 577–583 (2001).
20. *Hall E.J, and T.K Hei.* Genomic instability and bystander effects induced by high-LET radiation// *Oncogene* (2003) 22, 7034–7042.
21. *Goodhead D.T.* Energy deposition stochastics and track structure: what about the target?// *Radiation Protection Dosimetry* (2006), Vol. 122, No. 1–4, pp. 3–15. doi:10.1093/rpd/ncl498 Advance Access publication 2 February 2007.
22. *Jakob B., J. Splinter, M. Durante, and G. Taucher-Scholz.* Live cell microscopy analysis of radiation-induced DNA double-strand break motion // *PNAS*, 2009, March 3, vol. 106, no. 9, P. 3172–3177.
23. *Friedland W., Michael Dingfelder, Pavel Kunderát, Peter Jacob.* Track structures, DNA targets and radiation effects in the biophysical Monte Carlo simulation code PARTRAC//*Mutation Research* 711 (2011) 28–40.
24. *Alloni D., A. Campa, W. Friedland, L. Mariotti & A. Ottolenghi.* Track structure, radiation quality and initial radiobiological events: Considerations based on the PARTRAC code experience// *International Journal of Radiation Biology*, January–February 2012; 88(1–2): 77–86.
25. IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to human. Ionizing Radiation, Part 1: X- and Gamma (γ)-Radiation, and Neutrons. Vol. 75 Lyon, 26 May–2 June 1999. 2000.
26. *Reeves, G.D., Cayton, T.E., Gary, S.P., and Belian, R.D.* The great solar energetic particle events of 1989. Observed from geosynchronous orbit, *J. Geophys. Res.*, 97, 6219–6226, 1992.

27. Ziegler, J.F. Terrestrial cosmic rays, IBM, J. Res. Develop., 40,19–39, 1996.
28. Reitz G., R. Beaujean, E. Benton, S. Burmeister, Ts. Dachev, S. Deme, M. Luszik-Bhadra and P. Olko. Space radiation measurements on – board ISS – THE DOSMAP EXPERIMENT//Radiation Protection Dosimetry (2005), Vol. 116, No. 1–4, pp. 374–379.
29. Belisheva N.K., B.M. Kuzhevskii, E.V. Vashenyuk, and V.K. Zhirov. Correlation between the Fusion Dynamics of Cells Growing in vitro and Variations of Neutron Intensity near the Earth's Surface. Doklady Biochemistry and Biophysics. 2005. V. 402. P. 254–257.

Summary

A direct evidence of biological effects of cosmic rays (CR) near the Earth surface was demonstrated in experiments with three cellular lines growing in culture during three events of Ground Level Enhancement (GLEs 43,44,45) in the neutron count rate detected by ground-based neutron monitor in October 1989 and during a quiet period in August, October 1990. Time coincidence of numerous disorders of nuclear substances in three cell lines with solar proton events and Ground Level Enhancement gives the basis to consider the increase of secondary components of solar cosmic rays as a reason of revealed phenomena. The simulation of particle cascades in the atmosphere by using the Monte Carlo PLANETOCOSMICS code based on GEANT4, solar proton data (GOES 6, GOES 7), ground-based neutron monitors observations were used for calculation of particle fluencies at the latitude of the Apatity (67.57 N, 33.40 E, 0.65 GV, 950 g/cm²). Neutron fluxes generated by fast (fc) and by delayed (dc) components of solar particles in three events were taken for consideration. The drastic increase of neutron fluencies near the Earth surface at the Apatity latitude was found during three GLEs. Total fluxes (fc+dc) during GLE 43, 44, 45 were estimated as 13801.7, 5714.1, 19807.1 n/cm²-hr. The integral ambient dose equivalent from three cases of GLE consists of about 217 μSv per three days, that is almost half of daily doses on the board of space stations 535 μSv/day and more than average annual effective dose rate under outdoors, altitude adjusted conditions exposure of neutrons (124 μSv a⁻¹). Synchronous cell fusion in the all cellular lines irrespective of their origin and culturing conditions during quiet period in August and October 1990 confirms the high biological effectiveness of the secondary cosmic rays.

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НИЗКОЙ ЧАСТОТЫ НА ДНК ТЕСТОВЫХ КЛЕТОЧНЫХ СТРУКТУР

Текуцкая Е.Е.¹, Барышев М.Г.¹, Вишневский В.В.²

¹ФГБОУ ВПО «Кубанский государственный университет», Краснодар, Россия

²Институт проблем математических машин и систем НАН Украины, Киев

Интерес к проблеме слабых воздействий на живые системы подогревается результатами экспериментальных работ, в которых биологическая активность изучаемых факторов сохраняется при их малой интенсивности. Электромагнитное поле низкой частоты (ЭМП НЧ) используется для изменения скорости ряда важных биохимических процессов: репарации отдельных участков ДНК с выделенными соматическими мутациями; генерации активных форм кислорода нейтрофилами; изменение уровня содержания цитокинов и др.

Между тем, до сих пор отсутствует надежная система в наблюдениях биофизических эффектов электромагнитных полей, наблюдается их нерегулярность и кажущаяся противоречивость [1]. Большинство работ оставляет неизвестным первичный молекулярно-биологический «приемник» электромагнитного излучения и всю последовательную причинно-следственную связь между этим приемником и биохимическим или физиологическим откликом.

Так, до сих пор не решен вопрос, является ли ЭМП НЧ нетеплового уровня воздействия стрессором для биологических систем и, соответственно, может ли такое воздействие запускать адаптивные реакции в клетках?

Объектом исследования данной работы были ДНК, выделенные из тестовых клеточных структур *Saccharomyces cerevisiae* из украинской коллекции, штамм У-517, дикого типа. Выбор данной культуры в качестве сенсора ЭМП НЧ обусловлен способностью клеток реагировать на гелиогеофизические возмущения изменением цвета структурно-морфологических образований протоплазмы – волютиновых гранул (полифосфатов) при окрашивании метиленовым синим. Данное явление (эффект Чижевского-Вельховера) положено в основу крупномасштабного биофизического эксперимента «Гелиомед» [2]. Подробное описание проекта даны на сайте «Гелиомед» <http://heliomed.immsp.kiev.ua>.

Материалы и методы

ДНК из биопроб выделяли с помощью реактивов готовых коммерческих наборов АмплиСенс – «ДНК–сорб–В» (Москва). Концентрацию ДНК в растворе определяли спектрофотометрически, используя коэффициент экстинкции, равный $E_{260\text{нм}} = 200$.

Выделение ДНК из тестовых клеточных структур *Saccharomyces cerevisiae* производилось в стерильном ламинарном боксе «БАВп-01-Ламинар», оснащенный термостатом для пробирок типа «эппендорф», вакуумным отсасывателем для удаления надосадочной жидкости, вортексом, микроцентрифугой, набором автоматизированных дозаторов «Ленлипет».

В качестве исследуемого материала для выделения ДНК были отобраны следующие пробы: положительный контроль выделения, отрицательный контроль выделения и внутренний контроль выделения, представляющий собой стандартные образцы. Объем каждой пробы составил 0,1 мл.

В случае с клеточной культурой *Saccharomyces cerevisiae* объем взятого лизирующего раствора был увеличен вдвое, что обосновано наличием у данной культуры плотных хитиновых стром, плохо поддающихся лизису. Отобранные и подготовленные описанным выше способом пробы подвергались тщательному ресуспензированию на вортексе и дополнительному ресуспензированию на микроцентрифуге при 12000 об/мин в течение 5 мин. После чего во все пробы вносился сорбент универсальный с последующим центрифугированием при 5000 об/мин. Данная процедура использовалась для удаления фрагментов клеточных органелл и мембран. После этого надосадочная жидкость удалялась с помощью вакуумного отсасывателя. Затем в пробы добавлялись последовательно растворы для отмывки полученного осадка.

В дальнейшем пробы просушивались при температуре 65°C в течение 5–10 минут, после чего добавлялось по 50 мкл ТЕ-буфера для элюции ДНК. Полученная жидкость вновь ресуспензировалась на вортексе и просушивалась в термостате около 5 минут при температуре 65°C, снова центрифугировалась уже при 12000 об/мин в течение 1 минуты. После проделанных процедур надосадочная жидкость содержала очищенную ДНК, которая отделялась от осадка с помощью вакуумного отсасывателя.

Снятие спектров водных растворов ДНК, выделенной из клеток *Saccharomyces cerevisiae*, проводилось методом ИК-спектроскопии. Основанием для выбора данного метода исследования послужило то обстоятельство, что метод ИК-спектроскопии дает возможность получить сведения об относительных положениях молекул в течение очень коротких промежутков времени, а также оценить характер связей между ними, что является принципиально важным при изучении структурно-информационных свойств водных систем. Так, наиболее чувствительным методом изучения физики кластеров в воде $(H_2O)_n$ оказалась именно ИК-спектроскопия [4].

Для облучения водных растворов ДНК, выделенной из клеток *Saccharomyces cerevisiae*, применялся источник низкочастотных сигналов – генератор сигналов ГЗ-118. Генератор сигналов ГЗ-118 представляет собой низкочастотный генератор РС-типа с дискретной установкой частоты в пределах каждого из пяти поддиапазонов.

Сопротивление катушки индуктивности, применяемой в генераторе, в качестве источника электромагнитного поля составило 320 Ом. Напряженность поля в месте нахождения образца составляла 30–100 мкТл. Нестабильность частоты в диапазоне от 7 до 9,2 Гц достигала 0,2 %.

Облучение водных растворов ДНК с концентрацией 30 мкг/мл ЭМП НЧ проводили в закрытой химически чистой стерильной пластиковой посуде в экранированной камере. Время облучения составляло 10 мин. Обработка водных растворов ДНК осуществлялась сверхдлинным электромагнитным излучением на частотах от 5 до 20 Гц с шагом 0,2 Гц при температуре 4°C. Толщина облученного слоя для всех исследуемых образцов составила 2 мм. После каждой обработки образца с помощью ЭМП НЧ снимались ИК-спектры полученных растворов ДНК для каждой выделенной частоты.

ИК-спектры регистрировались на ИК-Фурье спектрометре Tensor 27 (Bruker) в спектральном диапазоне 4000–500 см⁻¹. Соотношение сигнал/шум при 1 мин сканирования при разрешении 4 см⁻¹ с применением аподизации Blackman-Harris было не менее 45000: 1; минимальное спектральное разрешение не более 0,9 см⁻¹.

Результаты и обсуждение

Для жидкой воды наиболее изучена область основных частот ИК-спектров. Так для мономерной воды полосы 3725 см⁻¹ и 3627 см⁻¹ отнесены к симметричному и антисимметричному колебаниям ОН-группы, а полосы 1600 см⁻¹ – к деформационному колебанию молекулы Н-О-Н [5].

На полученных ИК-спектрах водных растворов ДНК, выделенных из клеточных культур *Saccharomyces cerevisiae*, без облучения наблюдалось несколько пиков поглощения (см. рисунок). Пик 1645 см⁻¹ обусловлен деформационными колебаниями Н – О – Н; 2125 см⁻¹ соответствует трансляционным и либрационным (крутильным) колебаниям молекул воды; 3490 см⁻¹ – валентным симметричным и ассиметричным (второй максимум на 3620 см⁻¹) колебаниям молекул воды.

При облучении водных растворов ДНК ЭМП НЧ на данных ИК-спектрах ДНК наблюдалось появление новых полос поглощения в диапазонах 1100–1000 см⁻¹, при этом происходило расщепление пика в указанной области. Как видно из рисунка, величины пиков поглощения ДНК, выделенной из клеточной культуры *Saccharomyces cerevisiae*, находятся на частотах 445 см⁻¹ (1 пик) и 1087 см⁻¹ (2 пик), что соответствует областям крутильных и деформационных колебаний для водных растворов.

Данные пики проявляются в спектральной области, которую принято связывать с надмолекулярными типами возбуждения водных растворов [4]. Согласно работе А.А. Яковенко и соавторов [5] в диапазоне (900–1100 см⁻¹) наблюдается пик поглощения, который может представлять собой обертоном комбинации валентных и деформационных колебаний молекулы воды.

Построены зависимости высот данных пиков от частоты применяемого ЭМП. Из полученных зависимостей был сделан вывод, что наибольшее влияние на водные растворы ДНК, выделенной из клеток *Saccharomyces cerevisiae*, оказывает частота ЭМП 8 Гц, близкая к так называемой частоте Шумана.

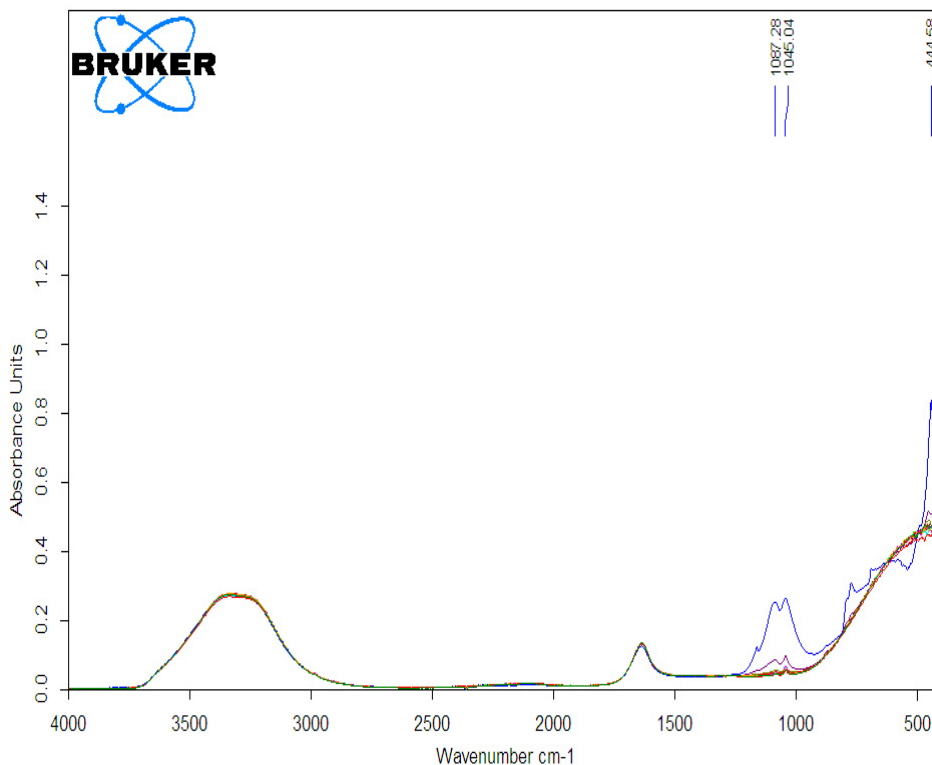


Рисунок. ИК-спектры водных растворов ДНК, выделенной из дрожжей *Saccharomyces cerevisiae*, облученные ЭМП НЧ, при 4°C.

Ранее нами [6, 7] было установлено, что именно водная среда играет важную роль в электромагнитном воздействии на клеточные культуры *Saccharomyces cerevisiae*. Электромагнитным полем воздействовали непосредственно на клетки *Saccharomyces cerevisiae*, находящиеся в питательной среде или вначале обрабатывали стерильную дистиллированную воду, а затем в нее добавляли питательные вещества и высевали клетки. Сравнение результатов изменения количества жизнеспособных клеток при опосредованном и прямом воздействии ЭМП НЧ на данные культуры показало, что концентрация микроорганизмов изменяется в зависимости от частоты воздействующего поля, характер данных зависимостей в обоих случаях аналогичен, максимальная концентрация *Saccharomyces cerevisiae* наблюдается при частоте ЭМП, равной 8 Гц.

На наш взгляд, первопричиной обнаруженных эффектов, возможно, является действие магнитного поля на перенос протонов по цепочкам водородных связей. Обработка воды магнитным полем приводит к образованию дополнительных водородных связей в воде и к длительному периоду

перехода системы из неравновесного в исходное состояние. Такие переходы сопровождаются изменением параметров колебаний молекул.

Можно предположить, что водная среда изменяет свои свойства при действии ЭМП НЧ, что приводит как к изменению гидратных оболочек ДНК, так и к генерации перекисей [8, 9]. В этих условиях связи в молекулах ДНК в большей степени становятся подвержены атакам окружающих их молекул воды или перекисей. Связывание ОН-групп (уширение полос в ИК-спектрах и появление новых пиков) вызывает изменение рН растворов, что приводит к разрывам водородных связей в молекулах ДНК, нарушению стейкинга ее оснований, изменению конформации спирали. Возможно, состояние и структурная динамика отдельных участков ДНК, происходящих под воздействием слабых электромагнитных излучений, оказывают существенное влияние и на изменение активности генов в промоторных районах, участвующих в регуляции клеточного цикла *S.cerevisiae* в целом и на состояние волютиновых гранул (полифосфатов).

Говоря о роли неорганических полифосфатов, следует отметить, что фосфор, являясь жизненно важным элементом в клетке, был вовлечен в самые ранние стадии предбиологической эволюции и возникновения жизни на Земле [10]. Мнение о том, что полифосфаты, образовавшиеся в результате геотермальной деятельности, могли бы использоваться примитивными киназами для древнейших процессов трансдукции энергии, поддерживается и другими авторами [11]. Когда Земля на ранних этапах добиологической эволюции имела высокую температуру, мог происходить абиогенный синтез полифосфатов [10].

При появлении в достаточных количествах абиогенно синтезированных нуклеозидфосфатов (АТФ), возникла тесная связь между полифосфатами, пирофосфатом и нуклеозидфосфатами, которая выражалась в разнообразных реакциях трансфосфорилирования. Мог возникнуть мир РНК-ДНК, в котором поли- и пирофосфаты продолжали играть роль энергетического и фосфорного донора. Количество синтезированного полифосфата увеличивалось в условиях, когда синтез АТФ был каким-то образом подавлен. Таким образом, при неблагоприятных условиях даже у более эволюционно молодых микроорганизмов может происходить возвращение к архаическим способам резервирования энергии.

Имея разные свойства по отношению к гидратационной оболочке макромолекул, ЭМП НЧ способно существенно влиять на равновесные концентрации функционально важных состояний биологических макромолекул (ДНК-РНК) *in vivo* и таким образом способно оказывать влияние на функциональные метаболические свойства биосистем в целом.

Работа поддержана совместным российско-украинским грантом укр_а №14-02-90424 «Роль нормальных и экстремальных гелиогеофизических процессов в эволюции биосферы».

Литература

1. Бучаченко А.Л., Кузнецов Д.А., Бердинский В.Л. Новые механизмы биологических эффектов электромагнитных полей // Биофизика. 2006. Т. 58. Вып. 6. С. 933–941.
2. Коллективная монография «Биотропное воздействие космической погоды» / под ред. М.В. Рагульской. – СПб: Изд-во ВВМ. 2010. 330 с.
3. *Buck U., Huicken F.* Infrared spectroscopy of size-selected water and methanol clusters // Chem. Rev. 2000. V. 100. N 11. P. 305–312.
4. *Bhat S., Herrmann J., Armishaw P. etc.* Single molecule detection in nanofluidic digital array enables accurate measurement of DANN copy number // Anal. Bioanal. Chem. 2009. V. 394. P. 457–467.
5. Яковенко А.А. О структуре колебательных спектров поглощения воды в видимом диапазоне // Биофизика. 2002. Т. 47. Вып. 6. С. 965–969.
6. *Барышев М.Г., Васильев Н.С., Джумак С.С.* Исследование влияния магнитообработанной воды на *Saccharomyces cerevisiae* // Вестник РУДН. Серия Экология и безопасность жизнедеятельности. 2009. № 2. С. 22–25.
7. *Tekutskaya E.E., Barishev M.G.* Study of influence of the low-frequency electromagnetic field on DNA molecules in water solutions // Odessa Astronomical Publications. 2013. V. 26, Is. 2. P. 303–306
8. *Tekutskaya E.E., Barishev M.G., Singur Z.N. etc.* Research of the DNA water solutions processed by the weak electromagnetic field // New Information Technology in Medicine, biology, pharmacology and Ecology: Abstr. for the XXI International conferention. 2014. Gurzuf. P. 123–125.
9. *Пеньков Н.В. и др.* Об особенностях молекулярной релаксации в водных растворах // Биофизика. 2013. Т. 58. Вып. 6. С. 933–941.
10. *Кулаев И.С., Вагабов В.М., Кулаковская Т.В.* Высокомолекулярные неорганические полифосфаты: биохимия, клеточная биология, биотехнология. М.: Научный мир. 2005. 216 с.
11. *Cavalier-Smith T.* Obcells as proto-organisms: membrane heredity, lithophosphorylation and the origins of the genetic code, the first cells and photosynthesis // J. Mol. Evol. 2001. V. 53. P. 555–595.

RESEARCH OF INFLUENCE OF ELECTROMAGNETIC RADIATION OF LOW FREQUENCY ON THE DNA OF TEST CELL STRUCTURE

Tekutskaya E.E., Barishev M.G., Vishnevsky V.V.

The Kuban state university, Krasnodar, Russia

In IR spectrums of the DNA water solutions emitted cages of *Saccharomyces cerevisiae*, after their radiation of EMP LF, observed emergence of new peaks in areas 460–450 cm^{-1} (the 1st peak) and 1100–1000 cm^{-1} which sizes depended on the frequency of EMP applied to radiation and on temperature. Dependences of height of these peaks on the frequency of EMP from which it is visible are constructed that the greatest influence on the DNA solutions emitted from cages of *Saccharomyces cerevisiae*, renders EMP with a frequency 8,0 Hz.

ОТКЛИК СЕРДЕЧНО-СОСУДИСТОЙ СИСТЕМЫ ЛЮДЕЙ С РАЗЛИЧНЫМ СОСТОЯНИЕМ АДАПТАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ КОСМИЧЕСКОЙ ПОГОДЫ

Самсонов С.Н.¹, Маныкина В.И.¹, Паршина С.С.²

¹*Институт космических исследований и астрономии им. Ю.Г. Шафера СО РАН,
Россия*

²*Саратовский государственный медицинский университет им. В.И. Разумовского
Министерства здравоохранения России*

Введение

В конце 20 века после начала полетов космических аппаратов, изменяющих параметры потоков частиц, электромагнитных полей и излучений, появилось понимание того, что представляет собой околоземное космическое пространство и каким образом поля, частицы и излучения могут достигать той или иной области околоземного космического пространства и оказывать влияние на жизнь на Земле. А в начале нашего века появился термин «космическая погода», характеризующий состояние околоземного космического пространства. Основное влияние на состояние околоземного космического пространства оказывает Солнце. Поэтому выявление механизмов связи между активностью Солнца и функционированием различных объектов биосферы, включая человека, является одной из фундаментальных проблем современной науки.

Организм человека представляет собой открытую систему, поэтому изменение условий во внешней среде оказывает влияние на его жизнедеятельность. Сердечно-сосудистая система (ССС) одна из первых включается в процесс адаптации к изменяющимся внешним условиям. Помимо явно влияющих факторов внешней среды, таких как метеорологические и социальные, было обнаружено, что не регистрируемые чувствами человека электрические и магнитные поля, электромагнитные излучения могут оказывать влияние на его самочувствие. Поэтому целью настоящей работы было изучение влияния параметров космической погоды на состояние ССС человека с различными вариантами адаптации (нормальным и ослабленным).

Влияние параметров космической погоды на состояние сердечно-сосудистой системы у лиц с нормальным вариантом адаптации

Эксперимент проводился одновременно в 3 пунктах наблюдения: Якутск (Россия), Киев (Украина) и Симферополь (Украина) на одном и том же оборудовании (датчик Фазаграф) по единому протоколу исследования на группе добровольцев, набираемых в каждом пункте наблюдения в течение ноября–декабря 2008 г. Функциональное состояние сердечно-

сосудистой системы оценивалось по такому показателю ЭКГ, как коэффициент симметрии Т-зубца (КСТ). Более подробно об использовании симметрии Т-зубца для оценки состояния ССС человека и о работе комплекса Фазаграф можно ознакомиться в работах [1, 2]. Таким образом, на каждого пациента был получен индивидуальный ряд данных за весь период эксперимента. Сравнение временных вариаций КСТ каждого испытуемого с временными вариациями индекса геомагнитной возмущенности показало совпадение этих показателей у части испытуемых. Показано, что у 47,6% испытуемых наблюдались временные изменения КСТ, совпадающие с изменениями индекса геомагнитной возмущенности.

В отличие от этого, в Киеве и Симферополе все испытуемые показали совпадение вариаций КСТ с изменениями уровня геофизической возмущенности, как в состоянии покоя, так и после эмоциональной и физической нагрузок.

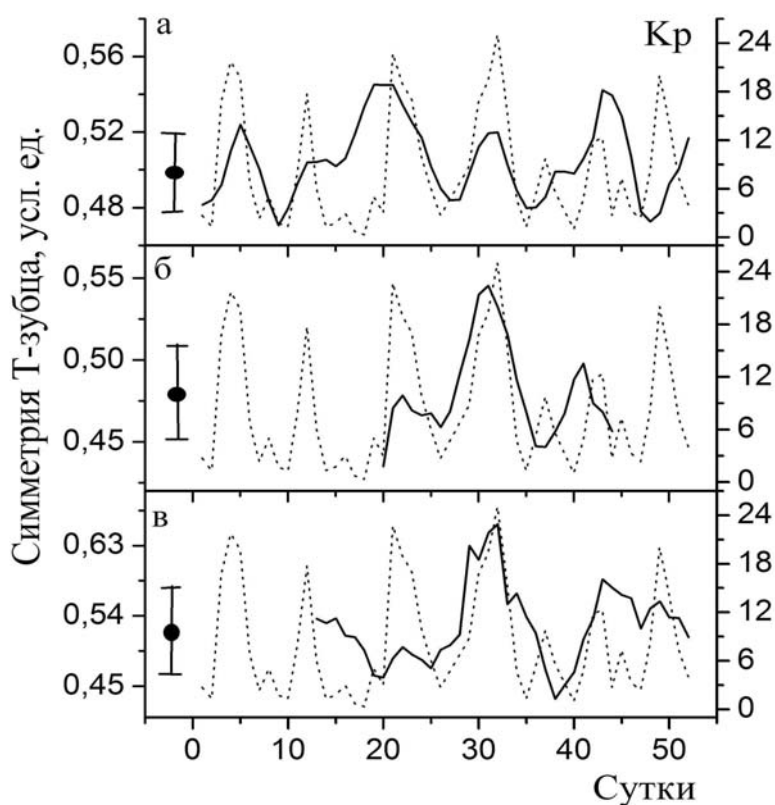


Рис. 1. Временные вариации коэффициента симметрии Т-зубца ЭКГ (сплошная линия) и Кр-индекса геомагнитной возмущенности (штриховая линия) в Якутске (а), в Киеве (б) и в Симферополе (в).

На рис. 1 по оси ординат приведены усредненный показатель симметрии Т-зубца ЭКГ испытуемых в относительных единицах (сплошная линия) и индекс геомагнитной возмущенности (штриховая линия), а по оси абсцисс время в сутках с начала эксперимента. Сверху вниз показаны данные Якутска, Киева и Симферополя. σ – среднее квадратическое отклоне-

ние. Из рисунка видно, что практически на каждое изменение геомагнитной возмущенности организм испытуемых во всех пунктах измерений отвечает подобными изменениями в КСТ, но с различным соотношением амплитуд. Такое совпадение наблюдается даже при низких уровнях геомагнитной возмущенности (геомагнитное поле считается возмущенным, если суточная величина Кр-индекса превышает 18 отн. ед.). Таким образом, наблюдается глобальное воздействие на ССС человека в пунктах наблюдения, удаленных на расстояние порядка 6000 км друг от друга.

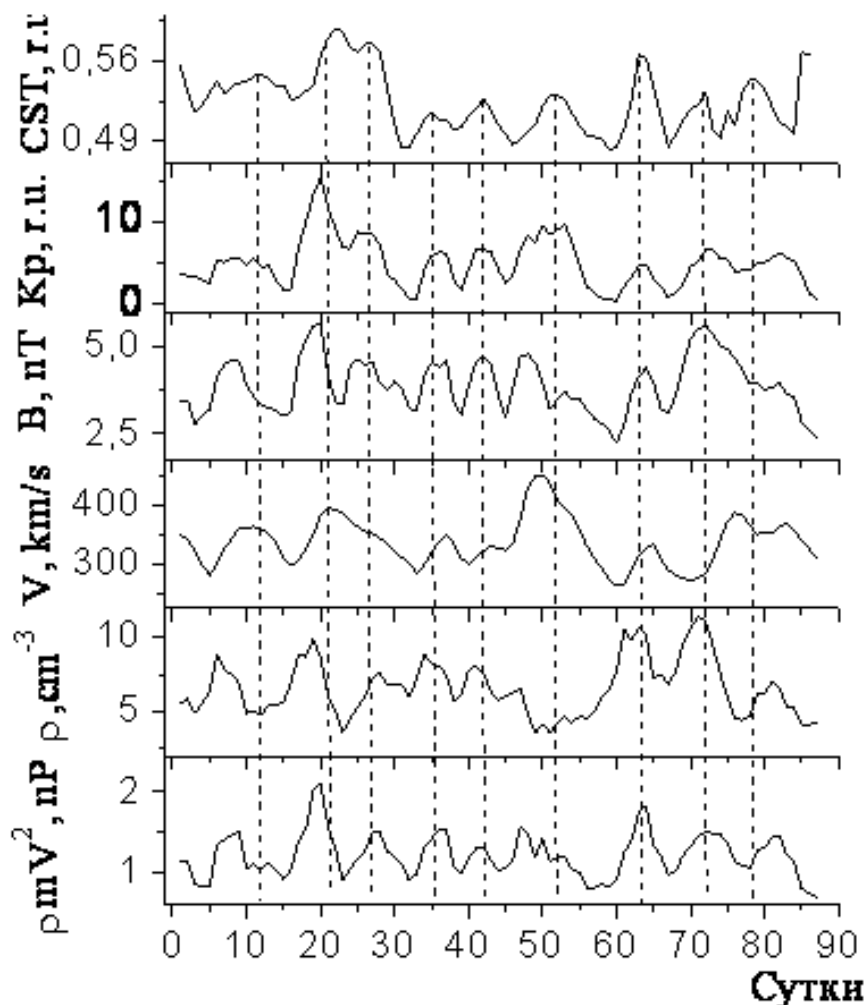


Рис. 2. Изменение состояния сердечно-сосудистой системы групп добровольцев в Якутске и параметров космической погоды (5 октября – 30 декабря 2009 г.).

На рисунке 2 представлены изменения состояния сердечно-сосудистой системы КСТ группы добровольцев в Якутске, а также параметры космической погоды: Кр-индекс геомагнитной возмущенности, В-полный вектор межпланетного магнитного поля, V – скорость солнечного ветра, ρ – плотность частиц солнечного ветра, $\rho m V^2$ – динамическое давление солнечного ветра (m – масса протона).

Как видно из этих рисунков, практически все максимумы (88%) и минимумы (88%) приведенных параметров совпадают по времени появления с такими же максимумами и минимумами в групповой реакции КСТ добровольцев. Такое практически полное совпадение наблюдалось для половины групп добровольцев. Другая половина добровольцев показала частичное совпадение КСТ с параметрами космической погоды. Наиболее лучшее совпадение наблюдается для КСТ с полным вектором межпланетного магнитного поля, динамическим давлением солнечного ветра и Кр-индексом геомагнитной возмущенности. К примеру, коэффициент корреляции между КСТ в Якутске и Кр-индексом составил 0,55, и это при условии того, что КСТ представляет собой не показатель одного человека, а усредненную величину (групповой параметр) половины добровольцев, участвующих в эксперименте.

Известно, что организм человека реагирует на изменения обычной земной погоды. Для того чтобы убедиться в том, что в данном исследовании обычная земная погода оказывала или не оказывала влияние на состояние ССС добровольцев, сравним их изменения с изменениями параметров обычной земной погоды.

На рисунке 3 показаны изменения состояния ССС половины группы добровольцев в Якутске с метеопараметрами ($f\%$ – влажность, V – скорость ветра, T – температура и P – давление приземной атмосферы). Как видно из этих рисунков наблюдается совпадение отдельных изменений каждого из метеопараметров с КСТ, что означает наличие в рассматриваемый период, в лучшем случае, лишь частичного влияния абсолютных значений метеопараметров на ССС человека. Полученные результаты подтверждаются нашими предшествующими исследованиями [3], в которых было показано, что спектры мощности параметров космической погоды и состояния сердечно-сосудистой системы показали полное подобие, в то время как спектры мощности параметров обычной приземной погоды не показали такого подобия, что подтверждает именно влияние параметров космической погоды, а не приземной погоды на ССС человека в рассматриваемый период наблюдения.

Исследование связи параметров космической погоды с состоянием ССС здоровых лиц на основании таких экспериментальных фактов, как:

- временное совпадение максимумов и минимумов в изменениях параметров космической погоды (без сохранения соотношения амплитуд) с изменениями КСТ, характеризующего состояние ССС человека в Якутске, Киеве и Симферополе;
- совпадение лишь отдельных максимумов и минимумов в изменениях метеопараметров с изменениями КСТ в Якутске;
- наличие совокупности совпадающих периодов в спектрах мощности параметров космической погоды и КСТ;

- отсутствие совокупности совпадающих периодов в спектрах мощности метеопараметров и КСТ

позволяет сделать вывод, что именно параметры космической погоды, такие как скорость и плотность солнечного ветра, полный вектор межпланетного магнитного поля, трансформирующиеся в магнитосфере Земли в геомагнитную возмущенность, оказывают влияние на ССС здоровых лиц. При этом у здоровых добровольцев, находившихся под наблюдением, не отмечалось изменения субъективного состояния и появления каких-либо жалоб. Это свидетельствует о том, что долгий эволюционный путь развития человечества позволяет здоровому человеку компенсировать за счет резервных возможностей организма воздействие космической погоды без явного ущерба для его здоровья.

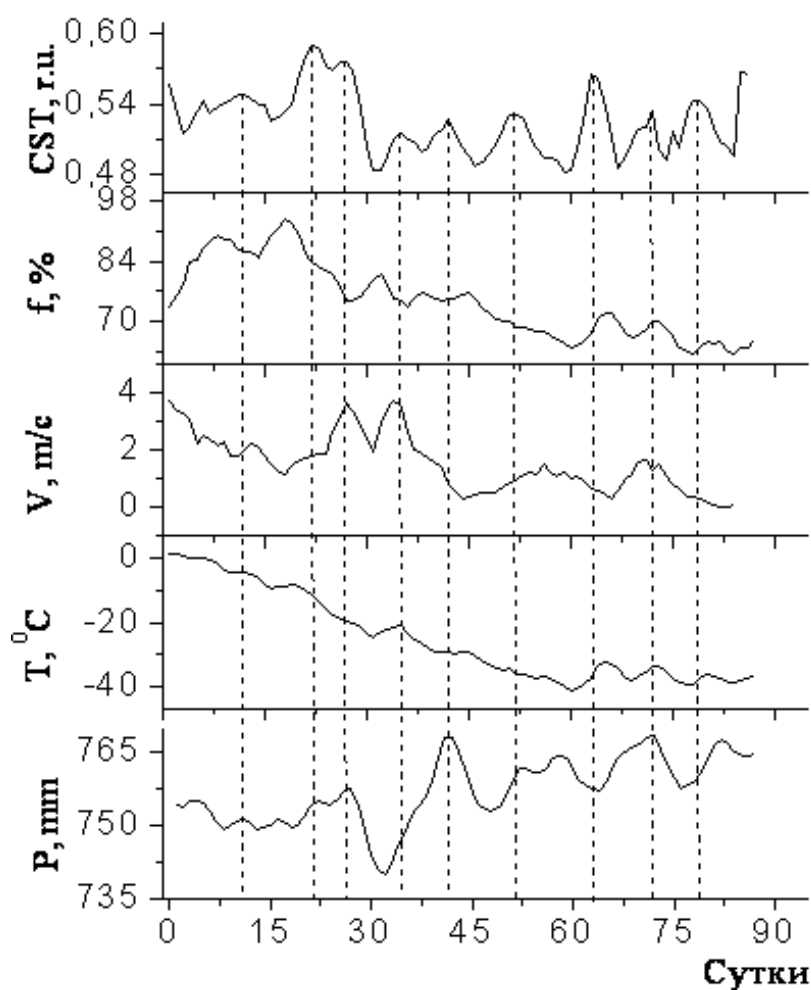


Рис. 3. Изменение состояния ССС половины группы добровольцев Якутске с метеопараметрами (5 октября – 30 декабря 2009 г.).

Совершенно иная ситуация наблюдается при анализе влияния параметров космической погоды на состояние сердечно-сосудистой системы человека с ослабленной адаптационной системой (у кардиологических пациентов).

Воздействие параметров космической погоды на сердечно-сосудистую систему человека с ослабленными адаптационными возможностями

С целью выявления воздействия параметров космической погоды на сердечно-сосудистую систему человека с ослабленными адаптационными возможностями нами проанализирована частота возникновения инфарктов миокарда по данным числа вызовов скорой медицинской помощи (СМП) г. Якутска за годы высокой и низкой геофизической активности. Было обработано более 144000 карточек вызова СМП г. Якутска. В данной работе особое внимание уделено годам вблизи максимума (1992 г.) и минимума (1998 г.) геофизической возмущенности. Обнаружено, что в 1992 году было зарегистрировано 407 случаев инфаркта миокарда у мужчин и женщин, а в 1998 году было зарегистрировано 277 случаев.

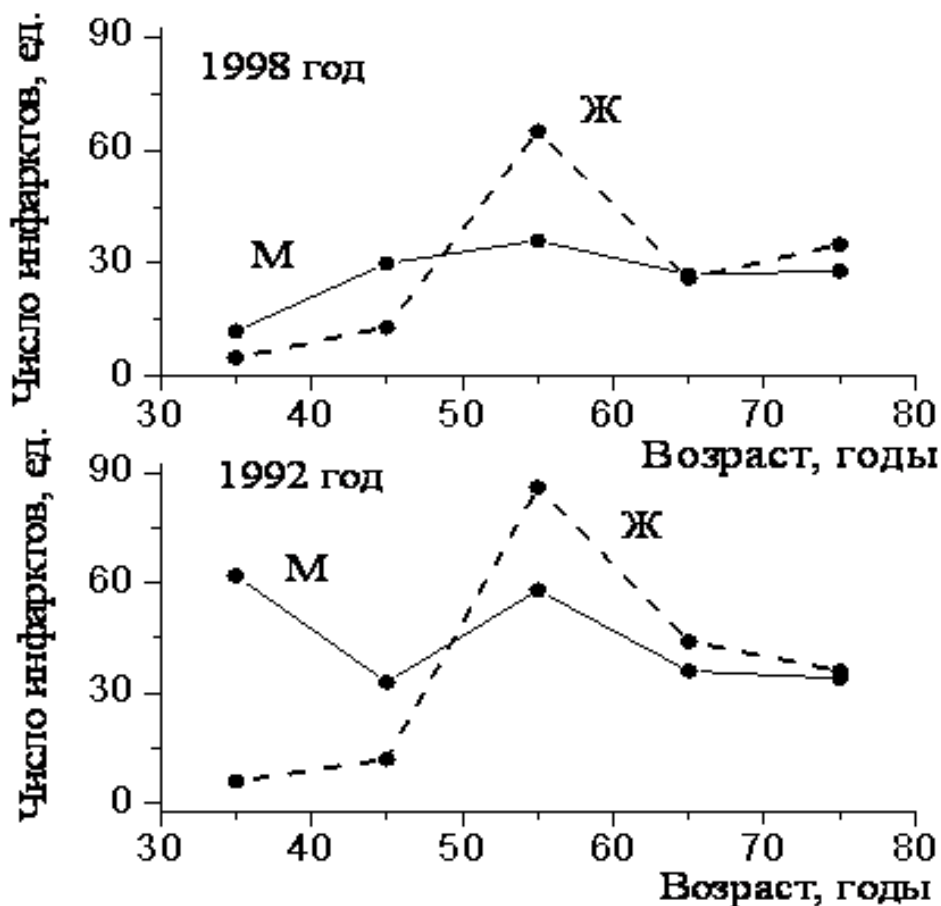


Рис. 4. Половозрастное распределение числа заболеваний инфарктом миокарда для женщин (Ж) и мужчин (М) в 1992 и 1998 гг.

На рис. 4 представлено половозрастное распределение числа заболеваний инфарктом миокарда для женщин (Ж) и мужчин (М) в 1992 и 1998 годах по данным СМП г. Якутска. Как видно из представленных данных за 1992 и 1998 гг., а также из рис. 4 общее количество вызовов СМП в год

вблизи максимума геомагнитной возмущенности (1992 г.) по поводу инфарктов в 1,5 раза превышает число вызовов в год вблизи минимума геомагнитной активности (1998 г.). А как было отмечено в [4, 5] общее количество вызовов СМП в 1992 г. по поводу инсультов в 1,8 раза превышает число вызовов 1998 г. Таким образом, можно отметить, что вблизи максимума геомагнитной активности наблюдалось в 1,5 – 1,8 раз больше вызовов СМП по поводу сердечно-сосудистых заболеваний, чем вблизи минимума геомагнитной активности.

Кроме того, из Рис.4 следует, что в 1992 году число вызовов СМП по поводу инфарктов к мужчинам в возрасте от 30 до 50 лет в 5 раз превышало число вызовов к женщинам такого же возраста. А в возрасте от 50 до 60 лет ситуация кардинально изменяется, число вызовов СМП к женщинам превышает число вызовов к мужчинам в 1,5 раза. В возрасте от 60 до 80 лет число вызовов СМП к женщинам превышает число вызовов к мужчинам, но всего лишь в 1,2 раза. А в возрасте 70-80 лет количество вызовов к женщинам и мужчинам практически выравнивается.

Отсюда следует, что мужчины магнитолабильны и подвержены риску развития ИБС и его осложнений в возрасте до 50 лет. После 50 лет у мужчин происходит снижение числа инфарктов, возможно, за счет естественного отбора, или за счет снижения магниточувствительности.

Женщины более магниточувствительны после 50 лет (особенно в возрасте 50–60 лет) в период пери- и постменопаузы, который сопровождается дефицитом эстрогенов, полового стероидсвязывающего глобулина за счет естественного угасания функции яичников.

Геомагнитные возмущения как фактор регуляции функционирования сердечно-сосудистой системы у лиц с нормальными и ослабленными адаптационными возможностями

В [6] было показано, что отклик живого организма на внешнее воздействие описывается квазилогарифмическим законом. В нашем случае мы исследовали зависимость отклика ССС человека с ослабленными адаптационными возможностями на возмущения геомагнитного поля, и обнаружили, что такой отклик вполне удовлетворительно описывается квазилогарифмической зависимостью. На рис. 5 приведен график, описывающий зависимость состояния ССС человека от уровня геомагнитной возмущенности. В качестве показателя функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека использовался такой показатель электрокардиограммы ЭКГ, как симметрия Т-зубца (КСТ).

Как видно из рис. 5, зависимость имеет три отличающихся друг от друга участка, обозначенных цифрами от 1 до 3. Первый участок характеризуется увеличением КСТ с ростом уровня геомагнитной возмущенности. Второй участок характеризуется практическим прекращением роста КСТ, а

третий участок приводит к резкому изменению состояния ССС человека, свидетельствующему о возникновении сердечно-сосудистых заболеваний.

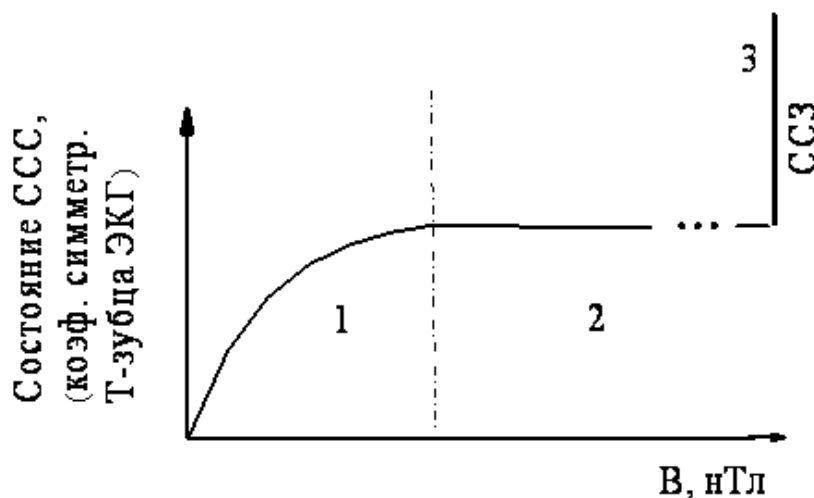


Рис. 5. Зависимость состояния ССС человека от уровня геомагнитной возмущенности.

На первом участке незначительные геомагнитные возмущения исполняют роль «пускового» адаптивного фактора, переводящего работу ССС в оптимальный режим, соответствующий уровню геомагнитной возмущенности. При этом симметрия Т-зубца начинает расти вместе с ростом геомагнитной возмущенности. Подобная реакция, вероятно, свидетельствует о наличии синхронизации между внешними электромагнитными полями и внутренней средой организма человека, что можно рассматривать как один из компонентов «общего адаптационного синдрома».

При превышении геомагнитной возмущенностью уровня, соответствующего границе участков 1 и 2, функционирование ССС стабилизируется в состоянии, относительно рефрактерном (устойчивом) к изменению внешних воздействий, что может иметь охранительное значение для больных с сердечно-сосудистой патологией. При этом КСТ не растет с ростом геомагнитной возмущенности. Вероятно, это связано с достижением предельно допустимых параметров состояния сердечно-сосудистой системы, позволяющих ей функционировать в безопасном для жизни режиме. Безусловно, подобная устойчивость достигается напряжением адаптационно-компенсаторных механизмов ССС.

Полученные нами данные позволяют выдвинуть следующее предположение: индивидуальная реакция человека на изменение параметров космической погоды может являться своеобразным показателем его адаптационных возможностей. В случае попадания на «плато 2» следует проанализировать состояние обследуемого на предмет скрытой патологии и разработать комплекс оздоровительных мероприятий для повышения эффективности его компенсаторно-приспособительных реакций.

Выводы

1. Параметры космической погоды, такие как электромагнитное излучение Солнца, солнечный ветер, межпланетное магнитное поле, трансформирующиеся в магнитосфере Земли в геофизическую возмущенность (в частности, в геомагнитную возмущенность), проявляются в состоянии сердечно-сосудистой системы человека. При этом долгий эволюционный путь развития человечества позволяет здоровому человеку компенсировать за счет резервных возможностей организма воздействие космической погоды без явного ущерба для его здоровья.

2. Возмущения параметров космической погоды приводит к обострениям сердечно-сосудистых заболеваний людей с ослабленными адаптационными возможностями, включающим такие тяжелые заболевания, как инфаркты и инсульты.

3. Наличие совпадения незначительных возмущений параметров космической погоды с изменениями функционального состояния сердечно-сосудистой системы человека с ослабленной адаптационной системой и наступление инфарктов и инсультов при значительных величинах таких возмущений хорошо описывается квазилогарифмической зависимостью отклика организма человека на интенсивность возмущенности параметров космической погоды.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке грантов РФФИ № 14-02-90424 Укр_а (СН и ПСС), № 12-05-98522-р_восток_а (МВИ).

Литература

1. Вишневецкий В.В. и др., 2003, Биомедицинские технологии и радиоэлектроника, **3**, 3.
2. Файнзильберг Л.С., 1998, Управляющие системы и машины. **4**, 40.
3. Самсонов С.Н., Маныкина В.И., 2012, Труды межд. конф. «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле», М.: ИКИ, **2**, 730.
4. Самсонов С.Н. и др., 2005, Журнал неврологии и психиатрии им. С.С. Корсакова. Инсульт, **14**, 18.
5. Samsonov S.N et al., 2013. Odessa Astronomical Publications, **26/2**. 300.
6. Гаркави Л.Х., Квакуина Е.Б., Кузьменко Т.С., 1998, Антистрессорные реакции и активационная терапия, М.: ИМЕДИС. 656.

CARDIOVASCULAR SYSTEM RESPONSE AT PEOPLE WITH VARIOUS STATE OF ADAPTATIVE ABILITIES ON CHANGES OF SPACE WEATHER PARAMETERS

Samsonov S.N.¹, Manykina V.I.¹, Parshina S.S.²

¹*Yu.G. Shafer Institute of Cosmophysical Research and Aeronomy, SB RAS, Russia*

²*Saratov State Medical University n.a. V.I. Razumovsky, Ministry of Public Health, Russia*

For the purpose of revealing the real space weather effect on the human's health, there is an international Russian-Ukrainian experiment "Geliomed" displayed. Analysis of the experimental material let us show a synchronism and globality of this influence (simultaneous

performance of space weather parameters at the state of cardiovascular system in groups of subjects separated by 6000 km). The response of the cardiovascular system of the subjects on changes in the space weather was even at slight values of the Earth's magnetic field. But even at significant disturbances of the space weather parameters, a healthy person had not any painful symptoms, although, objective physiological parameters displayed changes. At the same time, the health of the people with weakened adaptative abilities (patients with cardiovascular pathology), in the same conditions, may get worse up to heart attack and apoplectic attack. In the presented study the response of a healthy organism is studied, as well as of an organism with weakened adaptative abilities on the space weather changes.

АДАПТАЦИЯ ЖИВЫХ ОРГАНИЗМОВ К ДЕЙСТВИЮ КОСМИЧЕСКИХ ФАКТОРОВ – ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Рагульская М.В.

*Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова РАН, Троицк, Москва
ra_mary@mail.ru*

Современные биосистемы – единственно доступные нам объекты для изучения эволюционной адаптации к нестационарным солнечным процессам. Их адаптационные реакции выработаны в процессе длительной многомиллиардной эволюции при существенно отличающихся условиях исторической динамики Солнца и обусловлены целой совокупностью внешних факторов. Поэтому очень сложно выделить один-единственный действующий агент, сыгравший основную роль в зарождении и формировании жизни на Земле. Например, в период формирования жизни из-за скудности первичной атмосферы, не обогащённой кислородом, неэкранированные потоки рентгеновского и ультрафиолетового излучения, а также космических лучей, могли быть одним из самых мощных биосферообразующих факторов. В качестве устойчивой приспособительной реакции к ним возможно предположить эволюционное возникновение вторичной и третичной структуры белков. Другим биотропным фактором являются вариации геомагнитного поля Земли, модулируемые солнечным излучением. Судя по результатам одновременных мониторингов 2001–2013 годов по изменению показателей клеточных структур и физиологических показателей организма человека, эти факторы играют значительную роль и в поведении современных биообъектов. Возможно, сам факт возникновения жизни 3.5–4 млрд. лет назад (не раньше и не позже) определился именно тем моментом, когда был достигнут баланс между скоростями возникновения и разрушения новых органических структур под воздействием космофизических излучений различного типа [1, 2].

1. Оценка возможного времени возникновения жизни на Земле, исходя из динамики древнего Солнца

Условно можно выделить три основных состояния Солнца: совсем молодого с возрастом 1–10 млн. лет, Солнца возрастом около 1 млрд. лет, т.е. 3.5 млрд. лет тому назад и современного центрального светила нашей планетной системы. Столь молодое Солнце (1 млрд. лет), вероятно, имело период вращения вокруг своей оси около 10 дней. В ту эпоху активность Солнца была более высокой, чем сейчас, но менее регулярной. Затем установились циклы, но их амплитуды менялись: последовательности высоких

циклов сменялись эпохами низкой активности типа Маундеровского минимума. Электромагнитное излучение Солнца на этих этапах эволюции в оптическом диапазоне менялось незначительно, однако в мягком рентгеновском диапазоне 0.15–4 кэВ (короче 90 А) отношение рентгеновской светимости молодого Солнца к его полной (боллометрической) светимости было в 1000 раз больше, чем в обычный максимум солнечной активности в современную эпоху.

Как показали исследования ИЗМИРАНе по программе 2009–2011 гг. «Происхождение жизни и становление геобиосферы», около 4–4,5 млрд. лет назад интенсивность излучения раннего Солнца в биоактивных рентгеновских и ультрафиолетовых областях спектра была выше на несколько порядков, тоже относится к интенсивности солнечных космических лучей. При отсутствии атмосферы и меньших размерах магнитосферы Земли данные виды излучения были существенными поражающими факторами, препятствующими как процессам зарождения жизни на Земле, так и процессам переноса органических молекул с планеты на планету в пределах Солнечной системы. Эти оценки не учитывают вклада вспышек. Следует ожидать, что 4–3.5 млрд. лет тому назад во вспышечной активности Солнца доминировали не импульсные явления (как в настоящее время), а более длительные события. Однако в момент крупных вспышек мощность корпускулярного излучения древнего Солнца до 10 000 раз превосходила современное состояние. Ранее 4 млрд. лет назад даже при наличии благоприятных температурных, атмосферных и литосферных условий вновь сформировавшаяся (или занесенная с метеоритами) жизнь практически сразу разрушалась очередным импульсным потоком внешнего излучения, не успев начать процесс эволюции. Вполне вероятно, что возникновение и устойчивое развитие сложной современной биосферы не только следствием появления магнитосферы, но и было связано с переходом Солнца к более упорядоченному типу активности.

2. Оценка пространственного распределения «полосы жизни»

Естественной защитой биосистем от потока солнечных частиц является магнитосфера Земли. Однако эволюционные процессы раннего Солнца создавали вблизи Земли картину магнитосферы, сильно отличающуюся от современной. Есть основания полагать, что у быстро вращающегося молодого Солнца был более сильный отток массы. По имеющимся расчетам, более сильный отток массы должен давать на 3 порядка более сильный солнечный ветер, чем сегодня (на 2 порядка больше по плотности и более чем в 2 раза по скорости). Значительно более сильными должны были быть также корональные выбросы массы. Это должно было приводить к сжатию земной магнитосферы и эрозии атмосферы. Соответственно усилится проникновение к Земле, как галактических, так и увеличенного потока солнечных космических лучей. Этот эффект может иметь катастрофические

последствия для медленно вращающихся близких к Солнцу планет, где магнитосфера может сжаться до размеров порядка 1000 км. В этих условиях поверхность Земли и астероидов между Землей и Марсом (и, возможно, сам Марс) оказываются единственными кандидатами, на которой в период около 4 млрд. лет назад баланс космических факторов создает возможность зарождения или панспермического развития жизни. На более близких к раннему Солнцу планетах жизнь будет «выжигаться» потоком мощнейшего рентгеновского и корпускулярного излучения Солнца, более дальние планеты не получают достаточное количество тепла для существования воды в жидкой фазе.

3. Существенное изменение интенсивности космических лучей, как одна из возможных причин резкого увеличения разнообразия биосферы в эпоху Кембрийского взрыва

Биосфера Земли зародилась, развивалась и продолжает свою эволюцию при наличии постоянно действующего экологического фактора – радиационного фона ионизирующих излучений, таких как естественная радиоактивность окружающей среды и космические лучи галактического и солнечного происхождения (ГКЛ и СКЛ). Над поверхностью суши на средних широтах Земли радиационный фон на 2/3 обусловлен излучениями радиоактивных веществ и на 1/3 – космическими лучами (КЛ). Над поверхностью океана радиационный фон почти целиком обусловлен ими.

Поток космических лучей, приходящих из Галактики, подвержен изменениям во времени и пространстве. Причиной таких изменений могут быть вспышки Сверхновых звезд. Потоки СКЛ зависят от частоты и мощности вспышек на Солнце. Суммарное воздействие ГКЛ и СКЛ на околоземное пространство, в конечном счете, сильно зависит от уровня солнечной активности (СА) в настоящее время и могло существенно зависеть от СА в далёком прошлом Земли (в эпоху «молодого Солнца»). Одно из основных свойств космофизических факторов – создавать условия для генерации новой информации в процессе эволюционной адаптации биосистем в целом. Самое бурное в истории возникновение новых форм жизни 580–500 млн. лет назад по времени совпадает со значительным изменением интенсивности космических лучей.

4. Системообразующие эволюционные функции космогеофизических факторов и их атавистичность в настоящее время

Исходя из вышесказанного, можно предположить, что наблюдаемые в настоящее время эффекты адаптации биосистем к космогеофизическим воздействиям по сути своей являются атавизмами тех древних времен, когда излучение Солнца было существенно больше, и являлось реальным разрушающим фактором для только что сформировавшейся жизни на Земле. Энергии современных солнечно-земных и космических процессов для

такого воздействия недостаточно, тем не менее, реакция однозначно и воспроизводимо регистрируется многочисленными исследователями на всех уровнях организации биосферы. В данном сборнике по вопросу влияния космической погоды на современную биосферу представлены статьи Н.К. Белишевой, Е.Е. Текуцкой и С.Н. Самсонова. Более подробную картину современных исследований на эту тему можно получить из материалов конференции 2012 года «Влияние космической погоды на человека» [3]. Материалы конференции размещены на сайте ИКИ РАН www.iki.rssi.ru

Основными проблемами исследований являются:

1. Плохая воспроизводимость результатов (возможно, из-за проведения исследований в разные фазы цикла солнечной активности в локальных географических пунктах и недостаточное количество разноширотных длительных мониторингов).

2. Многопараметричность задачи и неспецифичность реакции живых организмов на космогеофизические факторы, приводящие к затруднениям в выделении основного действующего агента космической и земной погоды.

3. Следствием двух первых проблем, по-видимому, объясняется существенный перекокс в сторону экспериментальных локальных работ и практическое отсутствие общей теории явления.

Гипотеза об эволюционном атактистическом характере адаптационной реакции биосистем на космогеофизические воздействия могла бы внести ясность в давний спор биологов и физиков по поводу поиска, характера и интенсивности действующего биотропного физического агента в солнечно-земных связях. На данный момент мы видим реакцию биосистем на комплексное изменение внешней среды, но не можем однозначно выделить агент, возможно, из-за малости действующих в настоящее время физических факторов. Даже негативное воздействие активного древнего Солнца живые системы ухитрились поставить на службу формирующейся жизни. По мере усложнения биообъектов внешние космофизические факторы стали выполнять и системообразующие функции. Например:

- выступать «сигналами точного времени» для синхронизации эндогенных и экзогенных ритмов организма;
- обеспечивать синхронизацию индивидуальных времен биообъектов при взаимодействии между собой;
- выступать в качестве слабого тренирующего фактора для адаптивно-устойчивых членов популяции;
- служить каналом отбраковки нежизнеспособных членов популяции;
- являться синхронизатором общих ритмов популяции;
- создавать условия для генерации новой информации в процессе эволюционной адаптации биосистем

Т.е. для уменьшения расходов собственных ресурсов, биосистемы стали использовать легкодоступные внешние энергичные вариации пара-

метров космической погоды в качестве естественных экзогенных регуляторов адаптационного и эволюционного процесса. И даже когда со временем интенсивность внешнего излучения упала до неопасных для существования жизни значений, регуляторная и информационная роль комической погоды оказалось столь полезна, что сохранилась до наших дней на всех уровнях организации биосферы

5. Периоды древнего Солнца в ритмике современных биосистем

Периоды, короче 1 оборота Солнца. Основным фактором, определяющим эволюцию активности звезды, является потеря углового момента количества вращательного движения. Наблюдения за солнцеподобными звездами астрономической программы “Sun in time” подтвердили закономерность, что с течением времени звезда экспоненциально замедляет свое дифференциальное значение. Эта закономерность позволяет произвести оценку – для молодого Солнца эпохи формирования жизни на Земле период обращения был существенно меньше и составлял около 10 дней, и затем быстро увеличивался в течение первого миллиарда лет существования нашей звезды. Различные биологические виды формировались в разное астрономическое время, поэтому в их ритмике наряду с современными периодами солнечного происхождения должны присутствовать периоды эпохи первоначального формирования вида, протяженностью от 10–14 древних суток до 26–30 современных суток дифференциального вращения Солнца вокруг своей оси (на геоэффективных широтах). При анализе динамических спектров клеточных биологических объектов необходимо уделить особое внимание периодам, более коротким, чем современные 27 суток оборота Солнца. И не пытаться «жестко привязать» эти короткие периоды к динамике современных космогеофизических факторов. Дальнейшее дифференцирование периодов требует дополнительных исследований с учетом самых последних результатов изучения проявления динамики раннего Солнца в эволюционной адаптации живых систем.

Периоды, более нескольких оборотов Солнца. Выявление биотропного воздействия космической погоды на длинных периодах требует проведения биомедицинских и экологических мониторингов значительной длительности, сопоставимой с 11-летними циклами солнечной активности. Инициированный ИЗМИРАН и проведенный одновременно в разных городах мониторинг 1998–2013 выявил всеобщий и одновременный в пределах суток характер наблюдаемой приспособительной реакции на вспышечные процессы на Солнце и сопровождающие их изменения сверхнизкочастотной составляющей магнитного поля Земли. Было показано, что к вариациям космофизических факторов и магнитного поля Земли чувствительны ВСЕ здоровые люди, причем амплитуда и длительность их реакции превышает аналогичные параметры у больных. Результаты исследований публиковались в 2000–2012 гг. обобщены в [1–3]. В качестве регистрируе-

мых параметров функционального состояния в описываемом мониторинге было выбрано определение электрической проводимости биологически активных точек на коже человека (общая база данных – более 500 000 измерений). Ежедневные мониторинговые измерения, проводимые на базе отдела солнечно-земных связей ИЗМИРАН и медицинского факультета РУДН, дополнялись пространственно-распределенной сетью исследований динамики сердца в рамках российско-украинского проекта «Гелиомед». Подробности об этом проекте и описание компьютерного комплекса даны на сайте проекта «Гелиомед» <http://geliomed.immsp.kiev.ua>. Подробное описание технологии проведения эксперимента и аппаратуры можно найти на сайтах гелио-экологического сектора ИЗМИРАН, <http://helioecology.webnode.com>.

Для решения задачи о воздействии современных космогеофизических факторов на древние биосистемы в институте микробиологии НАНУ д.б.н. Е.Н. Громозовой проводились ежедневные мониторинговые измерения физико-химических особенностей реакции метахромазии под воздействием космогеофизических факторов [4]. В частности, изучалось состояние полифосфатов и ДНК, и репарацию последней в промоторных районах генов, участвующих в регуляции клеточного цикла бактерий *S.cerevisiae*. Результаты по воздействию искусственных магнитных полей различной частоты на эти же клеточные структуры приведены в статье Е.Е. Текуцкой.

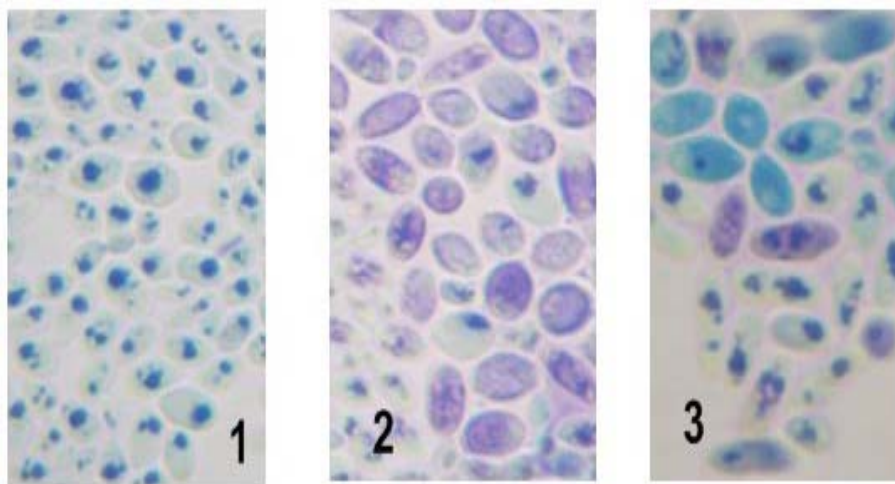


Рис. 1. Типы окрашивания при реакции метахромазии.

Метахромазия (от греч. *μετά*- – между, после, через, следование за чем-либо, переход к чему-либо другому, перемену состояния, и *chroma* – цвет) обозначает свойство клеток и тканей окрашиваться в тон, отличающийся от цвета красителя. Для выбранных клеточных структур характерно окрашивание волютиновых гранул микроорганизмов в 3 различных цвета (соответственно – МТХ = 1, МТХ = 2 и МТХ = 3), причем окраска изменя-

ется в зависимости от вариаций параметров космической погоды (Рисунок 1).

Текущий 24 цикл солнечной активности является необычным как из-за затянувшегося минимума 2005–2009 годов, так и из-за особенностей динамики параметров космической погоды (см. доклад В.Н. Обридко). Необычной, не соответствующей традиционной синусоидальной привязке минимум – максимум солнечной активности, оказалась и динамика биомедицинских показателей. Начиная с 2004 года, статистическое распределение индивидуальных биомедицинских параметров существенно отличается от нормального не только в позиционировании центрального пика, связанного с кратковременными вариациями факторов космической погоды, но и наличием нескольких пиков, отражающих долговременные переходные адаптационные процессы изучаемого биообъекта. Двугорбое распределение 2004–2006 гг. свидетельствует о наличии минимум двух адаптационных программ реагирования на внешние воздействия. В 2004–2006 годах произошло изменение всех статистических распределений биомедицинских параметров [5]. На Рисунке 2 приведена динамика ар-индекса геомагнитной активности и основных параметров распределения значений проводимости акупунктурных точек в 2002–2012 гг. Период накопления данных для оценки параметров распределения составлял два месяца. Число измерений в каждый такой период – от 17000 до 45000. На всех трех графиках виден резкий излом параметров распределения в 2005 г.

Наблюдаемое явление не является артефактом измерений. То, что в процессе измерений не произошло сдвига начала отсчета или изменения масштаба шкалы прибора вытекает из наличия обсуждаемого излома на графике эксцесса (Рисунок 2в). Как известно, значение эксцесса инвариантно относительно преобразования точки нулевого отсчета или изменения масштаба. На всех графиках Рисунка 2 видно существование устойчивых трех периодов статистических параметров в биомедицинских данных: период 2001–2003 года, период 2004–2006 года с изломом всех параметров в середине 2005 года, и период с 2007 года по 2012 год. В настоящее время отношение ежедневной средней по группе проводимости акупунктурных точек к среднеквадратичному отклонению превышает соответствующие значения периода 2001–2003 годов в три раза, а статистическое распределение параметров существенно отличается от гауссовского. На Рисунке 2б период одновременной перестройки солнечно-земных связей и биологических параметров выделен серым цветом.

Похожие результаты о смене адаптационных программ реагирования в 2005 и 2010–2011 годах были получены Е.Н. Громозовой при работе уже не с людьми, а с эталонными клеточными структурами *Ascharomyses cerevisiae*. На рисунке 3 представлена динамика числа состояний с $MTX = 3$ для эталонных клеточных структур *Ascharomyses cerevisiae* в 2002–2012 годах. В период с конца 2004 года по середину 2006 года сред-

нее число событий за 2 месяца равно 0,1 вместо 5 за предыдущий период и 21 – за последующий.

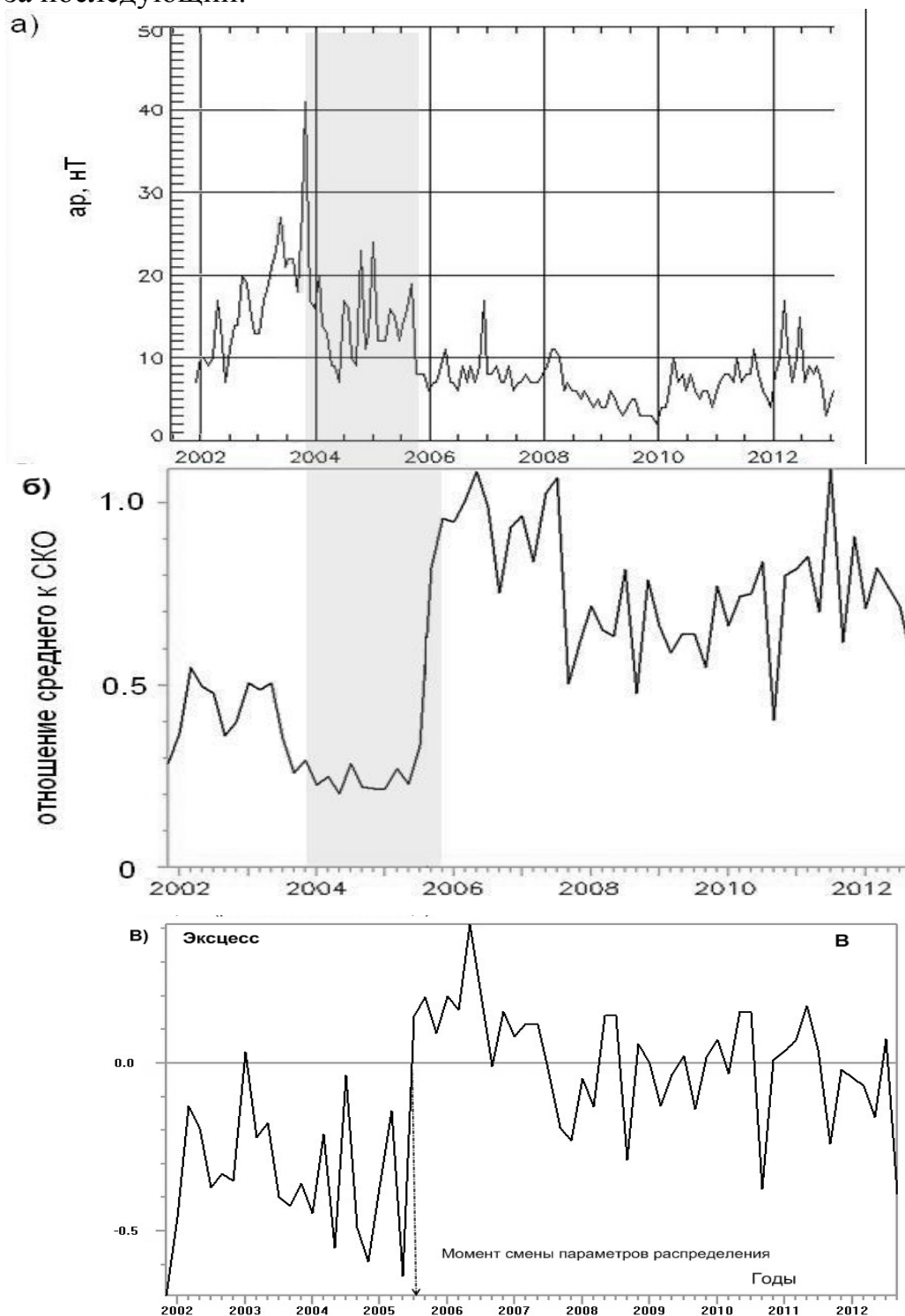


Рис. 2. а) ар-индекс геомагнитной активности за период 2002–2012 гг. (серым цветом выделен период перестройки солнечно-земных связей); б) отношение среднего по группе значения проводимости выделенных участков кожи к среднеквадратичному отклонению этого параметра за 2002–2012 годы (серым цветом выделен период перестройки солнечно-земных связей); в) динамика эксцесса среднего по группе значения проводимости выделенных участков кожи за 2002–2012 годы.



Рис. 3. Динамика числа состояний с $MTX=3$ для эталонных клеточных структур *Accharomyces cerevisiae* в 2002–2012 годах. В период с конца 2004 года по середину 2006 года среднее число событий за 2 месяца равно 0,1 вместо 5 за предыдущий период и 21 – за последующий.

Аналогичный результат о резком уменьшении смертности в 2004–2005 годах по Республике Саха (Якутия) получен С.Н. Самсоновым. Схожесть результатов свидетельствует об адаптационной подстройке биологических объектов различного уровня организации к единому внешнему фактору, скорее всего – к необычному течению 23–24 цикла солнечной активности.

Поэтому предлагаемое нами объяснение – наличие одновременных изменений на графиках всех рассматриваемых параметров биомедицинского распределения свидетельствует о смене программ реагирования биологических объектов при возникновении значительных изменений в общепланетарных параметрах внешней среды. График среднеквадратичного отклонения заставляет предположить смену биотропного агента космической погоды, начавшуюся примерно за 2 года до обсуждаемых событий, в сентябре-октябре 2003 года. Какие это могли быть изменения?

В 2004–2006 годах произошла перестройка солнечно-земных связей, которая затронула целый комплекс факторов: динамику магнитных полей Солнца, параметров космической погоды и солнечного ветра, а также характер геомагнитной активности [6]. Например, в 2004–2005 годах изменилось соотношение количества геомагнитных бурь с внезапным и постепенным началом. До 2003 года развитие цикла было достаточно традиционным, и к 2005 году ожидался минимум числа солнечных пятен. Однако затем с 2005 года началось то, что принято называть «затяжным минимумом». Число пятен медленно убывало, но резко исчезли и другие источники геомагнитных возмущений (корональные дыры и корональные выбросы). Все это привело к резкому спаду интенсивности геомагнитного поля в

2004–2006 годах. Качественные изменения в геомагнитных возмущениях и статистических распределениях биологических параметров произошли практически синхронно как раз в сентябре–октябре 2005 года. В течение 2003–2004 годов произошли существенные изменения динамики a_p -индекса геомагнитной активности, и уменьшение ее амплитуды после середины 2005 года до значений, в последний раз наблюдававшихся в 1965–1966 годах (Рисунок 2а). Средние значения a_p -индекса до и после выделенного периода равны, соответственно, 13.1 нТ и 7 нТ. С началом 24 цикла в 2008–2009 годах странности не исчезли. Текущий цикл солнечной активности остался невысоким, но даже для такого невысокого цикла количество нестационарных явлений непропорционально мало. Имеющиеся в солнечно-земной физике аналитические прогнозы позволяют предположить наступление в ближайшем будущем длительного многолетнего периода пониженной солнечной активности, аналогичного Маундеровскому минимуму 400-летней давности.

В связи с вышесказанным можно сформулировать следующие новые направления исследований эволюционных аспектов биотропного воздействия космических факторов, которые будут активно развиваться в ближайшее десятилетие:

1. Изучение (на современном клеточном материале) характерных времен возникновения реакции и определения порога разрушения эталонных клеточных структур для воссоздания (моделирования) биотропных параметров активности древнего Солнца.

2. Изучение современного отклика биосистем на космофизические факторы как атавистической реакции на изменение условий среды обитания.

3. Построение теоретических моделей с учетом возможных интенсивностей излучений, воздействовавших на биосферу в прошлом.

4. Изучение пространственно-временных масштабов и физико-химических условий формирования жизни на Земле путем сопоставления полученных астрофизических космогеофизических результатов с геохимическими и палеонтологическими данными для верификации, как современной модели солнечного динамо, так и имеющихся моделей эволюции биосферы.

5. Совокупное изучение экстремальных событий в эволюции гелиосферы, Солнца и биосферы.

Эволюция магнитных полей Солнца и динамика галактических космических лучей (ГКЛ) играют значительную роль в развитии биосферы Земли на протяжении всего периода зарождения и существования жизни. Однако комплексное изучение фундаментальной проблемы динамической коэволюции Солнца, галактических космических лучей и биосферы в условиях раннего и современного Солнца до сих пор не проводилось. Особенно интересной является задача оценки максимальной интенсивности и

вероятностной частоты экстремальных событий на Солнце и в гелиосфере за последние 4 млрд. лет. В рамках российско-украинского проекта «Роль нормальных и экстремальных гелиогеофизических процессов в эволюции биосферы» предлагается программа поиска космофизических факторов, существенных для зарождения, становления и эволюции современных биосистем. Предполагается объединение 2-х блоков исследований, экспериментального (на базе современных биосистем и баз данных о динамике космо-геофизических факторов 23–24 цикла солнечной активности) и теоретического (изучение современных солнечно-земных связей и процессов в гелиосфере эпохи формирования и развития ранней биосферы). Теоретическое исследование динамики раннего Солнца предлагается провести на основе сопоставления дифференциального вращения в различных режимах МГД-генерации. Изучение эволюции распределения космических лучей в Солнечной системе предполагается путем сбора и систематизации данных о потоках современных солнечных космических лучей (СКЛ) различных энергий. Для задач, связанных с распространением ГКЛ в гелиосфере и оценкой их максимально возможной интенсивности в процессе эволюции биосферы, использованы диффузионно-конвекционные уравнения переноса космических лучей. Уравнения рассматриваются для двух и трехслойных сред, моделирующих гелиосферу при наличии стоячей ударной волны, гелиопаузы и межзвездного пространства. Также предлагается экспериментальное изучение динамики современных биосистем (от организма человека до клеточных колоний) путем длительных мониторингов с использованием уже созданной разноширотной сети научных групп, и дальнейшее сравнение полученных данных с динамикой изменений космогеофизических параметров непосредственно в местах наблюдений. Совокупный анализ результатов биомедицинских и гелио-геофизических исследований позволит дать оценку роли экстремальных событий солнечной динамики и динамики ГКЛ в их собственной эволюции и эволюции биосферы за последние 4 млрд. лет.

Работа поддержана совместным российско-украинским грантом укр_а №14-02-90424 «Роль нормальных и экстремальных гелиогеофизических процессов в эволюции биосферы».

Литература

1. Коллективная монография «Биотропное воздействие космической погоды» под редакцией М.В. Рагульской. 2010, Санкт-Петербург, Изд-во «ВВМ», 312 стр.
2. С.М. Чибисов, Г.С. Катинас, М.В. Рагульская. Биоритмы и космос: мониторинг космо- биосферных связей . – М.: Монография, с. 442.
3. Материалы международной конференции «Влияние космической погоды на человека в космосе и на Земле, Москва, 2012.
4. Gromozova E., Voychuk S., Grigoriev P., Vishnevsky V., Ragulskaya M. // "SUN and GEOSPHERE" International Journal of Research and Applications. 2012. Vol. 7, № 1. pp. 117–120.

5. *Obridko V., Ragulskaya M., Rudenchik E., Khabarova O., Hramova E.*, Solar activity 23-24 cycles and structure of biomedical monitoring data, *Tekhnologii zhivyykh sistem* (Technologies of live systems, ISSN 2070-0997), 2014, 11(3), 12-22, DOI: 10.13140/2.1.2980.4167
6. *Obridko V.N., E.V. Ivanov, A. Özgüç, A. Kilcik, V.B. Yurchyshyn*, *Solar Physics*, (2012) 281:779–792.

**COSMIC FACTORS AND BIOSYSTEM ADAPTATION –
PROBLEMS AND PROSPECTS FOR FUTURE RESEARCH**

Ragulskaya M.V.

*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere, and Radio Wave Propagation, RAS,
Troitsk, Moscow*

The article discusses the current state of the gained knowledge of the space weather's impacts on the biosphere. The role of the modern chrono-biological investigations in the solving of the “young Sun problem” as well as their application to the tasks of the early stages of the terrestrial life forming is considered. The study of biotrophic effects of modern space weather is possible answers to the question about of the formation for evolutionary and adaptive scenario of ancient biosystems functioning. Influence of cosmic rays, ultraviolet and geomagnetic field on early life has its signs in modern biosphere processes, which may be experimentally studied.

СПИСОК АВТОРОВ

Адушкин В.В. 50
Баркин Ю.В. 162
Барышев М.Г. 203
Belisheva N.K. 187
Бочкарев Н.Г. 39
Бусарев В.В. 32
Витязев А.В. 50
Вишневский В.В. 203
Воробьёва Е.А. 109
Гиндилис Л.М. 9
Глазачев О.Д. 50
Елисеев А.В. 131
Ишков В.Н. 85
Кацова М.М. 67
Ковадло П.Г. 146
Лившиц М.А. 67
Манькина В.И. 209
Мергелов Н.С. 109
Мерфи Дж. 23
Мирошниченко Л.И. 180
Обридко В.Н. 5
Паршина С.С. 209
Печерникова Г.В. 50
Печерский Д.М. 117
Porfir'eva G. 99
Рагульская М.В. 219
Самсонов С.Н. 209
Сафонова М. 23
Смольков Г.Я. 162
Соина В.С. 109
Соколов Д.Д. 81
Текуцкая Е.Е. 203
Чурилин Н. 109
Щекинов Ю.А. 23
Язев С.А. 146
Yakupina G. 99
Якушев А.В. 109

Научное издание

Космические факторы
эволюции биосферы и геосферы

Сборник статей

Ответственный редактор – В.Н. Обридко

Технический редактор Е.Л. Терёхина