

Начальная стадия формирования планетной системы: молодая звезда и протопланетный диск.  
Фото с сайта <http://www.eso.org/public/>

УДК 552.550.42



**Маракушев А.А.**

## **Землетрясения взрывной природы<sup>1</sup>**

Маракушев Алексей Александрович, доктор геолого-минералогических наук, профессор, главный научный сотрудник Института экспериментальной минералогии РАН, академик РАН, почётный профессор МГУ имени М.В. Ломоносова  
E-mail: [belova@iem.ac.ru](mailto:belova@iem.ac.ru)

Землетрясения взрывной природы рассматриваются в аспекте происхождения Земли, как одно из проявлений ее эндогенной активности, обусловленной наличием у нее жидкого флюидного ядра. В этом отношении Земля отличается от полностью консолидированных планет ее группы и Луны, эндогенная активность которых давно прекратилась вместе с потерей магнитных полей и сейсмичности.

**Ключевые слова:** островная дуга, окраинный хребет, окраинное море, поверхность Бенъофа, хондритовая планета, астероид.

Чтобы приблизиться к пониманию природы взрывных землетрясений необходимо хотя бы кратко остановиться на проблеме происхождения Солнечной системы, ее планет и положения в их ряду Земли<sup>2</sup>. В Солнце (желтом карлике) синтезируются только легкие элементы (С, О, Ne, Mg), недоступные для наблюдения. Так что весь наблюдаемый химический состав Солнечная (звездно-планетная) система получила в наследство от своей предшественницы – гигантской звезды, породившей при взрыве раскаленный газовый быстро вращающийся диск, масса которого в десятки раз превышала солнечную. При его стремительном охлаждении в нем развивались реакции образования тугоплавких металлических, оксидных и силикатных соединений – Fe(Ni),

<sup>1</sup> Работа выполнена при поддержке гранта НШ-3634.2010.5

<sup>2</sup> Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы. М.: Наука. 1992. 208 с.; Marakushchev A.A. Cosmic petrology and the planetary evolution of the Solar System // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2005. V. 24. N 6. P. 507–519.

MgO, SiO<sub>2</sub>, (Mg, Fe)<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>, (Mg, Fe)SiO<sub>3</sub> и др., что было первым шагом на пути превращения его в протосолнечную небулу (туманность) колыбель будущей Солнечной системы. С быстрым вращением газового диска связана его первичная кислород-водородная дифференциация, в результате которой при последующем глубоком охлаждении в центральной его части сформировались водородные ледяные планетезимали, а на периферии – водные. В результате их аккреции (стяжения) возникали Солнце, планеты-гиганты (водородные в непосредственном его окружении и водные – на удалении) и кометные тела, состоящие из водяного льда и космической пыли, окружающих Солнечную систему в виде гигантских поясов (Койпера, Хиллса и Оорта). В Солнце благодаря его центральной позиции сосредоточилась только небольшая часть ( $1,983 \cdot 10^{33}$  г) массы стремительно обращающегося вокруг него гигантского, плотного небулярного диска, в котором формировались гигантские планеты и кометное окружение Солнечной системы. По достижении звездного состояния Солнце активно воздействовало солнечным ветром на свое окружение, так что межпланетная и межкометная плотная среда рассеялась в космическое пространство. В результате Солнечная (звездно-планетно-кометная) система потеряла гигантскую массу, которую она первоначально унаследовала от своей звездной гигантской предшественницы. Однако кинетическая энергия плотного небулярного диска, стремительно обрабатывавшегося вокруг Солнца, в значительной степени была унаследована сформировавшимися в нем планетами-гигантами, которые оказались в результате его миграции в вакууме космического пространства. Тем не менее, их взаимосоогласованное, стремительное обращение вокруг Солнца, согласное с его медленным вращением, свидетельствует о наличии общей среды, которая была способна создать их взаимосоогласованное движение.

Формирование гигантских планет начиналось с аккреции ледяных планетезималей, температура которых близка к абсолютному нулю, образующих протопланетные диски в протосолнечной небуле. По достижении ими гигантской массы развивалось гравитационное сжатие, сопровождавшееся подъемом температуры до громадных значений, так что создавалось тепловое излучение, которое придавало планетам-гигантам сходство со звездами («блуждающие звезды»).

На этой ступени развития Солнце окружалось только планетами-гигантами, стремительно обрабатывавшимися вокруг него в вакууме космического пространства. Они быстро вращались вокруг своих осей, и в них происходила самая первичная дифференциация железо-силикатного вещества. Тяжелое, богатое железом вещество формировало ядра планет-гигантов, а более легкое, существенно силикатное, вещество отбрасывалось центробежными силами от их гигантских флюидных оболочек наружу и формировало спутники. Ядра планет-гигантов расслаивались под огромным давлением их флюидных оболочек на жидкие силикатные (верхние) и железные (нижние) фазы. Более флюидные жидкие железные фазы создавали сильные магнитные поля планет гигантов.

В настоящее время сохранились только удаленные от Солнца планеты-гиганты (Нептун, Уран, Сатурн, Юпитер), окруженные множеством спутников, тогда как более близкие к нему планеты-гиганты потеряли под действием солнечного ветра гигантские флюидные оболочки, а их железо-силикатные ядра превратились в самостоятельные небольшие планеты, подразделяющиеся на примитивные (хондритовые) и более развитые планеты земной группы (Марс, Земля, Венера, Меркурий). Это превращение происходило с потерей спутников (сохранились только Фобос и Деймос у Марса и Луна у Земли).

Примитивные хондритовые планеты располагались между орбитами Марса и Юпитера. Они характеризовались несовершенством расслоения, в них не сформировались прочные силикатные оболочки, которые были бы способны противостоять громадному давлению флюидов (в основном, водорода), которые сосредоточились в их жидкой железной фазе под давлением флюидных оболочек их материнских планет-гигантов. В результате они подверглись взрывному распаду. Их обломки, так называемые астероиды, испещрены ударными кратерами, образовавшимися под «обстрелом» их со стороны смежных взрывающихся планет. Изредка они образуют динамичные пары с вращением вокруг общего центра. Астероиды унаследовали в какой-то мере орбиты материнских планет-гигантов и обращаются вокруг Солнца согласно с общей планетной системой. Они образуют целый пояс между орбитами Марса и Юпитера, который постоянно теряет массу в результате выпадения из него обломков астероидов – гелиоцентрических метеоритов, которые падают на Солнце и захватываются гравитационными полями Земли и других планет ее группы. В основном это железо-каменные метеориты – хондриты, по которым пояс астероидов часто называют хондритовым поясом. Крупные тела хондритов при вторжении их на большой скорости в атмосферу Земли взрываются на высоте и выпадают в виде так называемых метеоритных дождей, представленных их обломками. Например, катастрофический взрыв крупного хондрита вблизи г. Суджоу в Китае на высоте 10 км 15 апреля 1986 г. создал протяженную полосу его обломков с характерным уменьшением вдоль нее их размеров, фиксирующим направление вторжения метеорита в атмосферу. Таким образом, взрывной распад хондритовых планет на астероиды происходил в результате потери под воздействием солнечного ветра громадных флюидных оболочек их материнскими планетами. Хондритовые планеты взрывались при стремительном расширении водородного флюида, сконцентрированного в их жидких железных ядрах на протопланетной стадии развития.

Содержащиеся в хондритах очень плотные минералы (рингвудит, коэсит и др.)<sup>1</sup> отражают высокий энергетический уровень взрывного распада примитивных планет на астероиды.

Хондритовую стадию в своем развитии проходили и планеты земной группы, зарождавшиеся и вначале развивавшиеся в виде плотных ядер своих материнских планет-гигантов под огромным давлением их флюидных оболочек, так что в их никель-железных ядрах сосредоточилась огромная масса водорода. Однако же под его давлением не произошло ни взрывной распад при снятии внешнего ограничивающего давления, создаваемого флюидными оболочками их материнских планет-гигантов, так как в них сформир-

<sup>1</sup> Маракушев А.А., Зиновьева Н.Г., Грановский Л.Б. Генетические типы минералов ультравысокого давления в метеоритах // ДАН. 2007. Т. 417. № 5. С. 237–243.

ровались прочные силикатные оболочки (мантии и коры). Водородное давление создало их напряженное состояние и разнообразные проявления эндогенной активности, в том числе взрывных землетрясений. У Земли эндогенная активность продолжается уже 4,6 млрд. лет, а у других планет ее группы она давно прекратилась в результате полной консолидации с одновременной потерей ими магнитных полей, создаваемых жидкими флюидными железными ядрами планет.

Уникальность Земли состоит в длительности эндогенной активности, которая является следствием того, что она полностью расслоилась в недрах своей материнской гигантской планеты (Протоземли) под давлением ее флюидной оболочки, что определило огромный водно-водородный запас флюидов в ее жидком ядре. В отличие от Земли планеты ее группы расслаивались в режиме перехода от протопланетной к планетной стадии развития, что определило ограниченный запас флюидов в их ядрах и более быструю консолидацию с потерей эндогенной активности и магнитных полей. Это сближает их с массивными спутниками планет-гигантов, эндогенная активность которых, судя по Луне, продолжалась около 1,5 млрд. лет. У Луны она завершилась 3,2 млрд. лет тому назад вместе с потерей Луной собственного магнитного поля (сохранилась только остаточная намагниченность лунных пород). Одновременно Луна потеряла и сейсмическую активность, которая была сосредоточена на ее видимой стороне и коррелировала с образованием депрессий лунной коры (морей), заливавшихся базальтами. Очаги лунотрясений, располагавшиеся в нижней мантии, прослеживаются только по слабым потрескиваниям (рис. 1)<sup>7</sup>.

Открытие эндогенно-активных массивных спутников относится к крупнейшим достижениям астрономии, позволившим найти им место в общем развитии планет Солнечной системы. К проявлениям этой активности относится не только вулканизм (преимущественно на сторонах, обращенных к их материнским планетам-гигантам), в том числе современный (на Ио – спутнике Юпитера), но и высокая сейсмичность.

Спутники, центробежно выбрасываемые из их флюидных оболочек планет-гигантов, нередко взрывались под давлением флюидов, заключенных в их недрах. Например, Фобос и Деймос (спутники Марса) представлены обломками более крупных спутников.

Землетрясения отражают напряженное состояние Земли, обусловленное наличием у нее флюидного жидкого никель-железного ядра, генерирующего ее магнитное поле. Кристаллизация твердого субъядра, в состав которого флюидные компоненты практически не входят, приводит к непрерывному повышению в земном ядре флюидного давления. Это реализуется частыми импульсами его дегазации, создающими восходящие флюидные потоки (плюмы), которые и создают эндогенную активность Земли во всех ее проявлениях. Непрерывность ее развития наиболее наглядно проявляется в землетрясениях: «...каждую минуту на Земле происходят 1–2 землетрясения, что за год составляет несколько сотен тысяч, из которых одно – катастрофическое, 10 – сильно разрушительных, 100 – разрушительных и 1000 – сопровождается повреждениями сооружений»<sup>1</sup>. Поскольку землетрясения характеризуются гипоцентрами – выделением громадной энергии в ограниченном объеме в глубинах Земли, – наиболее вероятной представляется взрывная природа эндогенных землетрясений, создаваемых импульсами дегазации земного ядра. В работе И.К. Карпова с соавт.<sup>2</sup> предполагается образование в жидком ядре Земли тяжелых углеводородов, вынос которых в мантию и земную кору сопровождается взрывным превращением их в легкие углеводороды, создающим взрывные очаги землетрясений. В отличие от этой точки зрения, согласно нашему исследованию<sup>3</sup>, в импульсах дегазации из земного ядра выносятся в основном водород, а углеводороды образуются в мантии ( $3\text{H}_2 + \text{CO} = \text{CH}_4 + \text{H}_2\text{O}$ ) в магматических очагах и утяжеляются при последующей их дегазации ( $2\text{CH}_4 = 2\text{CH}_3 + \text{H}_2$ ). Взрывная же ситуация создается стремительностью выноса водорода из ядра, которая порождает перепады флюидного давления и взрывное расширение флюидов на разных уровнях мантии и земной коры.

Приповерхностные процессы подобного рода приводят к образованию на платформах алмазоносных взрывных кольцевых структур<sup>4</sup>.

На глубину очаги землетрясений, создающие землетрясения, прослеживаются сейсмоприборами до 700 км. По ним определяется граница тектоносферы. В последние годы наметилась тенденция распространить

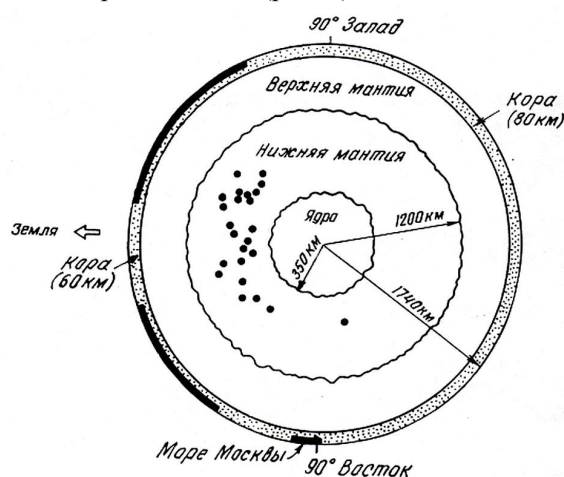


Рис. 1. Схема строения Луны. Черным цветом на лунной коре обозначены вулканические депрессии (морья), черными точками в нижней мантии обозначены очаги лунотрясений (слабых потрескиваний).

<sup>2</sup> Уипл Ф.Л. Семья Солнца: планеты и спутники Солнечной системы. М.: Мир. 1984. 316 с.

<sup>1</sup> Сывороткин В.Л. Землетрясения // Пространство и время. 2(4). 2011. С. 124.

<sup>2</sup> Карпов И.К., Зубков В.С., Бычинский В.Л., Артименко М.В. Детонация в мантийных потоках тяжелых углеводородов // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 6. С. 754–762.

<sup>3</sup> Маракушев А.А., Маракушев С.А. Р-Т-фазии простых углеводородных и органических веществ системы С-Н-О // ДАН. 2006. Т. 406. № 4. С. 521–527.

<sup>4</sup> Маракушев А.А., Панеях Н.А. Формирование алмазоносных кольцевых структур // Пространство и Время. 2011. № 2 (4). С. 118–123.

тектоносферу на всю мантию<sup>5</sup>. Это подчеркивает важную роль флюидного воздействия земного ядра на развитие тектонических движений, которые во многом стимулируются взрывными землетрясениями.

Землетрясения и магматизм на Земле наиболее тесно генетически связаны на активных континентальных окраинах, отделяющихся от океанов или окраинных морей глубоководными желобами. От этих желобов на глубину в сторону континентов погружаются сейсмофокальные зоны<sup>1</sup> или зоны Беньофа<sup>2</sup>, вдоль которых преимущественно и располагаются очаги землетрясений. Сейсмофокальные зоны разделяются на два типа (рис. 2)<sup>1</sup>, отвечающие островным дугам на западной окраине Тихого океана (тип А) и окраинным горным хребтам (Андам) на востоке Тихого океана (тип Б). В типе А очаги землетрясений быстро погружаются в мантию, достигая больших глубин (рис. 3)<sup>1</sup>. В типе Б они остаются на небольшой и умеренной глубине. Это деление коррелирует с деструктивной эволюцией континентальных окраин

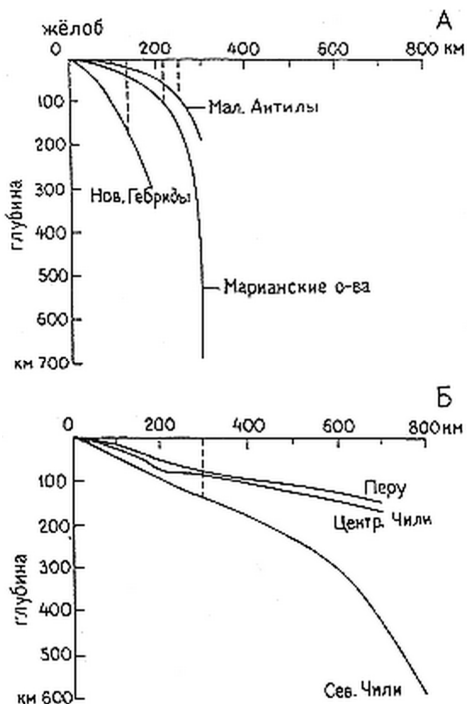


Рис. 2. Типичные зоны Беньофа: А – островные дуги. Б – три сегмента Андской активной окраины. Вертикальная штриховая линия показывает положение вулканического фронта в каждом конкретном случае

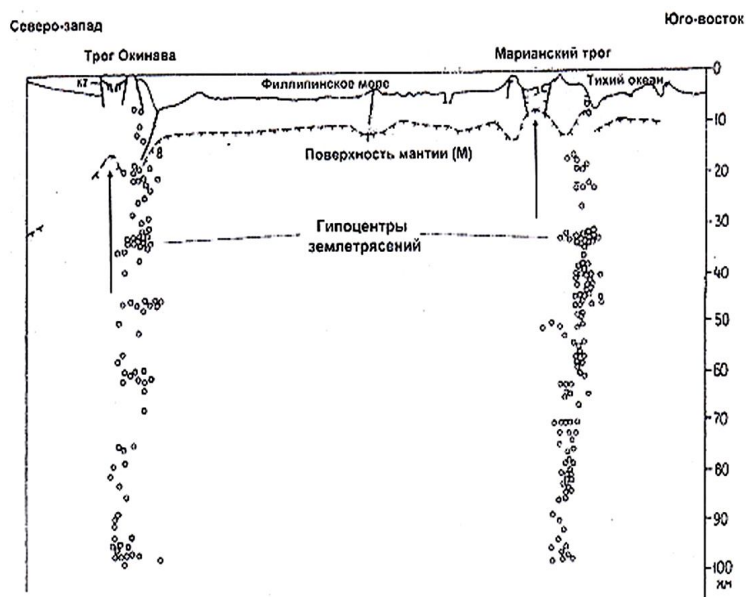


Рис. 3. Гипоцентры землетрясений (круглые знаки) на геофизическом разрезе через Филиппинское море. Вертикальными стрелками указаны воздымания мантии, соответствующие трогам Филиппинскому и Окинава.

в направлении Б→А. Тип Б континентальных окраин характеризуется громадной мощностью земной коры, достигающей 75 км (в Андах) и вулканизмом, представленным коровыми базальт-андезитовыми вулканами (с преобладанием андезитов). В тылу окраинных хребтов (со стороны континентальной платформы) развиваются депрессии окраинных морей, в результате чего окраинные хребты сменяются островными дугами с небольшой мощностью континентальной коры, вытесняемой в корреляции с развитием мантийного вулканизма и сейсмичности типа А. Для мантийных вулканов характерно практическое отсутствие андезитов и развитие субщелочных базальтов. Разделение вулканов островных дуг на коровые (К) с небольшой глубиной магматических очагов, и мантийные (М), магматические очаги которых находятся в глубинах мантии, было установлено В.Л. Сывороткиным (рис. 4) при изучении Курильской островной дуги. Им было показано, что в породах мантийных вулканов в отличие от пород коровых вулканов – повышенное содержание калия, тория, урана, что сближает их с вулканическими породами окраинных морей, отделяющих островные дуги от континентов. Геофизиками эти соотношения называются обращенностью рельефа мантии. Окраинные моря образуются в депрессиях континентальной коры, навстречу которым прослеживается вздымание мантийного субстрата, как показано изолиниями глубины мантии (рис. 5)<sup>1</sup>. Окраинные моря – уникальные структуры континентальных окраин с самой тонкой континентальной и местами океанической корой и осадочными депрессиями в обрамлении, в том числе нефтеносными. К ним приурочены эпицентры самых глубинных землетрясений.

<sup>5</sup> Пушаровский Ю.М. Строение, энергетика и тектоника мантии Земли // Вестник РАН. 2005. Т. 75. № 12. С. 1115–1128.

<sup>1</sup> Сейсмофокальная зона – зона, в которой сосредоточено большинство глубокофокусных землетрясений. – Прим. ред.

<sup>2</sup> Название дано по имени американского исследователя Х. Беньофа, который в 1949–1955 гг. опубликовал серию работ о сейсмофокальных зонах. Впервые такую зону выявил под Японией в середине 1930-х гг. К. Вадати. – Прим. ред.

<sup>1</sup> Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: МГУ, 1997.

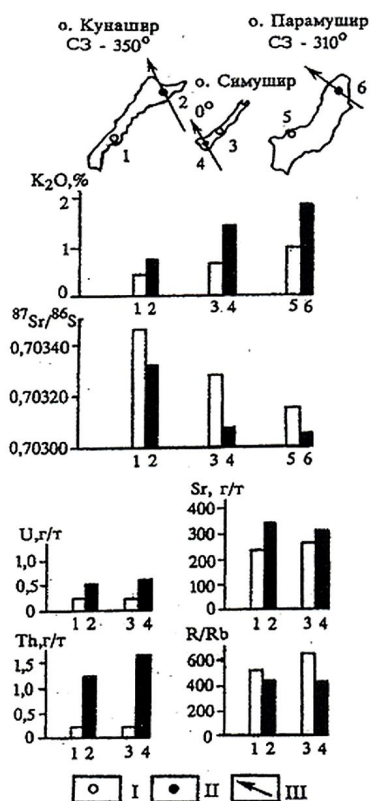


Рис. 4. Петрохимические и геохимические характеристики пород ( $\text{SiO}_2 - 55\%$ ). К- и М-вулканов Курильской дуги: I – К-вулканы: 1 – Менделеева, 3 – Заварицкого, 5 – Чикирачки; II – М-вулканы: 2 – Тятя, 4 – Мильна, 6 – Эбеко; III – направления разломов (острова Кунашар, Симушир, Парамушир).

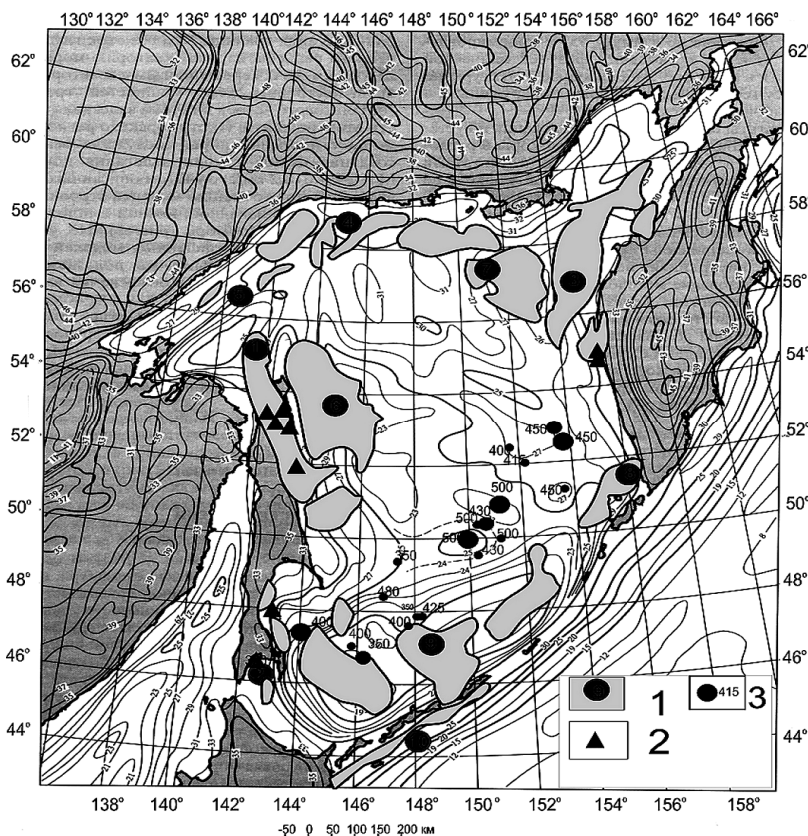


Рис. 5. Изолинии глубины залегания мантийной поверхности Охотского моря и его нефтегазоносность. 1 – нефтегазоносные осадочные бассейны; 2 – наиболее крупные месторождения нефти и газа; 3 – эпицентры глубинных землетрясений с 1965 г. с указанием их глубины (км); размеры знаков отражают магнитуду (4,0–6,5). 1–10 – нефтегазоносные бассейны (в скобках их прогнозные ресурсы в млрд. т нефти): 1 – Северо-Сахалинский (12,4); 2 – Южно-Сахалинский (1,4); 3 – Западно-Камчатский (8,2); 4 – Магаданский (8,0); 5 – Шантарский (1,0); 6 – Дерюгинский (6,2); 7 – Тинровский (6,6), 8 – Гольгинский (1,0); 9 – Южно-Охотский (4,0); 10 – Срединно-Курильский (1,2). Схема составлена с использованием данных<sup>1</sup>

В заключение подчеркнем аналогию образования взрывных землетрясений на Земле и взрывного распада примитивных планет и спутников, одинаково обусловленных сосредоточием в их ядрах водорода в состоянии крайне высокой плотности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов И.К., Зубков В.С., Бычинский В.Л., Артименко М.В. Детонация в мантийных потоках тяжелых углеводородов // Геология и геофизика. 1998. Т. 39. № 6. С. 754–762.
2. Маракушев А.А. Происхождение и эволюция Земли и других планет Солнечной системы // М.: Наука, 1992. 208 с.
3. Маракушев А.А., Зиновьева Н.Г., Грановский Л.Б. Генетические типы минералов ультравысокого давления в метеоритах // ДАН. 2007. Т. 417. № 5. С. 237–243.
4. Маракушев А.А., Маракушев С.А. Р-Т-фазии простых углеводородных и органических веществ системы С-Н-О // ДАН. 2006. Т. 406. № 4. С. 521–527.
5. Маракушев А.А., Панеях Н.А. Формирование алмазонасных кольцевых структур // Пространство и Время. 2011. № 2(4). С. 118–123.
6. Пушаровский Ю.М. Строение, энергетика и тектоника мантии Земли // Вестник РАН. 2005. Т. 75. № 12. С. 1115–1128.
7. Сывороткин В.Л. Землетрясения // Пространство и время. 2011. № 2(4). С. 124.
8. Сывороткин В.Л. Коровые вулканы Курило-Камчатской дуги. М.: Геоинформмарк, 1996. 52 с.
9. Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. М.: Наука, 2006. 129 с.
10. Уипл Ф.Л. Семья Солнца: планеты и спутники Солнечной системы. М.: Мир, 1984. 316 с.
11. Фролова Т.И., Бурикова И.А. Магматические формации современных геотектонических обстановок. М.: МГУ, 1997.
12. Marakushev A.A. Cosmic petrology and the planetary evolution of the Solar System // Astronomical and Astrophysical Transactions. 2005. V. 24. N 6. P. 507–519.

<sup>1</sup> Тектоническое районирование и углеводородный потенциал Охотского моря. М.: Наука, 2006. 129 с.