

## РЕОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ С.Н. ИВАНОВА. ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ: ПРОШЛОЕ, НАСТОЯЩЕЕ, БУДУЩЕЕ

В.А. Коротеев, К.С. Иванов, А.И. Русин, Е.И. Богданова

Смена парадигм, вступившая в активную фазу в конце 60-х годов прошлого столетия, стимулировала рождение новых идей в науках о Земле, принципиально меняющих основы геологических знаний. Некоторые из них, например, идея об образовании орогенических поясов Земли в результате открытия и закрытия океанов или «цикла Уилсона», были сразу же востребованы и получили широкое признание, другие – не менее фундаментальные открытия, к которым, несомненно, относится реологическая модель всеобщей гидродинамической зональности консолидированной земной коры С.Н. Иванова, не привлекли внимания и их научная и практическая значимость стали по достоинству оцениваться лишь в последние годы. В докладе Отделения наук о Земле РАН за 1998 год академиком-секретарем Д.В. Рундквистом модель С.Н. Иванова была охарактеризована как научный прорыв, при этом основные положения ее были сформулированы несколько десятилетий назад.

Первые теоретические обоснования модели были приведены С.Н. Ивановым в серии статей, опубликованных в 1969-1970 гг., в том числе и Ежегоднике-1969 ИГиГ УФАИ СССР [Иванов, 1970]. В этой работе, названной «Предельная глубина открытых трещин и гидродинамическая зональность земной коры», на основе критического анализа экспериментальных и расчетных данных по разрушению горных пород, а также имеющихся в то время материалов по флюидному и термальному режимам литосферы, дана расширенная аргументация реологической и гидродинамической расслоенности земной коры и вероятных причин ее воз-

никновения. Впервые было показано, что вопреки распространенным представлениям, основанным на ошибочных интерпретациях опытных данных, в консолидированной земной коре с глубиной происходит не упрочнение, а ослабление пород, связанное с релаксацией напряжений вследствие пластической деформации. Эта деформация происходит не в обезвоженных породах, а в присутствии флюида, находящегося под литостатическим давлением в порах и тонких трещинах. Сохранность зоны литостатических давлений флюида обеспечивается перекрытием ее очень плотной «переходной зоной», в которой отсутствует свободный флюид, а трещины и поры закупорены минеральными новообразованиями. Высказано предположение, что эта зона может отождествляться с границей Конрада, которая фиксирует изменение не плотностных, а реологических свойств пород. Выше «переходной зоны» в земной коре могут существовать открытые трещины, содержащие растворы, гидродинамически связанные с поверхностными водами. Предельная глубина существования таких трещин оценена в 3-7 км.

В этой принципиальной схеме были сконцентрированы потенциальные возможности использования ее в различных областях геологических знаний, что нашло отражение в последующих публикациях С.Н. Иванова и его учеников. Однако, уже на первом этапе разработки модели была оценено значение «переходной зоны» для понимания генезиса гидротермальных рудных месторождений [Иванов, 1969 а, б; 1970 б]. Эта зона создает барьер для проникновения флюидов, находящихся под литостатичес-

ким давлением, в зону гидростатических давлений. В экстремальных обстоятельствах прорыв высоконапорного флюида, обогащенного рудными компонентами, в зону пониженных давлений неизбежно будет сопровождаться их быстрым отделением и осаждением в гидротермальных жилах. Такая трактовка, открывающая принципиально новые возможности в понимании закономерностей образования и локализации месторождений полезных ископаемых, связанных с гидротермами, была сразу же высоко оценена и поддержана академиками В.И. Смирновым и Д.С. Коржинским, которые дали ей зеленую улицу для опубликования в центральной печати [Иванов, 1969 а, 1970 б]. Однако, вопреки ожиданиям, она была не только не оценена тогда по достоинству, но даже просто не воспринята геологической общественностью. Можно лишь предполагать, что причиной этого был явно опережающий свое время характер идеи и ограниченные возможности проверки ее на практике.

Прошло три десятилетия, и эта же идея, применительно к происхождению гидротермальных месторождений, была высказана американским геологом Р. Фурнье [Fournier, 1999]. Примечательно, что все основные посылки и доказательства были буквально скалькированы со статьи С.Н. Иванова, опубликованной в 1970 году, как в этом можно убедиться глядя на таблицу, составленную С.Н. Ивановым сразу после прочтения работы Фурнье (таблица). Напрашивается вывод не только о плодотворности идеи, но и о единственно правильном пути доказательства ее, раз он был так точно воспроизведен другим исследователем. Сам Р. Фурнье, впервые познакомившийся с работами С.Н. Иванова лишь после опубликования своей модели, был поражен этим обстоятельством и почти что назвал С.Н. Иванова «пионером в развитии важных идей, касающихся гидродинамики флюидов в земной коре».

Развитие сейсмических методов и усовершенствование их физической интерпретации, вместе с прогрессом геологических знаний, исследований очагов землетрясений и экспериментальных деформаций пород при высоких температурах и давлениях уже к началу 80-х годов послужили основанием для ревизии традиционных представлений о плотностной расслоенности земной коры (модель Джеффриса). С этого времени стали разрабатываться геолого-геофизические модели «второго

поколения» (по определению С.Н. Иванова [1998]), в которых геологическое объяснение сейсмических данных включало, кроме изменения плотности, колебание реологических свойств. Выделение в разрезе земной коры хрупкого и пластичного слоев, разделенных хрупко-пластичным переходом, положение которого контролировалось величиной геотермического градиента, без учета гидродинамического эффекта поровых вод, тем не менее, открывало новые возможности для интерпретации особенностей деформационных процессов и режимов формирования тектонических структур в областях растяжения. В мировой литературе утвердилось мнение, что идея о связи термальной и тектонической эволюции рифтовых впадин с растяжением и пластическим утонением литосферы, обусловленным внедрением глубинного мантийного материала, принадлежит Д. Мак Кензи [Mc Kenzie, 1978]. Однако, к сходным выводам, на основе палеореконструкций позднедокембрийской предьстории Урала, совершенно независимо пришел и С.Н. Иванов [1977, 1978 и др.]. Более того, именно в этих публикациях, впервые в мировой науке, была высказана идея о неизбежности проявления регионального динамотермального метаморфизма не только в обстановках орогенного сжатия, но и при рифтовом растяжении земной коры.

Результаты приложения реологической модели С.Н. Иванова к истолкованию структуры и предьстории орогенных поясов докладывались на 26-й и 27-й сессиях МГК [Иванов, 1980; Ivanov, Rusin, 1986; и др.]. Как и в отмеченных выше публикациях центральное внимание в докладах отводилось обсуждению вероятных механизмов утонения и разрыва плит, а также геологическому обоснованию временных координат этих событий. Была показана ошибочность распространенных представлений о геологически мгновенном разрыве плит на всю глубину и выдвинута новая концепция полного крупного цикла развития литосферы подвижных поясов, в соответствии с которой продолжительность событий, обуславливающих утонение и разрыв континентальных плит, может значительно превышать длительность всего цикла Уилсона, оцениваемую в то время значением около 200 млн лет. Эти доклады не произвели ожидаемого впечатления на представительную аудиторию. Более того, в одной из рецензий иностранного коллеги мы увидели язвительное замечание о «разработках из вторых

## МЕТОДОЛОГИЯ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Сопоставление основных положений статей С.Н. Иванова и Р.О. Фурнье

	С.Н. Иванов [1970]	Р.О. Фурнье [1999]
Главная идея	Решающей физической причиной образования гидротермальных месторождений является не кондуктивное охлаждение поднимающихся из недр флюидов, а их локальный переход из существующей в земной коре зоны литостатических давлений в зону только гидростатически сдвинутых лишь собственным весом порово-трещинных флюидов	Решающей причиной образования эпitherмальных вулканических месторождений является переход поднимающихся от неглубокой интрузии флюидов из зоны литостатических давлений в зону гидростатических порово-трещинных флюидов
Строение земной коры, вмещающей рудообразующую гидротермальную систему	Гидродинамическая (она же – реологическая) зональность рудогенерирующей системы сверху вниз: 1. Хрупкая охлажденная гидростатическая зона 2. Плотная, высокоградиентная по температуре и давлению переходная зона с закрытыми трещинами 3. Зона пластических деформаций с включением флюидов под литостатическим давлением, образованных интрузиями магм, региональным метаморфизмом и другими причинами.	То же, но в качестве источника флюидов в литостатической зоне рассматриваются лишь неглубокие магматические и интрузии
Главная, непосредственная причина образования	Падение давления, резкое падение давления и температуры (дрессельный эффект Джоуля-Томсона)	Падение давления, падение температуры.
Мотивировка падения РТ	Рассмотрена диаграмма изменения фазового состава H <sub>2</sub> O в поле давление – энтальпия в большом интервале изменения давления (от 0 до 3500 бар)	Рассмотрена диаграмма изменения фазового состава H <sub>2</sub> O в поле давление – энтальпия в более узком интервале изменения давления (от 0 до 500 бар)
Роль растворов отдельных минералов при изменении давления и температуры	Обращено внимание на решающее значение падения давления для растворимости в водном флюиде кварца и кальцита.	То же; более подробно в приложении к рассматриваемой модели гидротермальных месторождений над неглубокой интрузией и с использованием новых данных, полученных после 1970 г.
Особенности действия вертикальной рудогенерирующей системы	1. Периодический с переменным временным интервалом прорыв труднопроницаемой периферийной зоны флюидами благодаря возрастанию их давления, передаваемого путем гидроразрыва с глубоких горизонтов или в сочетании этого механизма с тектоническими нарушениями 2. Периодическая самозакупорка прорыва плотной периферийной зоны путем сжатия вследствие падения давления, перекристаллизации и отложения жильных минералов	То же  То же
Потенциальные источники рудоотложения	Разнообразные, в первую очередь – зоны прогрессивного регионального метаморфизма осадочных толщ, остывающие и интрузии магм.	Рассмотрен только случай поступления флюидов из неглубокой интрузии. О других возможных источниках ничего не говорится.
Общенаучные выводы	В земной коре материков существует вертикальная гидродинамическая (она же – реологическая) зональность с плотной очень труднопроницаемой зоной между верхней областью с гидростатическим давлением порово-трещинных флюидов и нижележащей областью с литостатическим поровым давлением. Изменение давления при движении флюидов играет решающую роль в рудоотложении	Отсутствуют

и треских рук», предлагаемых читателям международного издания. И только представленный расширенный список ранних публикаций С.Н. Иванова, позволил сбить это замечание и показать приоритетность разработок, которые по незнанию приписывались западным ученым.

С конца 80-х годов С.Н. Иванов вплотную занялся совершенствованием своей модели, которую он называл «... первой еще далеко несовершенной моделью третьего поколения» [Иванов, 1998, с.8]. Аргументировалось это тем, что для объяснения геофизических границ в земной коре в этой модели привлекаются не только все главные толкования реологических моделей «второго поколения», но и совершенно новое объяснение сильного падения прочности пород в средней коре вследствие действия противодавления порового флюида. С 1990 по 2002 год им было выпущено около 15 публикаций, в том числе 4 отдельных книги, посвященных различным вопросам реологической и гидродинамической зональности земной коры. Даже очень сокращенный перечень этих публикаций, приведенный в списке литературы, позволяет увидеть тот круг проблем, которым уделялось повышенное внимание, и выделить те положения, которые показывают оригинальность модели С.Н. Иванова. Базовым положением модели является непроницаемая для флюидов «барьерная» или «переходная зона», располагающаяся в интервале глубин между 7 и 15 км, которая образуется в результате закрытия трещинно-порового пространства. Она разделяет хрупкий («гидростатический») и пластичный («литостатический») этажи и в большинстве случаев совпадает с «хрупко-пластичным переходом», однако, в областях с очень низким тепловым потоком и тяжелыми породами кровли «переходная зона» лежит выше хрупко-пластичной границы реологических свойств коры. Вследствие резких различий реологических свойств пород в гидростатической и переходной зонах с одной стороны и в литостатической – с другой, на их границе, непосредственно ниже переходной зоны, при деформации образуется тектонический срыв – «отделитель». Переходная зона и характерный ее элемент – отделитель, являются одной из самых важных границ внутри литосферы, отмечаемых сейсмикой как граница преломленных, отраженных и, отчасти, обменных волн –  $K_1$ . В типичных случаях граница  $K_1$  обусловлена не резким изменением каких-то физико-химических свойств пород, а закрыти-

ем трещинно-порового пространства. Многие из этих положений, высказывавшиеся в первом варианте модели в предположительной форме, получили утвердительное звучание при последующих публикациях, учитывающих результаты сверхглубокого бурения, а также данные изучения глубинных горизонтов земной коры, выведенных к поверхности в областях активного и пассивного (постколлизийного) растяжения [Иванов, 1990-1998, S. Ivanov, K. Ivanov, 1993; и др.].

В работе, посвященной критическому рассмотрению реологических моделей земной коры, С.Н. Иванов писал: «Чтобы правильно понять природу вертикальной гидродинамической зональности консолидированной земной коры, надо ясно представлять, что такое переходная зона... Примитивное представление о ней как о зоне, в которой главные характеристики верхней, гидростатической зоны меняются до их значений в литостатической зоне, как это, видимо, нередко имеет место в регионах с мощными скоплениями уплотняющихся осадочных толщ, не отвечают ни теоретическим соображениям, ни наблюдениям в природе» [Иванов, 1998, с. 27]. Именно такое представление о природе переходной зоны, основывающееся преимущественно на ошибочном понимании гидродинамики уплотняющихся осадков в локальных регионах, увидел С.Н. Иванов в публикациях И.Г. Киссина [1996 и др.], претендующих на приоритет в создании единой гидродинамической модели земной коры материков. В этой модели, внешне сходной с многократно опубликованной моделью С.Н. Иванова, выделяются сверху вниз гидродинамические зоны: 1) гидростатических давлений, 2) переходная промежуточных давлений, подстилаемая слоем с очень низкой проницаемостью, 3) литостатических давлений на порово-трещинный флюид. Причин возникновения непроницаемого слоя, неясно почему отнесенного к нижней части переходной зоны, и природы промежуточных давлений флюида в этой зоне автор не рассматривает. Не приводятся и достаточных обоснований путей миграции флюида, который, по мнению И.Г. Киссина, не только отжимается кверху, но и проникает в переходную зону из уплотняющихся осадков, а по пересекающим непроницаемый слой нарушениям может поступать и в зону литостатических давлений (?). На эти и другие ошибочные построения и выводы, а также на отсутствие ссылок на предше-

ствующих исследователей пытался обратить внимание С.Н. Иванов [1998]. Последовавшая затем дискуссия на страницах «Физики Земли» [Иванов, 1999; Киссин, 1999; Иванов, 2002] не привела ни к примирению сторон, ни к разрешению конфликта каким-либо другим путем. Но любопытен факт, что в подборке материалов, сделанной И.Г. Киссиным для защиты своей точки зрения, среди без малого десятка российских и зарубежных авторов, ранее С.Н. Иванова писавших о смене с глубиной в уплотняющихся осадках гидростатического давления на литостатическое, он не смог найти ни одной работы, где говорилось бы о первопричине такой смены – наличии непроницаемой для флюидов зоны и о глобальном значении существования этой зоны. То есть фактически не опроверг приоритет С.Н. Иванова.

Можно было бы поставить на этом точку, поскольку дальнейшего развития дискуссии не будет. Однако, последние публикации И.Г. Киссина в центральной печати показывают, что в обоснования «своей» гидродинамической модели он включает новые «авторские» открытия, забывая при этом об их первоисточнике и недавних заблуждениях, на которые ему указывал С.Н. Иванов [1999]. Такие уточнения уменьшают различия между моделями С.Н. Иванова и И.Г. Киссина и, по-видимому, со временем они полностью будут устранены.

Некоторое недопонимание сути модели С.Н. Иванова или недооценку ее значения можно встретить в работах и других исследователей. Весьма компетентный и уважаемый геофизик Н.И. Павленкова в обзорной статье, посвященной 50-летию глубинных сейсмических зондирований в нашей стране [Павленкова, 2000], описывает реологически ослабленный слой в пределах средней коры континентов. Она признает его глобальное значение и интерпретирует как слой с повышенной трещиноватостью и повышенным содержанием флюидов. Для объяснения происхождения этого слоя она привлекает лишь 2 точки зрения: В.Н. Николаевского, оперирующего данными лабораторных работ по разрушению горных пород при высоком давлении и температуре, и С.Н. Иванова, трактующего этот слой как естественно возникающий под непроницаемой крышкой благодаря высокому противодействию флюидов. Н.И. Павленкова не комментирует, какая из этих моделей больше соответствует действительности. Модель В.Н. Николаевского [Николаевский,

Шаров, 1985] является одной из наиболее известных и широко цитируемых в нашей стране. Однако эта модель, по мнению С.Н. Иванова [1998], несовместима с его моделью. В ней изначально заложены ошибочные выводы о необычайно глубоком распространении незакрытого трещинно-порового пространства и гидростатическом давлении флюида в средней коре, ограничиваемой сейсмическими границами  $K_1$  и  $K_2$ . Это предположение полностью опровергается замерах давлений флюида в сверхглубоких скважинах, показывающими уже на глубинах около 7 км надгидростатические значения.

Модель вертикальной гидродинамической и одновременно реологической зональности литосферы С.Н. Иванова пока не получила всеобщего признания, хотя ее значение в области гидротермального рудообразования, тектоники, петрологии магматических и метаморфических пород, гидрогеологии и генезиса глубинных залежей углеводородов начинает осознаваться нетрадиционно мыслящими исследователями. Наряду с высоким уровнем теоретической обоснованности, правомерность ее подтверждается и геологической практикой. Наглядно это было показано на примере Провинции бассейнов и хребтов в Кордильерах Северной Америки [Иванов, Иванов, 1996]. Этот мировой эталонный регион длительного растяжения земной коры, исследованный всеми современными методами, послужил основным полигоном при разработке большинства известных моделей («простого» и «чистого» сдвигов, «вращающегося шарнира», и др.) формирования разномастных структур в реологически расслоенной земной коре. Здесь впервые были задокументированы выходы на поверхность «палеотделителей» (детачментов), разделявших в разные периоды хрупкий и пластичный этажи коры, характеристика которых полностью совпала с теоретическими предсказаниями С.Н. Иванова. Позже «палеотделители» были обнаружены во многих областях растяжения Северной Европы и Азии [Иванов, 1998].

Продолжают поступать новые подтверждения истинности модели С.Н. Иванова и от геофизиков. Так, недавно была отстроена сейсмотермальная структура земной коры в северо-западной части Индии [Thiagarajan et al, 2001], где по данным ГСЗ получен разрез, включающий верхнюю кору, мощностью около 10 км с  $V_p$ , изменяющейся с глубиной от 5,9 до 6,3 км/сек, которая подстилается 2-км волноводом с  $V_p = 5,5$  км/сек.

И, наконец, данные сверхглубокого бурения, явившиеся настоящим пробным камнем, для основных положений модели. Анализ результатов этих работ С.Н. Ивановым уделялось особое внимание. Интерпретация их проводилась большинством исследователей на основе плотностно-реологических моделей и в характеристиках флюидного режима содержалось много ошибочных трактовок, не учитывающих влияние технических и других факторов при опытных замерах давлений флюидов и немногочисленных экспериментах по гидроразрывам. Переинтерпретация результатов бурения, частично опубликованная [Иванов, 2003] и во многом подготовленная к печати, позволила показать, что все сверхглубокие скважины (СГ-3 на Кольском полуострове, КТВ в Германии, Гравберг и Стенберг в Швеции) вскрыли не только хрупкий («гидростатический») этаж, но и переходную зону с палеоотделителями, и максимально приблизились или даже вошли в зону литостатических давлений флюида. Если бы бурение шведских скважин не остановилось в плотной непроницаемой для флюидов зоне, а было продолжено, то это могло бы привести к вскрытию зоны повышенных давлений флюида, обогащенного углеводородами. Прямым указанием на это были небольшие поступления нефти на забое, позволяющие полагать, что положительный прогноз С.Н. Иванова о перспективах глубоких горизонтов земной коры на крупные запасы углеводородов со временем получит еще более надежные подтверждения.

Хочется верить, что обсуждение модели С.Н. Иванова, увидевшей свет в первом номере Ежегодника, не завершится нашим ретроспективным очерком, а продолжится и в последующих выпусках. Заложенные в ней потенциальные возможности использования в различных областях геологических знаний позволяют надеяться, что она займет достойное место в ряду наиболее выдающихся открытий в науках о Земле и десятилетия упорного труда талантливого исследователя и генератора новых идей будут по достоинству оценены широкой геологической общественностью.

*Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ (грант 05-02-64202) и гранта Президента РФ № НШ-85.2003.5*

*Иванов С.Н.* О причинах образования гидротермальных месторождений // Доклады АН СССР 1969а. № 1. Т. 186. С. 158-161.

*Иванов С.Н.* Особенности образования рудных месторождений, связанных с гидротермами // Тр. II Урал.петрограф. совещ. Т.1. Свердловск, 1969б. С. 60-86.

*Иванов С.Н.* Предельная глубина открытых трещин и гидродинамическая зональность земной коры // Ежегодник-1969 ИГГ. Свердловск: УФАИ СССР, 1970а. С. 212-233.

*Иванов С.Н.* О причинах образования гидротермальных рудных месторождений // Закономерности размещения полезных ископаемых. Т. IX. М. Наука, 1970б. С. 20-47.

*Иванов С.Н.* О байкалидах Урала // Докл. АН СССР. 1977. Т. 237. № 5. С. 1144-1147.

*Иванов С.Н.* Метаморфизм разрыва плин // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 908-912.

*Иванов С.Н.* Зона утонения при разрыве плин и ее значение для понимания структуры и истории складчатых поясов // Геология альпид «тетисного» происхождения. Докл. сов. геол. на XXVI сес. МГК Тектоника. М.: Наука. 1980. С. 45-53.

*Иванов С.Н.* Зоны пластических и хрупких деформаций в вертикальном разрезе литосферы // Геотектоника. 1990. № 2. С. 3-14.

*Иванов С.Н.* Вероятная природа главных сейсмических границ в земной коре континентов // Геотектоника. 1994. № 3. С. 3-11.

*Иванов С.Н.* О реологических моделях земной коры; критическое рассмотрение. Екатеринбург: УрО РАН, 1998. 41с.

*Иванов С.Н.* Непроницаемая зона на границе верхней и средней части земной коры // Физика Земли. 1999. № 9. С. 96-102.

*Иванов С.Н.* О главных вопросах флюидного режима земной коры в связи со статьей И.Г. Киссина на эту тему // Физика Земли. 2002а. № 2. С. 92-95

*Иванов С.Н.* Роль флюидов в реологической стратификации земной коры с учетом данных сверхглубокого бурения. Кольская скважина СГ-3. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН. 2002б. 151 с.

*Иванов С.Н., Иванов К.С.* Режимы и структуры растяжения Провинции бассейнов и хребтов и Кордильерах Северной Америки. Екатеринбург: УрО РАН. 1996. 150 с.

*Киссин И.Г.* Флюидонасыщенность земной коры, электропроводность, сейсмичность // Физика Земли. 1996. № 4. С. 30-40.

*Киссин И.Г.* Некоторые вопросы флюидного режима земной коры: умозрительные построения и факты. // Физика Земли. 1999. № 9. С. 103-108.

*Николаевский В.Н., Шаров В.И.* Разломы и реологическая расслоенность земной коры // Физика Земли. 1985. № 1. С. 16-28.

*Павленкова Н.И.* Основные результаты глубинных сейсмических зондирований за 50 лет исследований // Региональная геология и металлогения, Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2000. № 10. С. 12-21.

*Fournier R.* Hydrothermal processes related to movement of fluid from plastic into brittle rock in the magmatic – epithermal environment // *Econom. Geology*. 1999. V. 94. N 8. P. 1193-1211.

*Ivanov S.N., Ivanov K.S.* Hydrodynamic zoning of the Earth's crust and its significance // *J. Geodynamics*. 1993. V. 17. N 4. P. 155-180.

*Ivanov S.N., Rusin A.I.* Model for the evolution of the linear fold belt in the continents: example of the Urals // *Tectonophysics*. 1986. V. 127. N 3-4. P. 383-397.

*McKenzie D.* Some remarks on the development of sedimentary basins // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1978. V. 40. P. 25-32.

*Thiagarajan S., Ramana D.V., Rai S.N.* Seismically constrained two dimensional crustal thermal structure of the Cambay basin // *Proc. Indian Acad. Sci. Earth and Planet. Sci.* 2001. 110. № 1. P. 1-8.