

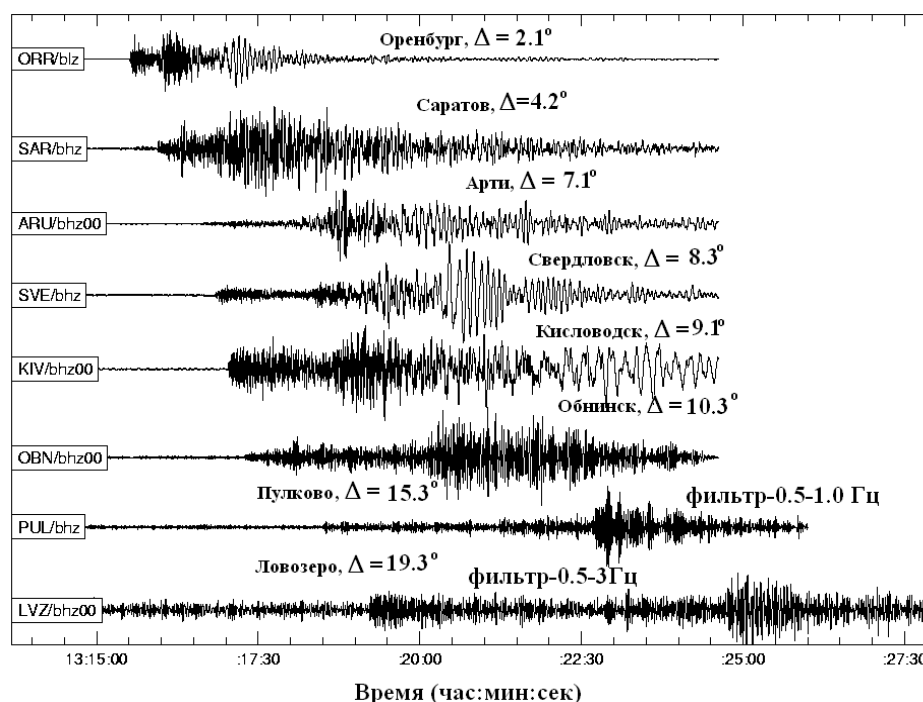


Рис.4. Записи вертикальной компоненты на станциях ГС РАН, ближайших к эпицентру землетрясения 26 апреля 2008 г.

Факт происхождения в бортовой части Прикаспийской впадины землетрясения исключительно интересен, так как до сих пор не зарегистрировано здесь такого уровня событий. Данная статья дает лишь первое представление об его инструментальных и макросейсмических параметрах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Огаджанов В.А., Чепкунас Л.С., Михайлова Р.С., Соломин С.В., Усанова А.В. О каталоге землетрясений Среднего и Нижнего Поволжья // Землетрясения Северной Евразии в 1995 году. – М.: ОИФЗ РАН, 2001. – С. 119-127.
2. Чепкунас Л.С., Михайлова Р.С., Прибылова Н.Е. Поволжье за 1974-1991 гг. // Землетрясения Северной Евразии в 2000 году. – Обнинск: ГС РАН, 2006. – С. 337-346.
3. Сейсмические модели литосферы основных геоструктур территории СССР. «Наука», М.: 1980. 184 с.
4. Землетрясения и микросейсмичность в задачах современной геодинамики Восточно-Европейской платформы. // Ред. Н.В. Шаров, А.А. Маловичко, Ю.К. Щукин Кн. 1. Петрозаводск. 2007. 381 с.
5. Уломов В.И., Шумилина Л.С. Комплект карт общего сейсмического районирования территории Российской Федерации – ОСР-97. Масштаб 1: 8 000 000. Объяснительная записка и список городов и населенных пунктов, расположенных в сейсмоактивных районах. М. ИФЗ. 1999. 57 с.
6. Газета «Казахстан сегодня» от 29.04.2008 г.
7. Инструкция о порядке производства и обработки наблюдений на сейсмических станциях ЕССН СССР. М.: Наука, 1982. 272 с.
8. Габсатарова И.П., Чепкунас Л.С., Бабкова Е.А., Татевосян Р.Э., Плетнев К.Г. Сальское землетрясение 22 мая 2001 года с $M_S=4.7$, $I_0=6-7$ (Северный Кавказ) // Землетрясения Северной Евразии в 2001 году. – Обнинск: ГС РАН, 2007. – С. 301-316.

НОВЫЕ ДАННЫЕ О СОКРАЩЕНИИ РАДИУСА ЗЕМЛИ И ПЛАНЕТ

Орленок В.В.

Российский государственный университет имени И. Канта, orlenok@albertina.ru

В науках о Земле существуют различные, нередко противоположные мнения о направленности эволюции нашей планеты. Одни исследователи придерживаются гипотезы расширения Земли, другие настаивают на ее, якобы, пульсационном развитии и лишь очень немногие разделяют классические идеи контракции, берущие начало от гипотезы Канта-Лапласа, впоследствии развитой Эли де Бомоном (1854) и Э. Зюссом (1909) [1,2,4]. Более четверти

века назад автор модифицировал идею контракции, основываясь на достижениях науки того времени, и обосновал концепцию «холодной контракции» Земли [4]. К сожалению, эта концепция не получила дальнейшего развития, так как не вписывалась в рамки господствовавших идей плейттектоники.

По мере накопления новых знаний, особенно в области докембрийской геологии, идеи прогрессивного изменения основных параметров Земли в ходе ее эволюции становились все более востребованными. Огромные тепломассо-потери в процессах вулканизма, фотолиза воды и диссипации молекулярного водорода в космическое пространство позволяют количественно оценить и, следовательно, определить изменения радиуса, объема и площади поверхности Земли за все время ее существования. Эти изменения оказались настолько существенными, что не учитывать их уже не представляется возможным.

УМЕНЬШЕНИЕ РАДИУСА ЗЕМЛИ ИЗ РАСЧЕТА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ЭНЕРГИИ ГРАВИТАЦИОННОГО СЖАТИЯ

Запишем выражение энергии E поля тяготения шара в виде [4]:

$$A = \frac{3}{5} \frac{GM^2}{R},$$

где G гравитационная постоянная, M – масса Земли, R – ее радиус

Найдем энергию гравитационного сжатия земного шара на единицу измерения (см):

$$E = \frac{\partial A}{\partial R} = \frac{3GM^2}{5R^2} = 3 \times 6,67 \cdot 10^{-8} \text{ см/г} \cdot \text{с}^2 \times (5,987)^2 / 5 \times (6371)^2 = 3,6 \cdot 10^{30} \text{ эрг/см.}$$

С учетом того, что $1 \text{ эрг} = 0,24 \cdot 10^{-7} \text{ кал}$, эта величина соответствует количеству тепла $Q = 8,6 \cdot 10^{22} \text{ кал/см}$. Однако, полученное значение не дает информации о количестве теплового потока в единицу времени и поэтому не может быть использована для оценки сокращения радиуса за счет гравитационного сжатия.

Для решения этого вопроса рассмотрим структуру наблюдаемого теплового потока на поверхности Земли, который составляет $2 \cdot 10^{20} \text{ кал/год}$ [9]. До сих пор считается, что все это тепло имеет радиогенную природу, обусловленную распадом долгоживущих изотопов U^{238} , Th^{232} , K^{40} [8,9]. Период полураспада K^{40} составляет $1,31 \cdot 10^9$ лет, следовательно, этот изотоп свои ресурсы исчерпал $2,62 \cdot 10^9$ лет назад, т.е. к началу протерозоя, поэтому в расчетах генерации радиоактивного тепла учитываться не будет.

Оценим содержание упомянутых радиоактивных в сиалическом слое земной коры (10^{-5} г/г), в подстилающем его мафическом слое, состоящем из комплекса ультраосновных и основных пород (10^{-6} г/г) и в мантии, расположенной выше внешнего ядра и до подошвы мафического слоя ($6,9 \cdot 10^{-8} \text{ г/г}$) [3,9].

Масса вещества мантии составляет $2,5 \cdot 10^{27} \text{ г}$, сиалического слоя мощностью 10 км и плотностью $2,7 \text{ г/см}^3$ — $1,4 \cdot 10^{25} \text{ г}$, масса мафического слоя мощностью 25 км и плотностью — $3,0 \text{ г/см}^3$ — $3,8 \cdot 10^{25} \text{ г}$.

Примем генерацию тепла U^{238} — $0,94 \text{ эрг/г} \cdot \text{с}$, Th^{232} — $0,29 \text{ эрг/г} \cdot \text{с}$, габбро, базальт и перидотиты мафического слоя генерируют соответственно — $53 \text{ эрг/г} \cdot \text{год}$ и $0,35 \text{ эрг/г} \cdot \text{год}$ (среднее $0,62 \text{ эрг/г} \cdot \text{год}$) [8,9].

Определим генерацию тепла сиалическим слоем:

$$Q_{\text{сiал}} = 1,4 \cdot 10^{25} \text{ г} \times 10^{-6} \text{ г/г} \times 6,2 \cdot 10^6 \text{ эрг/г} \cdot \text{год} = 8,7 \cdot 10^{26} \text{ эрг/год} \times 0,24 \cdot 10^{-7} \text{ кал} = 2,08 \cdot 10^{19} \text{ кал/год}$$

или, округляя — $2,1 \cdot 10^{19} \text{ кал/год}$.

Определим генерацию тепла мафическим слоем земной коры:

$$Q_{\text{маф}} = 3,8 \cdot 10^{25} \text{ г} \times 26,7 \text{ эрг/г} \cdot \text{год} = 1,1 \cdot 10^{27} \text{ эрг/год} \times 0,24 \cdot 10^{-7} \text{ кал} = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ кал/год}.$$

Таким образом, земная кора генерирует в сумме $4,7 \cdot 10^{19} \text{ кал/год}$ тепла.

Определим вклад мантии в генерацию тепла:

$$Q_{\text{м}} = 2,5 \cdot 10^{27} \text{ г} \times 6,9 \cdot 10^{-8} \text{ г/г} \times 6,2 \cdot 10^6 \text{ эрг/г} \cdot \text{год} = 1,07 \cdot 10^{27} \text{ эрг/год} \times 0,24 \cdot 10^{-7} \text{ кал} = 2,6 \cdot 10^{19} \text{ кал/год}$$

Таким образом, в структуре наблюдаемого теплового потока Земли радиогенное тепло составляет $0,73 \cdot 10^{20} \text{ кал/год}$. Следовательно, оставшаяся величина $1,27 \cdot 10^{20} \text{ кал/год}$ инициируется энергией гравитационного сжатия Земли. Используя полученное выражение $Q_{\text{гр.сж}}$, составим уравнение:

$$8,6 \cdot 10^{22} \text{ кал/см} \times \Delta R \text{ см} = 1,27 \cdot 10^{20} \text{ кал/год} \times 1 \text{ см},$$

откуда находим ΔR уменьшения радиуса Земли, соответствующее наблюдаемому значению теплового потока $Q = 1,27 \cdot 10^{20} \text{ кал/год}$:

$$\Delta R = 1,27 \cdot 10^{20} \text{ кал/год} / 8,6 \cdot 10^{22} \text{ кал/см} = 1,47 \cdot 10^{-3} \text{ см/год}.$$

РАСЧЕТ ОБЩЕГО СОКРАЩЕНИЯ РАДИУСА ЗЕМЛИ

Ранее нами было предпринята попытка определения общего сокращения радиуса Земли путем измерения ее длины окружности, которая соответствовала времени образования кристаллического фундамента континентальных платформ и щитов (в океане — до поверхности фундамента, подстилающего плато-базальтовый слой) [4]. Измерения производились по физическим и тектоническим картам атласов океанов, по четырем ме-

ридианам (30° в.д., 40° в.д., 60° з.д., 70° з.д.) и экватору (0°) [4]. С интервалом в 100 км измерялась амплитуда рельефа до фундамента относительно уровня моря. Из уравнения $L = 2\pi \cdot R$, определялся радиус окружности. Разность между измеренным радиусом (R_1) и современным (R_0) определяет величину сокращения радиуса ΔR за время T завершения образования фундамента. Успехи изучения геологии докембрия показали [7], что образование сиалического слоя фундамента произошло в результате глобального вулканизма, который возник на всей поверхности Земли сразу после завершения аккреции планеты в катархее ($4,4 - 4,0 \cdot 10^9$ лет назад [7]). Это комплекс, выделенный впервые С.Л. Салопом, получил название «алданий» — по одноименному названию докембрийского щита в Восточной Сибири. Имея такой надежный репер, возраст которого был определен по циркониевым зернам, появилась возможность после определения радиуса Земли на конец формирования алдания (табл.1) оценить скорость его изменения во всем интервале времени от 0 до $4,5 \cdot 10^9$ лет:

$$\Delta R = (6956-6370) \text{ км} = 585 \text{ км}$$

Средняя скорость сокращения радиуса составит:

$$5,85 \cdot 10^6 / 4 \cdot 10^9 \text{ лет} = 1,46 \cdot 10^{-2} \text{ см/год},$$

или $146 \text{ км}/10^9 \text{ лет}$.

Таблица 1

Сокращение радиуса Земли, по измерениям ее окружности

Долгота, λ	L, по совр. амплитуде рельефа, км	L _{док.} , по амплитуде рельефа до поверхности алдания, км	R=L/2 π , по современной амплитуде рельефа, км	R _{док.} = L/2 π , км	$\Delta R = R_{\text{док.}} - R_{\text{совр.}}$, км; R _{совр.} =6371 км
0°	42344	43523	6742	6930	560
30 в. д.	41566	42785	6618	6813	443
40 в. д.	40365	42974	6427	6843	473
60 з. д.	40899	44079	6511	7019	648
70 з. д.	45213	45059	7199	7175	804
Среднее ...	42078	43745	6700	6956	585

Установление изменения радиуса позволило определить объем и площадь поверхности Земли (табл. 2) и их изменение в течение $4,5 \cdot 10^9$ лет. С учетом диссипации водорода ($3,08 \cdot 10^{25}$ г) [2] и фотолитических потерь ($0,34 \cdot 10^{25}$ г) [6] была определена масса ($6,02 \cdot 10^{27}$ г) и средняя плотность вещества Земли ($4,36 \text{ г/см}^3$) на конец катархее ($4 \cdot 10^9$ лет).

Таблица 2

Изменение параметров Земли в геологической истории

Время, млрд. лет	Радиус (R), км, R=L/2 π	Объем (V), км ³ , 4/3 πR^3	Площадь поверхности (S), км ² , 4 πR^2	Масса, M=V $\cdot$ ρ	Плотность (ρ), г/см ³
Современное	6370	$1,083 \cdot 10^{12}$	$510 \cdot 10^6$	$5,98 \cdot 10^{27}$	5,52
Поздний протерозой (PR ₂) $1 \cdot 10^9$	6520	$1,15 \cdot 10^{12}$	$530 \cdot 10^6$	$6,0 \cdot 10^{27}$	5,22
Алданий (AR ₁) $4 \cdot 10^9$	6970	$1,38 \cdot 10^{12}$	$609 \cdot 10^6$	$6,02 \cdot 10^{27}$	4,36
Инициальный вулканизм 4,4- $4,0 \cdot 10^9$	7030	$1,44 \cdot 10^{12}$	$620 \cdot 10^6$	$6,02 \cdot 10^{27}$	4,18
Молодая Земля $4,5 \cdot 10^9$	7045	$1,45 \cdot 10^{12}$	$637 \cdot 10^6$	$6,02 \cdot 10^{27}$	4,15
Изменение параметров за $4,5 \cdot 10^9$	675	$0,367 \cdot 10^{12}$	$127 \cdot 10^6$	$0,04 \cdot 10^{27}$	1,37
По В.Кесареву, 1976	7150	$1,5 \cdot 10^{12}$	$641,1 \cdot 10^6$	$6,01 \cdot 10^{27}$	3,84

Сравнивая величину сокращения радиуса за счет гравитационного сжатия Земли ($1,47 \cdot 10^{-3}$ см/год) с величиной общего сокращения радиуса ($1,46 \cdot 10^{-2}$ см/год), обусловленного тепломассо-потерями, нетрудно видеть, что они отличаются на порядок. Иными словами в структуре общего сокращения радиуса Земли его гравитационная компонента составляет лишь 10%. Таким образом, сокращение радиуса Земли за счет гравитационного сжатия за $4 \cdot 10^9$ лет будет равно 58,8 км. Это составляет около 10 % от найденной нами выше величины общего сокращения радиуса Земли (585 км) на время завершения формирования **сиалического слоя алдания**, вызванного общими тепломассо-потерями ($1,46 \cdot 10^{-2}$ см/год). Однако, в отличие от гравитационного сжатия, полученной величине $\Delta R = 1,46 \cdot 10^{-2}$ см/год соответствует тепловой поток $Q = 1,3 \cdot 10^{21}$ кал/год. Как видим, это значение на порядок больше рассчитанного теплового потока ($1,27 \cdot 10^{20}$ кал/год) с учетом его среднего наблюдаемого значения для Земли. Этот факт можно объяснить следующим образом. Сокращение земного радиуса вследствие уменьшения объема Земли, вызванного огромными тепломассо-потерями, происходит эпизодически и фрагментарно по мере накопления напряжений во внешней каменной оболочке, главным образом в твердой коре с периодом, исчисляемым миллионами и десятками миллионов лет. Мелкие же подвижки земной коры, следующие за уменьшением объема сферы, происходят постоянно и выражаются в многочисленных землетрясениях. Возникающая при этом энергия частично переходит в упругие колебания сейсмических

волн, в механические подвижки блоков земной коры, рассеивается в пространство по разломным зонам. Поэтому эта энергия не фиксируется в наблюдаемом тепловом потоке. В среднегодовое значение теплового потока не входят измерения в тектонически и вулканически активных областях, а также в разломных зонах, сольфатарах, фумаролах и участках струйного выделения водорода, CO, CO₂, NH₃ и других глубинных газов.

За всю историю Земли, в результате гравитационного сжатия выделилось:

$$1,27 \cdot 10^{20} \text{ кал/год} \times 4,5 \cdot 10^9 \text{ лет} = 5,7 \cdot 10^{29} \text{ кал.}$$

Этого тепла для инициирования общепланетарного вулканизма на Земле было недостаточно, но вместе с радиогенным теплом:

$$0,73 \cdot 10^{20} \text{ кал/год} \times 4,5 \cdot 10^9 \text{ лет} = 3,3 \cdot 10^{29} \text{ кал}$$

его вполне хватило для инициирования переработки верхней мантии и для постепенного формирования mafического слоя земной коры.

Сиалический слой алдания, обладая более низкой теплопроводностью, чем мантийное вещество, сыграл важную экранирующую роль в накоплении этого глубинного тепла. Таким образом, общее сокращение радиуса Земли включает сокращение за счет тепломассо-потерь и за счет потенциальной энергии гравитационного сжатия Земли.

РАСЧЕТ ИЗМЕНЕНИЯ РАДИУСА ПЛАНЕТ

Полученное значение энергии гравитационного сжатия, образующейся за счет преобразования потенциальной энергии в кинетическую, а затем в тепловую ($5,7 \cdot 10^{29}$ кал) и соответствующее ему сокращение радиуса Земли за $4,5 \cdot 10^9$ лет, равное 66,1 км, позволяют рассчитать аналитическим путем изменение радиуса планет за счет рассчитанного их гравитационного сжатия (табл. 3).

Таблица 3

Сокращение радиуса планет

Планеты	Масса (г)	Гравитационное сжатие – Q (кал/см)	$Q_{пл.}/Q_{земл.}$	Сокращение радиуса $\Delta R = Q_{пл.}/Q_{земл.} \cdot 1,47$ (см/год)	Сокращение радиуса $\Delta R = 4,5 \cdot 10^9$ лет (км)	Сокращение радиуса $\Delta R = 4 \cdot 10^9$ лет (км)
Земля	$5,987 \cdot 10^{27}$	$8,6 \cdot 10^{22}$	1	$1,47 \cdot 10^{-3}$	66,1	58,8
Венера	$4,87 \cdot 10^{27}$	$6,2 \cdot 10^{22}$	0,72	$1,05 \cdot 10^{-3}$	47,2	42,0
Марс	$6,4 \cdot 10^{26}$	$3,4 \cdot 10^{22}$	0,39	$0,57 \cdot 10^{-3}$	25,6	22,8
Меркурий	$3,3 \cdot 10^{26}$	$1,76 \cdot 10^{21}$	$0,2 \cdot 10^{-1}$	$0,29 \cdot 10^{-4}$	1,3	1,16
Луна	$7,3 \cdot 10^{25}$	$1,68 \cdot 10^{20}$	$0,2 \cdot 10^{-2}$	$0,29 \cdot 10^{-5}$	0,130	0,116

Энергия гравитационного сжатия планет земной группы рассчитывалась по тому же уравнению, что и для Земли. Как видно из табл.3 она закономерно уменьшается по мере уменьшения их массы. Столь незначительная потенциальная энергия сжатия, обнаруживаемая у планет земной группы, не могла инициировать глобального вулканизма после завершения их аккреции.

Таким образом, как и на Земле, основным источником начального вулканизма на планетах могло быть только обилие короткоживущих изотопов U²³⁵, Pu²⁴⁴, I¹²⁹ и др., которые обрушились на их поверхность с остатками пылегазового облака на завершающейся стадии их аккреции. Это произошло в результате взрыва массивной молодой Сверхновой, развивавшейся по катастрофическому азотно-углеродному циклу [6]. Если бы это случилось раньше, то обилие короткоживущих изотопов, оказавшись во всей массе мантии Земли и планет, привели бы к их полному расплаву. К счастью, этого не произошло, и короткоживущие изотопы сконцентрировались в лишь поверхностном слое планет, толщиной 25-50 км [6]. Найденные значения сокращения радиуса планет следует рассматривать лишь как часть их общего уменьшения объема, вызванного тепломассо-потерями. В условиях Земли гравитационное сокращение радиуса составляет 10 % от общего его уменьшения. По-видимому, такие же пропорции сохраняются и для планет земной группы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каттерфельд Г.Н. Энциклопедия астро-геологи и планетологи СССР. С-Петербург.:Изд. «Правда», 2003. с. 60-64.
2. Кесарев В.В. Эволюция вещества Вселенной. М.: Атомиздат, 1976. 182 с.
3. Магницкий В.А. Внутренне строение и физика Земли. М.: Наука, 2006. 390 с.
4. Орленок В.В. Физические основы эволюции периферии Земли. Л.: Изд-во Ленинградского ун-та, 1980. 247 с.
5. Орленок В.В. Физика и динамика внешних геосфер. М.: Недра, 1985. 185 с.
6. Орленок В.В. История океанизации и доокеанического прошлого Земли // Океанизация Земли – альтернатива неомобилизма. Калининград: Изд. Калининградского ун-та, 2004. С. 54-87.
7. Салоп Л.И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982.
8. Соболев Э.В. Справочник по изотопной геохимии. М.: Энерго Издат, 1982. 240 с.
9. Стейси Ф. Физика Земли. Мир, 1972. 342 с.