

УДК 550.3

БЫСТРЫЙ РОСТ СДВИГОВОЙ ДЕФОРМАЦИИ В ОСЛАБЛЕННЫХ ЗОНАХ ЛИТОСФЕРЫ

© 2019 г. Б. И. Биргер

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

E-mail: birgerbor@mail.ru

Поступила в редакцию 09.04.2018 г.

Принята в печать 28.05.2018 г.

Ослабленная зона в погружающейся в мантию литосфере может привести к землетрясению после приложения сдвигового напряжения только в том случае, если эффективная вязкость этой зоны очень мала. При малой вязкости за короткое время, прошедшее после приложения напряжения, возникают значительные смещения бортов зоны, что вызывает сейсмические волны большой амплитуды. Закон Андраде, описывающий неустановившуюся ползучесть при постоянном напряжении, примененном в начальный момент времени, приводит к очень малой эффективной вязкости на первых секундах после начального момента. Эффективная вязкость снижается и за счет повышения температуры в ослабленной зоне, вызванного диссипативным тепловыделением. Однако этот процесс происходит недостаточно быстро для того, чтобы за короткое время заметно изменить температуру и эффективную вязкость.

Ключевые слова: неустановившаяся ползучесть, диссипативное тепловыделение, глубокофокусные землетрясения

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002-33372019351-57>

ВВЕДЕНИЕ

Андраде в 1910 г. предложил закон для описания экспериментально наблюдаемой им неустановившейся ползучести при постоянном напряжении, примененном к образцу в начальный момент времени. Позже этот закон получил подтверждение в многочисленных лабораторных исследованиях ползучести горных пород, проводимых при высоких температурах и давлениях, характерных для земных недр [Goetze, 1971; Goetze, Brace, 1972; Murrell, Chakravarty, 1973; Murrell, 1976; Berckhemer, Auer, Drisler, 1979]. Известное в механике представление о том, что при малых деформациях ползучесть является неустановившейся, было впервые введено в геофизику в работе [Weertman, 1978], где была высказана идея о том, что течения в мантии, связанные с малыми деформациями, и, в частности, послеледниковые течения происходят в режиме неустановившейся ползучести. Неустановившаяся ползучесть при переменных напряжениях описывается линейным интегральным уравнением Больцмана. Интегральное ядро этого уравнения связано простым соотношением с функцией

ползучести, которая находится в экспериментах, проводимых при постоянном напряжении. В работе [Birger, 1998] реология, которая описывается интегральным уравнением, сводящимся к закону Андраде в случае постоянного напряжения, названа реологией Андраде. Реология Андраде применялась автором в предыдущих исследованиях [Birger, 1998; 2000; 2007; 2012; 2013; 2016], где рассматривались такие геофизические процессы как затухание сейсмических волн, послеледниковые течения в мантии, малоамплитудные конвективные колебания в литосфере, происходящие при малых деформациях и переменных напряжениях. При исследовании этих процессов удобным математическим аппаратом является преобразование Лапласа по времени. В настоящей работе рассматривается неустановившаяся ползучесть при постоянном напряжении, которая описывается законом Андраде, а не интегральным реологическим уравнением Андраде. Поэтому нет необходимости использовать преобразование Лапласа.

Будет рассмотрен процесс локализации сдвиговой деформации в ослабленной зоне, которая находится в литосферной плите, погружающейся

в мантию. Пониженная прочность этой зоны может быть вызвана, например, ее минералогическим составом, который отличается от окружающей литосферы. Согласно концепции тектоники плит, литосферная плита, которая представляет собой холодный пограничный слой мантийной конвекции, движется как единое целое, не испытывая деформаций. Однако такое движение плиты прерывается в некоторые моменты времени за счет сцепления с соседней плитой. В такие моменты в плите возникают значительные напряжения, которые приводят к землетрясениям. В хрупкой верхней коре Земли землетрясения возникают, когда напряжение превышает предел, определяемый силой трения на разломе. Тогда борта разлома проскальзывают, а их смещение достигает 30 м при сильных землетрясениях [Теркот, Шуберт, 1985]. Образование очагов землетрясений, находящихся на больших глубинах, нельзя объяснить таким способом, поскольку сила трения, которая растет с ростом давления, уже слишком велика в земных слоях, лежащих ниже верхней коры. Следовательно, глубокофокусные землетрясения не связаны с хрупкостью геоматериала, но могут быть объяснены его ползучестью. Сдвиговые течения, возникающие в ослабленной зоне под действием приложенного напряжения, создают деформации ползучести, которые вызывают смещение бортов зоны. Это смещение тем больше, чем ниже эффективная вязкость. Возникшее течение вызывает диссипативное тепловыделение и нагрев ослабленной зоны, который понижает эффективную вязкость, увеличивая при этом скорость деформации и смещение бортов зоны. Если значительное смещение бортов происходит за время порядка нескольких секунд, то этот процесс, связанный с ползучестью и выделением тепла, может вызвать землетрясение [Karato, 2008]. Данный процесс с учетом неуставившейся ползучести, принципиально меняющей его характер, и будет рассмотрен в настоящем исследовании.

НЕУСТАВВШАЯСЯ ПОЛЗУЧЕСТЬ

Лабораторные эксперименты с образцами горных пород, проводимые при постоянном напряжении, приложенном в момент времени $t=0$, и достаточно высокой температуре, показывают, что неуставившаяся ползучесть описывается реологическим законом Андраде:

$$2\varepsilon_{ij} = \frac{\sigma_{ij} t^{1/3}}{A}, \quad (1)$$

$$A = A_\infty \exp\left(\frac{H_a}{3RT}\right) \quad H_a = E_a + pV_a, \quad (2)$$

где: ε_{ij} – девиаторный тензор деформации; σ_{ij} – девиаторный тензор напряжения; A – реологический параметр Андраде; T – температура; p – давление; $A_\infty \approx 3 \cdot 10^6 \text{ Па} \cdot \text{с}^{1/3}$ – значение параметра Андраде при $T \rightarrow \infty$; H_a – энтальпия активации; $E_a \approx 4.5 \cdot 10^5 \text{ Дж/моль}$ – энергия активации; $V_a \approx 10^{-5} \text{ м}^3/\text{моль}$ – объем активации; $R \approx 8 \text{ Дж} \cdot \text{К}^{-1}/\text{моль}$ – универсальная газовая постоянная. Оценки энергии и объема активации характеризуют установившуюся дислокационную ползучесть. При неуставившейся ползучести Андраде энтальпия активации уменьшается в 3 раза, что и отражено в выражении (2) для параметра Андраде [Биргер, 2016]. Подставив в (2) выражение для литостатического давления $p = \rho gh$, где $\rho \approx 3 \cdot 10^3 \text{ кг} \cdot \text{м}^{-3}$ – плотность, $g \approx 10 \text{ м} \cdot \text{с}^{-2}$ – ускорение силы тяжести, нетрудно убедиться, что можно пренебрегать членом pV_a и считать, что $H_a = E_a$ на глубинах h , не превышающих 500 км.

Будем рассматривать такое напряженное состояние, при котором отлична от нуля только xy компонента девиаторного тензора напряжения, и обозначим: $\sigma \equiv \sigma_{xy}$ и $\varepsilon \equiv \varepsilon_{xy}$. Как следует из закона Андраде:

$$2 \frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{\sigma t^{-2/3}}{3A}. \quad (3)$$

Поэтому эффективная вязкость, соответствующая закону Андраде, записывается в виде

$$\eta = 3At^{2/3}. \quad (4)$$

Эффективная вязкость η растет со временем, т. е. происходит упрочнение материала. Когда деформация ползучести достигает значения порядка 0.01, ползучесть Андраде сменяется установившейся ползучестью, при которой скорость деформации $\frac{d\varepsilon}{dt}$ постоянна во времени и пропорциональна σ^3 .

В лабораторных экспериментах, проводимых при достаточно низких и, в частности, при комнатных температурах, наблюдается неуставившаяся ползучесть, описываемая законом Ломнитца [Lomnitz, 1957]:

$$2\varepsilon = \sigma q \ln\left(1 + \frac{t}{\tau_L}\right). \quad (5)$$

Реологические параметры Ломнитца оцениваются как

$$q \approx 2 \cdot 10^{-14} \text{ Па}^{-1} \quad \tau_L \approx 0.1 \text{ с} \quad (6)$$

и почти не зависят от температуры, при которой проводится эксперимент [Биргер, 2007]. Можно считать [Murrell, 1976], что сдвиговая (девиаторная) деформация, возникающая в момент приложения постоянного сдвигового напряжения σ , складывается из упругой деформации, деформации Ломнитца и деформации Андраде и, следовательно, представима в виде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{2} \left[\frac{1}{\mu} + q \ln \left(1 + \frac{t}{\tau_L} \right) + \frac{t^{1/3}}{A} \right], \quad (7)$$

где $\mu \approx 10^{11}$ Па – упругий модуль сдвига. Поскольку реологический параметр q не зависит от температуры, а значение параметра A снижается с ростом температуры, из равенства (7) следует, что при низких температурах деформация Андраде мала по сравнению с деформацией Ломнитца и ею можно пренебречь, а при высоких температурах пренебрежимо мала деформация Ломнитца. Как следует из (7), на малых временах, прошедших с момента приложения постоянной нагрузки, ползучесть описывается законом Ломнитца, а на больших временах законом Андраде, что и подтверждается данными экспериментов. Чтобы наблюдать переход от закона Ломнитца к закону Андраде при низких температурах, когда параметр A велик, эксперимент на ползучесть следует проводить слишком долго. Именно поэтому и считается, что закон Ломнитца описывает низкотемпературную ползучесть. При высоких температурах, напротив, закон Ломнитца действует только очень короткое время после начала эксперимента и быстро сменяется неустановившейся ползучестью Андраде.

Как следует из (3), закон Андраде дает бесконечную скорость деформации и нулевую эффективную вязкость при малых временах t , что, конечно, не соответствует экспериментальным данным. От этого недостатка свободен модифицированный Джеффрисом закон Ломнитца [Jeffreys, 1958], который дает функцию ползучести:

$$2\varepsilon_{ij} = \sigma_{ij} \frac{q_m}{m} \left[\left(1 + \frac{t}{\tau_m} \right)^m - 1 \right], \quad 0 \leq m \leq 1. \quad (8)$$

Закон Джеффриса (8) обобщает законы ползучести Ломнитца и Андраде: в пределе $m \rightarrow 0$ из (8) получается закон Ломнитца (2), а, когда

$m = 1/3$ и $t \gg \tau_m$, из (8) следует закон Андраде (1), причем параметр Андраде связан с $q \equiv q_{1/3}$ и $\tau \equiv \tau_{1/3}$ соотношением

$$A = \tau^{1/3} / 3q. \quad (9)$$

Когда τ мало, уже на малых временах t закон Джеффриса вырождается в закон Андраде. В случае реологии Ломнитца эффективная вязкость принимает вид

$$\eta_L = (t + \tau_L) / q. \quad (10)$$

Параметр Ломнитца τ_L обеспечивает конечную скорость деформации и ненулевую эффективную вязкость на начальной стадии деформации, когда t очень мало. Закон Джеффриса вводит аналогичный параметр τ и для ползучести Андраде. Экспериментальные реологические соотношения (1) и (7) справедливы на временах, превосходящих малые доли секунды. Используя терминологию Джеффриса, можно сказать, что параметр τ очень мал ($\tau \ll 0.01$ с) и, когда $t \gg \tau$, можно применять закон Андраде.

Последовательным соединением реологических элементов называется такое их соединение, при котором приложенное напряжение действует в каждом из элементов, а деформация равна сумме деформаций, создаваемых каждым элементом. При последовательном соединении элементов доминирует тот из них, который приводит к наибольшей деформации. Уравнение (7) соответствует последовательному соединению упругого элемента, элемента Ломнитца и элемента Андраде. Как следует из (7), вклад реологии Ломнитца в деформацию материала пренебрежимо мал, если:

$$t \gg (3Aq)^3, \quad (11)$$

а упругой деформацией можно пренебречь, если:

$$t \gg (A/\mu)^3. \quad (12)$$

Как следует из (11), реологический закон Андраде применим на очень малых временах, прошедших после приложения напряжения, только в том случае, когда $(3Aq)^3 \ll 1$ с. Следовательно, $A \ll 10^{13}$ Па · с^{1/3}. Это условие выполняется только в таком слое Земли, где $\frac{H_a}{3RT}$ имеет минимальное значение (в этом слое температура наиболее близка к температуре плавления). В остальных слоях Земли на малых временах справедлив закон Ломнитца. Именно поэтому

затухание сейсмических волн почти во всех слоях Земли описывается с помощью реологии Ломнитца [Биргер, 2007]. В ослабленных зонах величина параметра Андраде значительно ниже, чем $10^{13} \text{ Па} \cdot \text{с}^{1/3}$, и, следовательно, закон Андраде применим даже на первых секундах после возникновения сдвигового напряжения. Параметр Андраде в ослабленных зонах оценивается как $A \approx 10^{10} \text{ Па} \cdot \text{с}^{1/3}$. При таком значении параметра A неравенство (12) принимает вид $t \gg 0.001 \text{ с}$, и, следовательно, можно пренебречь упругостью в ослабленной зоне (но не вне этой зоны).

ЛОКАЛИЗАЦИЯ ДЕФОРМАЦИИ СДВИГА

Уравнение теплового баланса записывается в виде:

$$c_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \sigma \frac{\partial \varepsilon}{\partial t}, \quad (13)$$

где: c_p – теплоемкость на единицу массы при постоянном давлении, ρ – плотность, λ – коэффициент теплопроводности. Для мантии Земли температуропроводность (коэффициент тепловой диффузии) и теплоемкость на единицу объема оцениваются [Теркот, Шуберт, 1985] как:

$$\begin{aligned} \kappa &= \lambda / c_p \rho \approx 10^{-6} \text{ м}^2 \cdot \text{с}^{-1} \\ c_p \rho &\approx 4 \cdot 10^6 \text{ Дж} \cdot \text{м}^{-3} \cdot \text{К}^{-1}, \end{aligned} \quad (14)$$

причем единица измерения $\text{Дж} \cdot \text{м}^{-3} \equiv \text{Па}$. Когда

$$t \ll d^2 / \kappa, \quad (15)$$

можно пренебречь выносом тепла посредством теплопроводности и рассматривать адиабатический процесс. В правую часть неравенства (15) входит ширина d ослабленной зоны, в которой развивается сдвиговая деформация. Если ширина ослабленной зоны составляет 10 км, то условие (15) принимает вид $t \ll 10^{14} \text{ с} \approx 3 \cdot 10^6 \text{ лет}$.

Когда условие (15) выполнено, уравнение теплового баланса с учетом соотношения:

$$\sigma = 2\eta \frac{d\varepsilon}{dt}, \quad (16)$$

которое определяет эффективную вязкость, принимает вид:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{\sigma^2}{2\eta c_p \rho}. \quad (17)$$

Уравнение (17) описывает рост температуры в рассматриваемой зоне, вызванный вязкой диссипацией энергии. При установившейся ползучести эффективная вязкость сильно зависит

от температуры, что приводит к быстрому росту температуры в зоне. Этот быстрый адиабатический процесс, при котором тепло не успевает выноситься из зоны посредством теплопроводности, называют адиабатической неустойчивостью. Адиабатическая неустойчивость приводит к сильному снижению эффективной вязкости в зоне и рассматривается как возможный механизм глубокофокусных землетрясений [Hobbs, Ord, 1988; Karato, 2008]. В случае неустойчивости ползучести эффективная вязкость зависит от температуры значительно слабее (энтальпия активации в 3 раза ниже), и, как будет показано ниже, нет адиабатической неустойчивости, приводящей к быстрому росту температуры.

Подставляя в (17) соотношения (2) и (4), описывающие реологию Андраде, приходим к уравнению:

$$\begin{aligned} (T' + T_0) \exp\left(\frac{a}{T' + T_0}\right) - T_0 \exp\left(\frac{a}{T_0}\right) - \\ - a \text{Ei}\left(\frac{a}{T' + T_0}\right) + a \text{Ei}\left(\frac{a}{T_0}\right) = \frac{3\sigma^2}{2A_\infty c_p \rho} t^{1/3}, \end{aligned} \quad (18)$$

где

$$T' = T - T_0, \quad a = H_a / 3R \approx 1.5 \cdot 10^4 \text{ К}. \quad (19)$$

$\text{Ei}(x)$ – интегральная показательная функция, для которой

$$\frac{d\text{Ei}(x)}{dx} = e^x / x.$$

Когда $T' \ll T_0$, левая часть уравнения (18) принимает вид:

$$\begin{aligned} (T' + T_0) \exp\left(\frac{a}{T + T_0}\right) - T_0 \exp\left(\frac{a}{T_0}\right) - \\ - a \text{Ei}\left(\frac{a}{T' + T_0}\right) + a \text{Ei}\left(\frac{a}{T_0}\right) \approx T' \exp\left(\frac{a}{T_0}\right). \end{aligned} \quad (20)$$

Положим:

$$T_0 \approx 1500 \text{ К}, \quad \sigma \approx 10^6 \text{ Па}. \quad (21)$$

При таких значениях начальной температуры и возникающего в начальный момент напряжения приходим к оценкам:

$$\frac{3\sigma^2}{2A_\infty c_p \rho} \approx 0.13 \text{ К} \cdot \text{с}^{-1/3}, \quad (22)$$

$$\exp\left(\frac{a}{T_0}\right) \approx \exp(10) \approx 2.2 \cdot 10^4,$$

для которых из уравнений (20) и (22) следует

$$T' = ct^{1/3}, \quad c \approx 6 \cdot 10^{-6} \text{ К} \cdot \text{с}^{-1/3}. \quad (23)$$

На рис. 1 представлена зависимость температуры, которую дает левая часть уравнения (18), от температуры T' , а на рис. 2 – зависимость температуры, которую дает правая часть уравнения (18), от времени t . На этих рисунках температура представлена в градусах Кельвина, а время – в секундах. Сравнение функций, представленных на этих рисунках, показывает, что уравнение (18) имеет решение только при условии $T' \ll T_0$. Формула (23) дает единственное решение уравнения (18), когда значения коэффициентов в этом уравнении определены формулами (22).

Поскольку $T' \ll T_0$, значение реологического параметра A очень слабо зависит от возмущения температуры T' , и деформация, возникающая после приложения напряжения σ , описывается законом Андраде:

$$\varepsilon = \frac{\sigma t^{1/3}}{2A_0}, \quad A_0 = A_\infty \exp\left(\frac{a}{T_0}\right) \approx 7 \cdot 10^{10} \text{ Па} \cdot \text{с}^{1/3}. \quad (24)$$

Направим ось y вдоль максимального касательного (сдвигового) напряжения, которое возникает, например, при продольном сжатии погружающейся в мантию литосферы. Для простоты предположим, что ослабленная зона, в которой локализована сдвиговая деформация, сильно вытянута вдоль оси y и, следовательно, смещение u_y не зависит от y . Ось x направлена в перпендикулярном направлении, а d – ширина ослабленной зоны. Таким образом, после

приложения сдвигового напряжения между бортами зоны возникает смещение:

$$\Delta u_y = \varepsilon d. \quad (25)$$

Следует заметить, что деформация ε в соотношениях (24) и (25) не превышает 0.01, поскольку при больших деформациях имеет место установившаяся ползучесть, и закон Андраде уже не применим. Как следует из (24) и (25), возникающее смещение зависит от времени как

$$\Delta u_y = \frac{\sigma d}{2A_0} t^{1/3}. \quad (26)$$

При уже введенных оценках температуры, напряжения и параметров A_∞ и a соотношение (26) принимает вид:

$$\Delta u_y = bt^{1/3}d, \quad b = 7 \cdot 10^{-6} \text{ с}^{-1/3}. \quad (27)$$

Соотношение (27), полученное для значений $\sigma \approx 10^6$ Па и $A_0 = 7 \cdot 10^{10}$ Па · с^{1/3} (такая оценка не учитывает снижение значения параметра A_0 в ослабленной зоне), приводит к малому смещению на малых временах. Для $t \approx 1$ с и $d \approx 10$ км из (27) получаем $\Delta u_y \approx 0.07$ м. Однако, если считать, что значение A_0 на порядок понижено в ослабленной зоне, а сдвиговое напряжение высокое ($\sigma \approx 10^7$ Па), то за 1 секунду смещение достигает 10 м, что уже может привести к землетрясению. При таких оценках A_0 и σ правая часть равенства (23) увеличивается на 3 порядка, но и в этом случае за 1 секунду температура возрастает очень слабо.

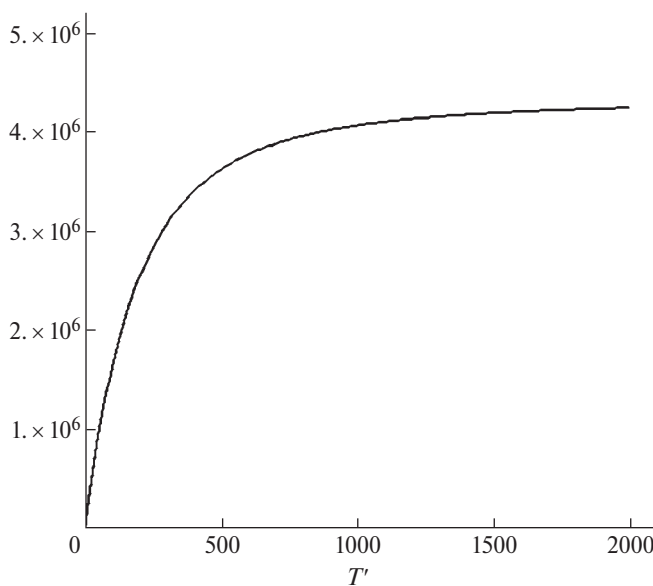


Рис. 1

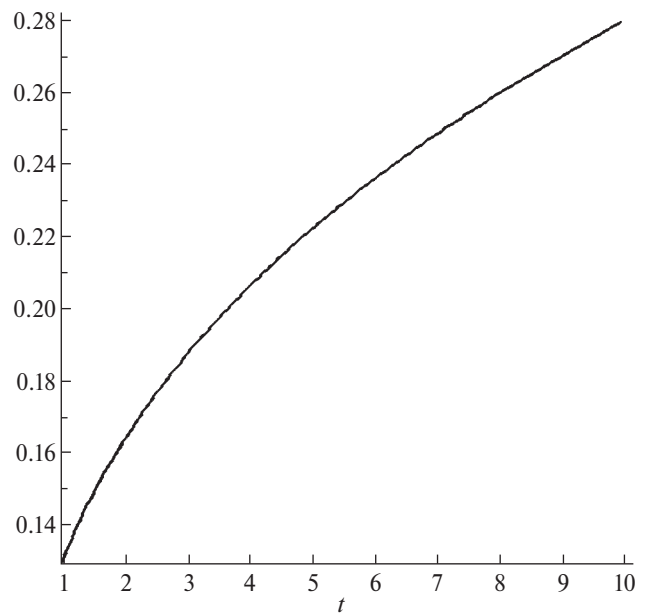


Рис. 2

Определяющими уравнениями в рассматриваемой задаче о локализации деформации являются уравнения неустановившейся ползучести (2) и (4), описывающие зависимость деформации от времени при постоянном напряжении, приложенном в начальный момент, и уравнение (17) теплового баланса для адиабатического процесса. На малых временах, прошедших после приложения напряжения, диссипативное тепловыделение очень слабо увеличивает температуру и почти не влияет на смещение Δu_y . Поскольку на малых временах эффективная вязкость при неустановившейся ползучести мала, приложенное напряжение σ вызывает большую деформация ползучести, которая значительно превышает возникающую упругую деформацию. Эта деформация ползучести приводит к быстрому смещению u_y бортов ослабленной зоны, т. е. зоны, прочность которой понижена из-за низкого значения параметра Андраде. Если ширина d этой зоны и приложенное напряжение σ велики, а параметр A заметно понижен, данная зона является очагом землетрясения. Таким образом, локализация деформации в зоне пониженной прочности определяется не адиабатической неустойчивостью, описываемой уравнением (17), а неустановившейся ползучестью материала.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Ослабленная зона в погружающейся в мантию литосфере может привести к землетрясению после приложения сдвигового напряжения только в том случае, если эффективная вязкость этой зоны очень мала. При малой вязкости за короткое время (несколько секунд), прошедшее после приложения напряжения, возникают значительные смещения бортов зоны, что вызывает сейсмические волны большой амплитуды. Смещение бортов зоны, в которой локализуются сдвиговые деформации, вызывает и мелкофокусные землетрясения. Однако в этом случае смещение бортов зоны обусловлено небольшой силой трения в коре. На больших глубинах, где сила трения очень велика из-за высокого литостатического давления, такой механизм не работает, а быстрое смещение бортов зоны вызывается ползучестью. Закон Андраде, описывающий неустановившуюся ползучесть при постоянном напряжении, приложенном в начальный момент времени, приводит к очень малой эффективной вязкости на первых секундах после начального момента. Скорость деформации при неустановившейся ползучести уменьшается со временем, а эффективная вязкость возрастает. Когда

деформация ползучести достигает значения порядка 0.01, ползучесть Андраде сменяется установившейся ползучестью, при которой скорость деформации постоянна. Эффективная вязкость при установившейся ползучести значительно выше той, которая характеризует неустановившуюся ползучесть. Эффективная вязкость снижается за счет повышения температуры в ослабленной зоне, вызванного диссипативным тепловыделением. Этот процесс (адиабатическая неустойчивость) происходит недостаточно быстро для того, чтобы за короткое время заметно изменить температуру и эффективную вязкость, и, следовательно, не оказывает заметного влияния на этапе неустановившейся ползучести. Однако, если в короткий период времени после приложения напряжения, неустановившаяся ползучесть не приводит к землетрясению (смещение бортов слишком мало из-за недостаточно высокого напряжения σ , недостаточно большой ширины ослабленной зоны d или недостаточно малого значения параметра Андраде A_0), неустановившаяся ползучесть сменяется установившейся ползучестью, при которой температура медленно возрастает, а эффективная вязкость медленно убывает. При тех оценках ($\sigma \approx 10^6$ Па, $A_0 = 7 \cdot 10^{10}$ Па \cdot с $^{1/3}$), которые были использованы в настоящей работе, переход к установившейся ползучести происходит приблизительно через 100 с после приложения напряжения. Когда через продолжительное время, которое в силу условия реализации адиабатического процесса (15) может достигать миллиона лет, температура и скорость деформации становятся очень высокими, а эффективная вязкость — низкой, сдвиговая деформация в зоне начинает сильно и быстро возрастать (адиабатическая неустойчивость), и происходит землетрясение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Биргер Б.И.* Затухание сейсмических волн и универсальная реологическая модель мантии Земли // Физика Земли. 2007. № 8. С. 17–23.
- Биргер Б.И.* Динамика литосферы Земли. М.: Ленанд. 2016. 256 с.
- Теркот Д., Шуберт Дж.* Геодинамика. Геологические приложения физики сплошных сред. М.: Мир. 1985. 730 с.
- Berckhemer H., Auer F., Drisler J.* High-temperature anelasticity and elasticity of mantle peridotite // Phys. Earth planet. Inter. 1979. V. 20. P. 48–59.

- Birger B.I.* Rheology of the Earth and thermoconvective mechanism for sedimentary basins formation // *Geophys. J. Inter.* 1998. V. 134. P. 1–12.
- Birger B.I.* Excitation of thermoconvective waves in the continental lithosphere // *Geophys. J. Inter.* 2000. V. 140. P. 24–36.
- Birger B.I.* Transient creep and convective instability of the lithosphere // *Geophys. J. Inter.* 2012. V. 191. P. 909–922.
- Birger B.I.* Temperature-dependent transient creep and dynamics of cratonic lithosphere // *Geophys. J. Inter.* 2013. V. 195. P. 695–705.
- Goetze C.* High temperature rheology of Westerly granite // *J. Geophys. Res.* 1971. V. 76. P. 1223–1230.
- Goetze C., Brace W.F.* Laboratory observations of high-temperature rheology of rocks // *Tectonophysics.* 1972. V. 13. P. 583–600.
- Hobbs B.E., Ord A.* Plastic instabilities: implications for the origin of intermediate and deep focus earthquakes // *J. Geophys. Res.* 1988. V. 89. P. 10521–10540.
- Jeffreys H.* A modification of Lomnitz's law of creep in rocks // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1958. V. 1. P. 92–95.
- Karato S.* Deformation of Earth Materials. An Introduction to the Rheology of Solid Earth. Cambridge university press. 2008. 463 p.
- Lomnitz C.* Linear dissipation in solids // *J. Appl. Phys.* 1957. V. 28. P. 201–205.
- Murrell S.A.F.* Rheology of the lithosphere – experimental indications // *Tectonophysics.* 1976. V. 36. P. 5–24.
- Murrell S.A.F., Chakravarty S.* Some new rheological experiments on igneous rock at temperatures up to 1120 °C // *Geophys. J. Roy. Astron. Soc.* 1973. V. 34. P. 211–250.
- Weertman J.* Creep laws for the mantle of the Earth // *Phil. Trans. Roy. Soc. London.* 1978. V. A288. P. 9–26.

Rapid Growth of Shear Strain in Weakened Zones of the Lithosphere

B. I. Birger^{a,}*

^a*Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, 123242 Russia*

^{*}*E-mail: birgerbor@mail.ru*

Received April 9, 2018

A weakened zone in the lithosphere plunging into the mantle can lead to an earthquake after the application of a shear stress only in the case if the effective viscosity of this zone is very low. At low viscosity, in the short time that elapses after the application of stress, significant displacements of the walls of the zone emerge causing high-amplitude seismic waves. The Andrade law describing the transient creep under constant stress applied at the initial time instant leads to very low effective viscosity a few first seconds after the initial time instant. The effective viscosity also decreases due to the temperature rise in the weakened zone caused by the dissipative release of heat. However, this process is not rapid enough to noticeably change the temperature and effective viscosity in a short time.

Keywords: transient creep, dissipative heat release, deep-focus earthquakes