GEODYNAMICS & TECTONOPHYSICS

PUBLISHED BY THE INSTITUTE OF THE EARTH'S CRUST
SIBERIAN BRANCH OF RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

2018 VOLUME 9 ISSUE 1 PAGES 165–175 ISSN 2078-502X

https://doi.org/10.5800/GT-2018-9-1-0343

MODEL OF TECTONIC EARTHQUAKE PREPARATION AND OCCURRENCE AND ITS PRECURSORS IN CONDITIONS OF CRUSTAL STRETCHING

R. M. Semenov[1, 2], V. V. Kashkovsky[2], M. N. Lopatin[3]

[1] *Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia*
[2] *Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia*
[3] *Irkutsk State University, Irkutsk, Russia*

Abstract: In connection with changes in the stress-strain state of the Earth's crust, various physical and mechanical processes, including destruction, take place in the rocks and are accompanied by tectonic earthquakes. Different models have been proposed to describe earthquake preparation and occurrence, depending on the mechanisms and the rates of geodynamic processes. One of the models considers crustal stretching that is characteristic of formation of rift structures. The model uses the data on rock samples that are stretched until destruction in a special laboratory installation. Based on the laboratory modeling, it is established that the samples are destroyed in stages that are interpreted as stages of preparation and occurrence of an earthquake source. The preparation stage of underground tremors is generally manifested by a variety of temporal (long-, medium- and short-term) precursors. The main shortcoming of micro-modeling is that, considering small sizes of the investigated samples, it is impossible to reveal a link between the plastic extension of rocks (taking place in the earthquake hypocenter) and the rock rupture. Plasticity is the ability of certain rocks to change shape and size irreversibly, while the rock continuity is maintained, in response to applied external forces. In order to take into account the effect of plastic deformation of rocks on earthquake preparation and occurrence, we propose not to refer to the diagrams showing stretching of the rock samples, but use a typical diagram of metal stretching, which can be obtained when testing a metal rod for breakage (Fig. 1). The diagram of metal stretching as a function of the relative elongation (to some degree of approximation and taking into account the coefficient of plasticity) can be considered as a model of preparation and occurrence of an earthquake source in case of rifting. The energy released in the period immediately preceding the earthquake contributes to the emergence of its precursors. This article discusses various earthquake precursors with reference to the energy model of tectonic earthquake preparation and occurrence in conditions of crustal stretching.

Key words: energy model; rock; stress-strain state of the crust; earthquake; earthquake source; earthquake preparation model; precursor of earthquake

RESEARCH ARTICLE

Handling Editor: S.I. Sherman

Received: February 1, 2017
Revised: May 3, 2017
Accepted: June 13, 2017

For citation: *Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N.*, 2018. Model of tectonic earthquake preparation and occurrence and its precursors in conditions of crustal stretching. *Geodynamics & Tectonophysics* 9 (1), 165–175. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0343.

Для цитирования: *Семенов Р.М., Кашковский В.В., Лопатин М.Н.* Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры // *Геодинамика и тектонофизика*. 2018. Т. 9. № 1. С. 165–175. doi:10.5800/GT-2018-9-1-0343.

Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения и его предвестников в условиях растяжения земной коры

Р. М. Семенов[1, 2], В. В. Кашковский[2], М. Н. Лопатин[3]

[1] *Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия*
[2] *Иркутский государственный университет путей сообщения, Иркутск, Россия*
[3] *Иркутский государственный университет, Иркутск, Россия*

Аннотация: В связи с изменением напряженно-деформированного состояния земной коры горные породы подвергаются различным физико-механическим процессам, вплоть до их разрушения, которые сопровождаются тектоническими землетрясениями. В зависимости от механизмов и скоростей геодинамических процессов, землетрясения характеризуются различными моделями их подготовки и реализации. Одна из моделей соответствует процессам растяжения земной коры, характеризующим формирование рифтовых структур. Для моделирования используют образцы горных пород, которые растягивают на специальной лабораторной установке до их разрушения. Благодаря лабораторному моделированию были выявлены стадии разрушения образцов, интерпретируемые как этапы подготовки и реализации очагов землетрясений, причем стадии подготовки подземных толчков, как правило, проявляются в их различных временных (долго-, средне- и краткосрочных) предвестниках. Главным недостатком микромоделирования является то, что при малых размерах исследуемых образцов невозможно выявить взаимосвязь между пластическим удлинением горных пород, которое происходит в гипоцентре землетрясения, и их разрывом. Пластичность горных пород – это их способность необратимо изменять без нарушения сплошности свою форму и размеры под действием внешних усилий. Для того чтобы учесть влияние пластической деформации горных пород на процесс подготовки и реализации землетрясений, предлагается использовать в качестве микромодели не диаграммы растяжения образцов горных пород, а типовую диаграмму растяжения металла при испытании металлического стержня на разрыв (рис. 1). Таким образом, диаграмму растяжения металла в функции от относительного удлинения, в некоторой степени приближения и с учетом коэффициента пластичности, можно рассматривать как модель подготовки и реализации очага землетрясения при рифтогенезе. Энергия, выделяющаяся в период, непосредственно предшествующий землетрясению, способствует возникновению его предвестников. В статье рассматриваются различные предвестники землетрясения на примере энергетической модели подготовки и реализации тектонического землетрясения в условиях растяжения земной коры.

Ключевые слова: энергетическая модель; горная порода; напряженно-деформированное состояние земной коры; землетрясение; очаг землетрясения; модель подготовки землетрясения; предвестник землетрясения

1. Введение

Известно, что тектонические землетрясения, являющиеся следствием деформирования и разрушения горных пород, характеризуются различными моделями их подготовки и реализации. К числу моделей подготовки землетрясений относятся дилатантно-диффузионная [*Scholz et al., 1973*], лавинно-неустойчивого трещинообразования [*Myachkin et al., 1975*], консолидации [*Dobrovolsky, 1984*], неустойчивого скольжения [*Brace, Byerlee, 1966*], фазовых превращений [*Kalinin et al., 1989*] и др. Их разнообразие в большой степени определяется механизмами и скоростями геодинамических процессов. При этом в процессе деформирования горных пород происходит преобразование энергии их деформации в другие виды энергии, которое количественно можно характеризовать как некую выполненную работу, например тепловую. Исходя из этого, при исследовании процессов подготовки и реализации землетрясений с целью их прогноза важным практическим вопросом является оценка величины и видов энергии, выделяемых на различных этапах процесса деформирования горных пород в условиях растяжения земной коры.

2. Исследования по подготовке и реализации землетрясений

В ряде работ [*Rummel, Sobolev, 1983; Sobolev, Kol'tsov, 1988; Vinogradov, 1989; Alternative Models…, 1991; Sobolev, 1993*] в качестве одной из моделей подготовки и реализации очага землетрясения ис-

пользуются образцы горных пород, растягиваемые на специальной лабораторной установке до их разрушения. При этом в большинстве случаев лабораторного моделирования используются образцы размером менее одного метра, тогда как протяженность массивов горных пород в направлении, перпендикулярном линии будущего разлома, исчисляется как минимум десятками километров и имеет от нескольких десятков до нескольких сотен километров в длину по линии разлома, поэтому лабораторное моделирование подготовки и реализации очага землетрясения можно назвать микромоделированием. Благодаря микромоделированию в работе [*Sobolev, 1993*] были выявлены стадии разрушения образца I–III, которые можно представить как этапы подготовки и реализации землетрясения в условиях растяжения земной коры:

стадия I – начало растяжения и активизации разрыва;

стадия II – укрупнение трещин и локализации их в области будущего макроразрыва;

стадия III – формирование магистрального разрыва.

Малые размеры испытуемых образцов при микромоделировании не позволяют измерить их относительное или абсолютное удлинение в процессе разрушения, поскольку удлинение образцов при испытании выходит за пределы чувствительности используемых приборов. Из-за этого диаграммы микромоделей разрушения горных пород обычно представлены в виде функции относительного времени, а не функции относительного растяжения образца. Такая микромодель не вполне адекватна реальным землетрясениям. Так, например, по результатам микромоделирования общая продолжительность II и III стадии составляет 27 % от общей продолжительности времени разрушения образца. Такое соотношение продолжительности стадий не соответствует реальным землетрясениям. В качестве примера можно сослаться на результаты исследования Култукского землетрясения с магнитудой M=6.3, произошедшего на юге Байкала в 2008 г. Для такого рода землетрясений принято считать, что стадия I имеет продолжительность около трех столетий [*Bune, Gorshkov, 1980*], а стадия II имеет длительность порядка двух лет. Выполненные нами исследования по содержанию гелия в подземных водах позволили сделать вывод, что для Култукского землетрясения продолжительность стадии III составила примерно 70 дней. Таким образом, общая продолжительность II и III стадии Култукского землетрясения составляет не более десятых долей процента от времени подготовки и реализации землетрясения.

При микромоделировании, вследствие малых размеров образца, невозможно исследовать взаимосвязь между удлинением горных пород в гипоцентре и процессом подготовки и реализации очага землетрясения и возникающих при этом предвестников землетрясения.

Рассматривая процесс разрушения горных пород и различные модели этого разрушения, следует различать прочность и твердость горной породы.

Прочность горной породы или минерала определяется величиной критических напряжений, при которых происходит их разрушение. Эти напряжения различны для разных минералов, горных пород и для разных видов приложенных нагрузок. Различают пределы прочности горных пород и минералов при сжатии ($\delta_{сж}$), растяжении ($\delta_р$), сдвиге ($\delta_{сдв}$), изгибе ($\delta_{изг}$) и т.д. Прочность породы на разрыв, изгиб и сдвиг составляет десятые и сотые доли от прочности на сжатие.

Различают статическую и динамическую твердость горных пород. Для большинства горных пород применяется метод определения статической твердости $p_ш$, основанный на хрупком выколе лунки в шлифованной поверхности породы под действием приложенной к специальному штампу нагрузки. Этот метод разработан Л.А. Шрейнером [*Rzhevsky, Ionin, 1984*].

Показатели твердости $p_ш$ и прочности $\delta_{сж}$, $\delta_р$, $\delta_{сдв}$ и $\delta_{изг}$ горных пород коррелированы между собой.

При оценке твердости, помимо $p_ш$, определяют такие показатели горных пород, как условный предел текучести $\delta_т$, коэффициент пластичности $K_{пл}$, модуль упругости первого рода (модуль Юнга) E и удельную контактную работу разрушения A_s. Из них для моделирования процесса подготовки и реализации очага землетрясения наибольший практический интерес представляет коэффициент пластичности $K_{пл}$.

Приложение к породам нагрузок, превышающих их пределы упругости, приводит к возникновению необратимых пластических деформаций, в области которых исчезает пропорциональность между величиной деформации породы и нагрузкой. При этом наблюдается увеличение скорости роста деформаций с повышением или уменьшением нагрузок.

Пластическая деформация в породах обусловлена внутризеренным и межзеренным скольжением (постепенное соскальзывание атомов в кристаллической решетке с одного зерна на другое, сдвиг зерен по определенным плоскостям и направлениям под действием нагрузок). Значительную роль во внутризеренном скольжении играют дислокации – сдвиги одной части кристалла относительно другой или линии искажения, проходящие вдоль края лишней атомной плоскости. Однако дислокация, вышедшая на поверхность или границу зерна, в

дальнейшем уже не принимает участия в пластической деформации. Плотность дислокаций внутри зерна уменьшается, и пластическая деформация затухает. Именно поэтому для поддержания деформирования в породе необходимо увеличивать напряжения [*Rzhevsky, Ionin, 1984*].

Для получения адекватной модели подготовки и реализации землетрясения в микромодели [*Sobolev, 1993*] необходимо учитывать коэффициент пластичности горных пород [*Rzhevsky, Ionin, 1984*]:

$$K_{\text{пл}} = \frac{A_{\text{р}}}{A_{\text{упр}}},$$

где $A_{\text{упр}}$ – работа упругих деформаций при разрушении образца; $A_{\text{р}}$ – общая работа по разрушению образца.

Так, например, по данным Л.А. Шрейнера [*Shreiner et al., 1958*], $K_{\text{пл}}$ для гранита составляет 1.4–1.9, для базальта – 4.2, а для джеспилита – 10.0. Далее будем исходить из того, что коэффициенты пластичности, полученные при измерении твердости горных пород, коррелированы с показателями пластичности соответствующих горных пород в зоне подготовки и реализации очага землетрясения.

Для того чтобы учесть влияние пластической деформации горных пород на процесс подготовки и реализации землетрясений, предлагается использовать в качестве микромодели не диаграммы растяжения образцов горных пород, а типовую диаграмму растяжения металла при испытании металлического стержня на разрыв (рис. 1).

Такой выбор модели процесса подготовки и реализации землетрясений обусловлен тем, что, например, для малоуглеродистой стали модуль Юнга E примерно в 100 раз меньше, чем для гранита или базальта. Испытывая на растяжение стержень из малоуглеродистой стали длиной в 1 м, мы получаем такие же абсолютные линейные удлинения $\Delta l_{\text{упр}}$ и $\Delta l_{\text{ост}}$, какие можно получить на образцах гранита или базальта длиной более 100 м. Для получения адекватной модели процесса подготовки и реализации землетрясений, основанной на процессе растяжения металлического стержня, необходима ее коррекция, основанная на известных значениях $K_{\text{пл}}$. Таким образом, применение в качестве модели процесса подготовки и реализации землетрясений процесса растяжения металлического стержня позволяет получить необходимые коэффициенты подобия.

Качественная модель разрушения горных пород представлена на рис. 2 и 3.

В обоих случаях (рис. 2 и 3) площадь фигуры ADE (S_{ADE}) определяет общую энергию, необходимую для формирования гипоцентра землетрясения и разрушения в нем горных пород. Площадь фигуры ABC (S_{ABC}) характеризует упругую энергию горных пород, которая после их разрыва преобразуется в энергию землетрясения. Соответственно площадь фигуры CBDE (S_{CBDE}) определяет энергию, необходимую для пластической деформации горных пород вблизи гипоцентра. Отношение площади S_{ADE} к площади S_{ABC} дает нам $K_{\text{пл}}$.

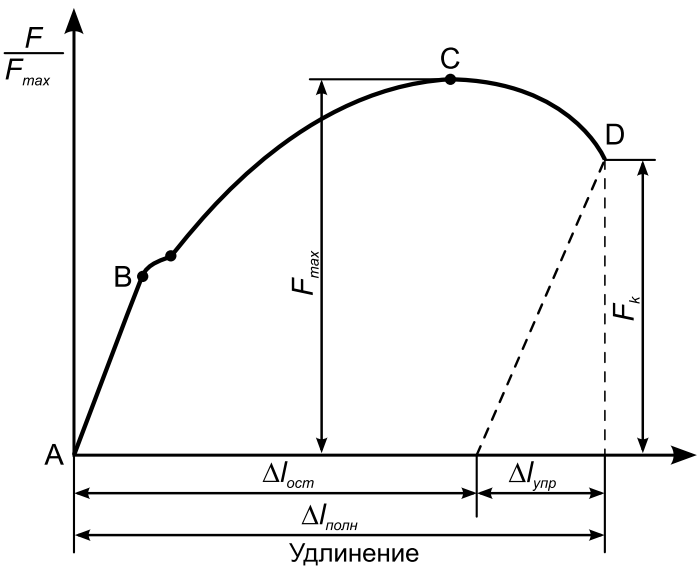

Рис. 1. Диаграмма растяжения металлического стержня на разрыв [*Fridman, 1952; Zaslavsky, 1986; Arkusha, 2008*]: $\Delta l_{полн}$ – полная длина стержня перед его разрывом; $\Delta l_{упр}$ – упругое растяжение стержня при разрыве; $\Delta l_{ост}$ – остаточная суммарная длина стержня после разрыва; F_{max} – напряжение, соответствующее пределу прочности; F_k – напряжение истинного сопротивления разрушению.

Fig. 1. Diagram of metal rod stretching to rupturing [*Fridman, 1952; Zaslavsky, 1986; Arkusha, 2008*]. $\Delta l_{полн}$ – total length of the rod before its rupture; $\Delta l_{упр}$ – elastic extension of the rod in case of its rupture; $\Delta l_{ост}$ – residual length of the rod after the rupture; F_{max} – stress corresponding to the ultimate strength; F_k – true fracture resistance stress.

Таким образом, диаграмму растяжения металла в функции от относительного удлинения, в некоторой степени приближения и с учетом $K_{\text{пл}}$, можно рассматривать как модель подготовки и реализации землетрясения при рифтогенезе. При этом мы предлагаем трактовать изменения силы растяжения металлического стержня, показанные на рис. 2 и 3, как изменение напряженно-деформированного состояния земной коры.

Для пояснения принципа действия модели подготовки и реализации землетрясения рассмотрим ее на примере процесса растяжения литосферы с образованием Байкальской рифтовой зоны. Этот процесс обусловлен, прежде всего, конвекцией в астеносфере и подкоровых потоках [*Logachev et al., 2000*]. При этом будем исходить из того, что дви-

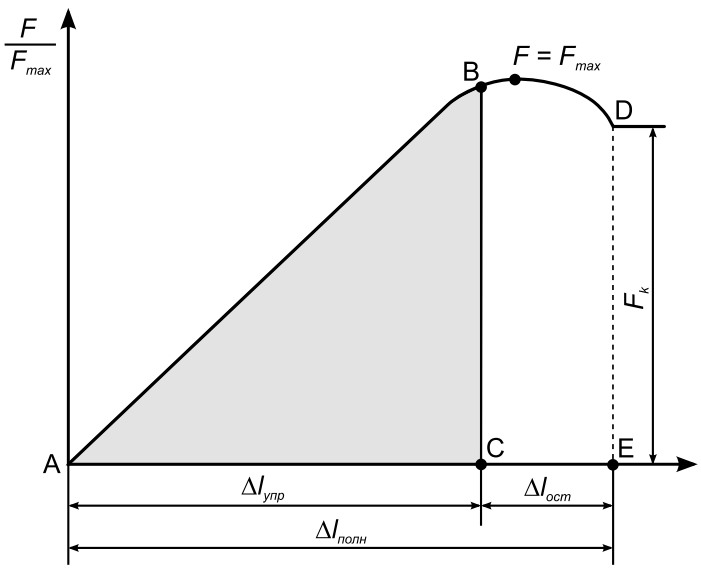

Рис. 2. Примерная диаграмма растяжения пластов гранита на разрыв, $K_{пл}$=1.4–1.9.

Fig. 2. Approximate diagram of granite strata stretching to rupturing, $K_{пл}$=1.4–1.9.

жение литосферных плит перед землетрясением происходит примерно с равной скоростью на протяжении многих лет [*San'kov et al., 2011*]. В этом случае процесс раздвижения литосферных плит можно представить в виде ряда повторяющихся циклов изменения давления горных пород в зоне будущих гипоцентров землетрясений (рис. 4), соответствующих изменению накопленной упругой энергии при повторяющихся землетрясениях [*Sobolev, 1993*].

При переходе от диаграмм 2, 3 к диаграмме 4 будем исходить из того, что в большинстве случаев измерение абсолютного значения силы, формирующей напряжение горных пород в районе гипоцентра будущего землетрясения, не представляет практического интереса.

1. Если землетрясение уже произошло, то сила, потраченная на формирование напряжения горных пород в районе гипоцентра землетрясения, была преобразована в энергию землетрясения и измерена сейсмографами как магнитуда землетрясения.

2. Если землетрясение еще не произошло, то для оценки силы, формирующей напряжение горных пород в районе гипоцентра будущего землетрясения, необходимо определить трехмерные контуры этого гипоцентра. Примера подобных практических исследований в истории сейсмологии еще не было.

В отличие от полной неопределенности в измерении силы, формирующей напряжение горных пород в районе гипоцентра будущего землетрясения, давление горных пород в зоне будущего магистрального разрыва P – величина, вполне предсказуемая и конкретная. Поскольку величины $\Delta l_{упр}$, $\Delta l_{ост}$ и P могут быть оценены по результатам исследования прочности и твердости образцов с учетом $K_{пл}$, постольку при построении диаграммы разрушения горных пород в районе гипоцентра землетрясения возможен переход от построения функции $F(\Delta l)$ к функции $P(\Delta l)$ на основании того, что

$$F = PS,$$

где S – площадь приложения силы.

Точкой A на рис. 4 обозначено произошедшее землетрясение. При сохраняющейся тектонодинамической обстановке следующее землетрясение должно произойти в точке D [*Sobolev, 1993*]. Растяжение участка земной коры происходит в квазиоднородном пространстве и во времени, и его можно разбить на три этапа или периода.

Этап I. На этом этапе происходит упругое растяжение земной коры в очаге будущего землетрясения. Продолжительность этого периода может достигать трех столетий [*Bune, Gorshkov, 1980*]. Из-за неоднородной структуры земной коры на этапе I возможно возникновение локальных областей напряжения горных пород, давление в которых превышает P_{max}. Давление P_{max} примерно соответствует условному пределу прочности горных пород $\delta_{сж}$, $\delta_{р}$, $\delta_{сдв}$ или $\delta_{изг}$, в зависимости от харак-

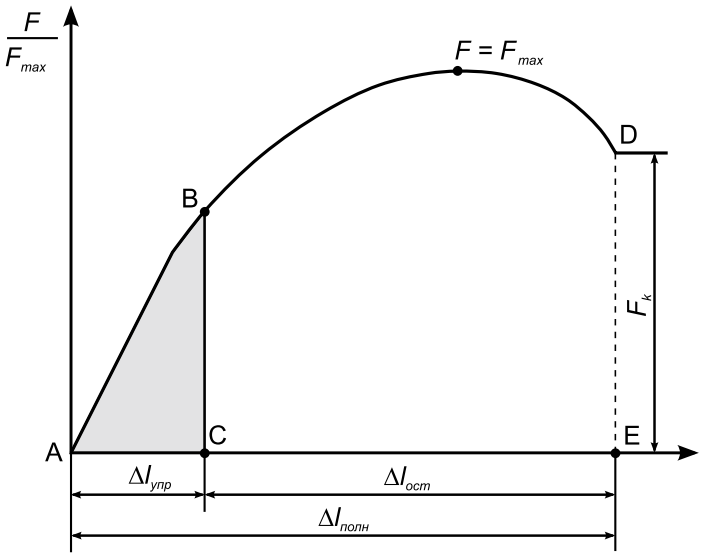

Рис. 3. Примерная диаграмма растяжения пластов базальта на разрыв, $K_{пл}$=4.2.

Fig. 3. Approximate diagram of basalt strata stretching to rupturing, $K_{пл}$=4.2.

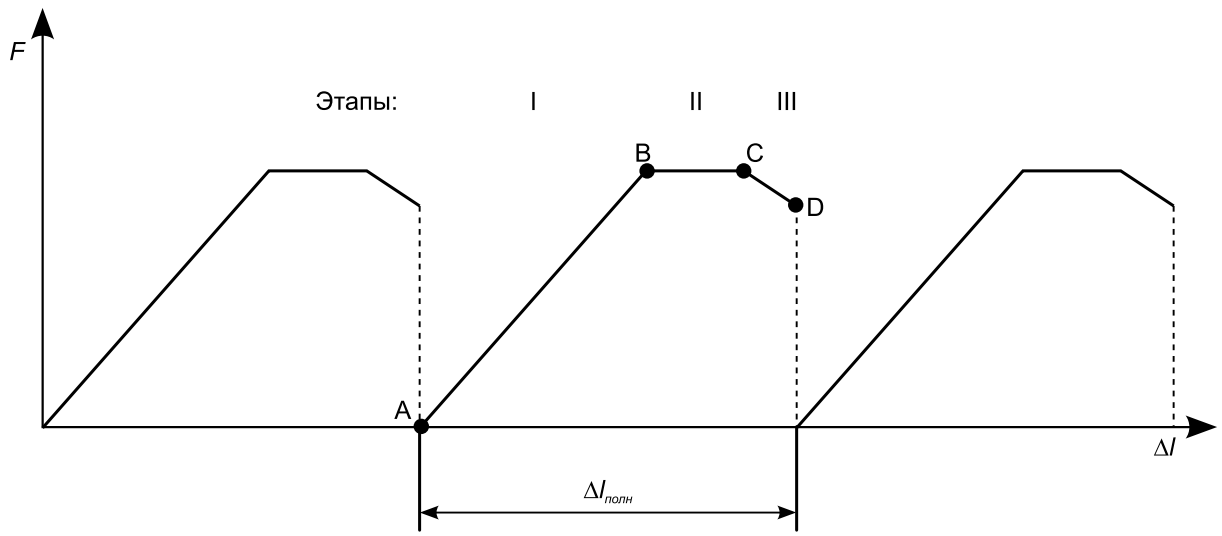

Рис. 4. Диаграмма процесса раздвижения литосферных плит в виде повторяющихся циклов.

Fig. 4. Diagram showing the separation of lithospheric plates as repeated cycles.

тера формирования локального разлома. Наличие подобных областей приводит к периодическим малоамплитудным разрывам горных пород и является причиной слабой сейсмической активности в данном регионе. Этапу I свойственно то, что общий тренд повышения напряжения P в земной коре характеризуется очень медленным его нарастанием до конечной величины $P_{\max}$.

Этап II. Этап II начинается в точке B, которая характеризуется тем, что напряжения горных пород достигают в ней пикового значения, примерно равного $P_{\max}$. С большой степенью приближения можно считать, что после этого до точки C происходит пластическая деформация горных пород при примерно постоянном давлении $P_{\max}$. Продолжительность этапа II – несколько лет. В течение этого времени напряжения в земной коре находятся на пределе текучести горных пород в очаге готовящегося землетрясения. За счет пластической деформации горных пород и выравнивания давления на этом этапе, как правило, возникают зоны сейсмического затишья в эпицентральной области будущего землетрясения.

Поскольку на этапе II происходит растяжение земной коры при примерно постоянной силе, постольку совершаемая при этом работа A_{II} равна

$$A_{\mathrm{II}} = F_{\mathrm{II}}\Delta l_{\mathrm{II}} = P_{\max} S \Delta l_{\mathrm{II}},$$

где F_{II} – сила растяжения земной коры на этапе II; Δl_{II} – пластическое удлинение горных пород в зоне разлома на этапе II; S – площадь разлома.

Площадь разлома S составляет от долей квадратного километра до единиц квадратных километров и выше, Δl_{II} – единицы метров, поэтому с учетом масштабов рассматриваемого геодинамического процесса величина работы A_{II} может достигать значительных значений.

Работа A_{II} в основном преобразуется в тепловую энергию, которую современными методами измерения зафиксировать довольно проблематично.

Этап III. Данный этап непосредственно предшествует землетрясению. Его продолжительность от нескольких недель до нескольких месяцев. На этом этапе за счет текучести горных пород их удлинение в зоне, прилегающей к тектоническому разлому, ускоряется, давление в зоне разлома постепенно падает от $P_{\max}$ до $P_{\text{к}}$. Давление $P_{\text{к}}$ – это давление, при котором пластическая деформация горных пород переходит в хрупкую. Если исходить из предположения о линейном изменении давления P на этапе III, то горные породы совершат за этот период работу:

$$A_{\mathrm{III}} = F_{\mathrm{III}}\Delta l_{\mathrm{III}} = \frac{P_{max} - P_{\text{к}}}{2} S \Delta l_{\mathrm{III}},$$

где F_{III} – средняя сила растяжения зоны разлома на этапе C–D; Δl_{III} – пластическое удлинение горных пород на этапе III, в метрах.

Как и на этапе II, работа A_{III} также достигает существенных величин и преобразуется в другие виды энергии, что приводит к проявлению предвестников землетрясения различной физической природы.

3. Предвестники землетрясений

Энергия A_{III}, выделяющаяся в период, непосредственно предшествующий землетрясению, являет-

ся его предвестником. Падение давления внутри горных пород может привести к изменению уровня подземных вод. Так, например, примерно за неделю до катастрофического землетрясения в Лиссабоне 1 ноября 1755 г. в радиусе до 600 км от эпицентра высохли некоторые колодцы, другие, напротив, с силой выбрасывали воду, в третьих вода изменила уровень, помутнела или начала неприятно пахнуть [*Nikonov, 2005*]. «Это обстоятельство связано с функционированием глобально развитого поля напряжений – деформаций, которое выражено в виде периодически возникающих, разрушающихся и замещающих друг друга пространственных короткоживущих структур растяжения и сжатия. Этот процесс охватывает все виды горных пород, что существенно влияет на герметичность недр» [*Vartanyan, 2000, p. 29*].

Изменение уровня подземных вод за относительно короткий период времени приводит к появлению новых подземных течений и раскрытию трещин в горных породах. Это, в свою очередь, способствует более интенсивному вымыванию химических веществ из горных пород, поэтому перед землетрясением химический и газовый состав подземных вод может существенно измениться. В частности, естественно предполагать увеличение газовой и флюидной проницаемости областей земной коры, в которых происходит этот процесс [*Alekseev et al., 2001*]. В связи с этим нередки случаи предсейсмических вариаций концентраций растворенных гелия и радона в подземных водах [*Ulomov, Mavashev, 1967; Mavlyanov et al., 1979*], в том числе в водах Байкальской рифтовой зоны [*Semenov, 2010; Semenov, Smekalin, 2011; Semenov et al., 2014, 2016*], которые рассматривались в качестве предвестников возникновения землетрясений.

Локальные концентрации напряжения горных пород на этапе III приводят к тому, что на этих участках давление P превышает $P_{\max}$. Это является причиной локальных разрывов пластов горных пород и появления форшоков.

Помимо перечисленных предвестников землетрясения существуют и многие другие, однако общим источником их возникновения является преобразование работы A_{III} в другие виды энергии.

4. Реализация землетрясения

Реализация землетрясения происходит на этапе IV, который обозначен на рис. 4 буквой D. Когда величина Δl достигает значения $\Delta l_{\text{полн}}$, происходит разрушение горных пород в очаге землетрясения. При этом накопленная потенциальная энергия упругой деформации горных пород,

$$E_{\text{п}} = \frac{P_{\text{к}}}{2} S \Delta l_{\text{упр}},$$

преобразуется в другие виды энергии.

С учетом потерь на преобразование энергии, величины параметров $P_{\text{к}}$, $\Delta l_{\text{упр}}$ и S определяют магнитуду землетрясения. Даже если $\Delta l_{\text{упр}}$ составляет лишь единицы метров, то размеры $P_{\text{к}}$ и S таковы, что энергия упругой деформации горных пород $E_{\text{п}}$ может достигать огромных значений.

5. Афтершоки

После того как сформировался магистральный разрыв, сопровождающийся землетрясением, горные породы сжимаются на величину $\Delta l_{\text{упр}}$. В силу того, что масса горных пород велика и область их растяжения имеет значительную протяженность, такое сжатие не может быть мгновенным, поэтому после возникновения сейсмогенного разлома процесс упругого сжатия горных пород начинает ударно развиваться в стороны от гипоцентра. Вследствие этого основная часть энергии упругих деформаций горных пород $E_{\text{п}}$ преобразуется в сейсмические P-, S- и L-волны.

Горные породы в очаге землетрясения могут иметь различный минеральный состав со сложной конфигурацией залегания массивов разной прочности, поэтому разлом в момент землетрясений может развиться не по всей своей площади сразу, а по частям. Это является причиной особо мощных форшоков, многократных толчков при самом землетрясении и многочисленных афтершоков в очаговой зоне.

Конфигурация массивов горных пород различной прочности может оказаться и такой, что накопленная энергия упругой деформации горных пород $E_{\text{п}}$ не приведет к одному мощному толчку, а разрядится серией землетрясений меньшей силы.

При землетрясении в его гипоцентре происходит разрядка упругих напряжений. После землетрясения из-за продолжающих действовать сил рифтогенеза по соседству со старым гипоцентром начинается новый процесс накопления энергии упругой деформации горных пород $E_{\text{п}}$. В сейсмоактивном районе на различных этапах развития могут одновременно находиться сразу несколько очагов накопления энергии упругой деформации горных пород, разрядка которых произойдет в разное время.

Модель подготовки и реализации тектонического землетрясения была рассмотрена на примере процесса раздвигания жестких литосферных плит. Однако очевидно, что во всех случаях подготовки и реализации тектонического землетрясения причиной возникновения P-, S- и L-волн является энергия упругой деформации горных пород $E_{\text{п}}$. Разница

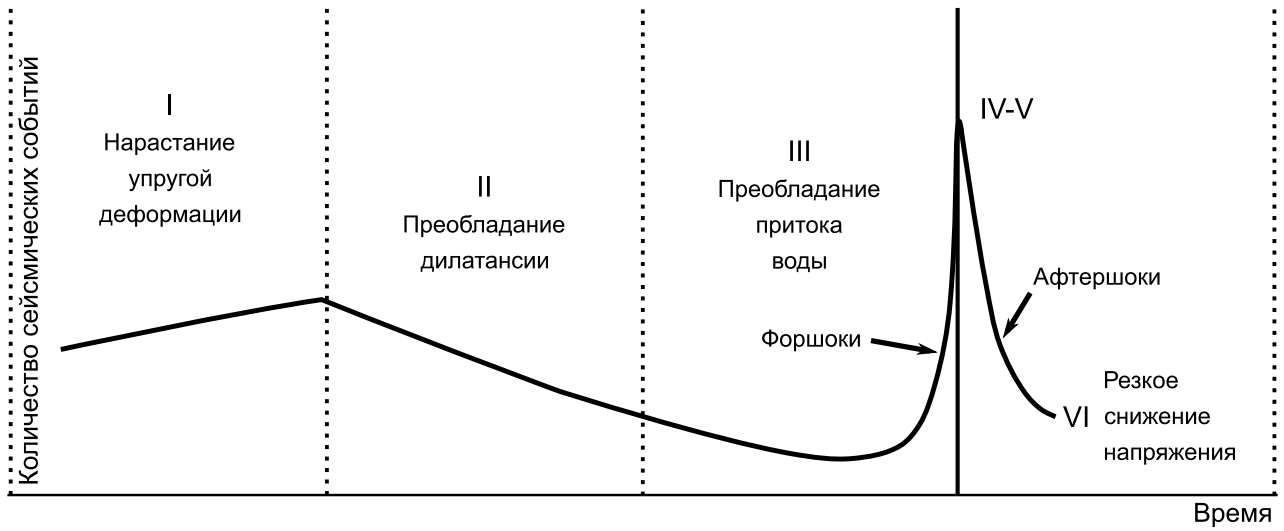

Рис. 5. Дилатантно-диффузионная модель подготовки и реализации тектонического землетрясения [*Scholz et al., 1973*].

Fig. 5. Dilatancy-diffusion model of tectonic earthquake preparation and occurrence [*Scholz et al., 1973*].

только в том, что катастрофические значения $E_п$ могут быть достигнуты не только за счет упругого растяжения горных пород, но также за счет их упругого изгиба, скручивания или сжатия.

Представленная модель подготовки и реализации тектонического землетрясения отличается от схожих существующих моделей наличием периодов пластической деформации горных пород B–C и C–D. Предлагаемая модель хорошо согласуется с дилатантно-диффузионной моделью подготовки и реализацией тектонического землетрясения и его предвестников (рис. 5).

6. Заключение

Приведенные данные позволяют сделать выводы о взаимоотношениях энергетической модели подготовки и реализации тектонического землетрясения и о его предвестниках.

При подготовке и реализации землетрясения движение литосферных плит является причиной выделения значительного количества энергии. Эту энергию можно разделить на две части: энергию упругой деформации горных пород и механическую энергию, израсходованную на работу по пластической деформации горных пород. Соотношение этих видов энергии коррелированно с коэффициентом пластичности горных пород, поэтому можно предположить, что при подготовке и реализации землетрясения на пластическую деформацию горных пород в среднем уходит не менее 30–50 % от общей израсходованной энергии.

Энергия упругой деформации горных пород преобразуется в кинетическую энергию *P*-, *S*- и *L*-волн в ходе землетрясения и расходуется в форшоках и афтершоках.

Механическая энергия, расходуемая на пластическую деформацию горных пород, преобразуется в другие виды энергии, которые можно назвать вторичными. Несмотря на колоссальный объем этих вторичных видов энергии, их выделение (если не считать форшоки) не приводит к каким-либо проявлениям сейсмической активности. Продолжительность выделения вторичных видов энергии перед землетрясением составляет от нескольких месяцев до нескольких лет, поэтому эти выделения энергии не являются катастрофичными даже перед самым мощным землетрясением.

Причиной возникновения всех среднесрочных и краткосрочных предвестников надвигающегося землетрясения является выделение вторичных видов энергии, возникающих при пластической деформации горных пород, и изменение давления внутри них. Эти предвестники могут быть прямо или косвенно измерены приборами, выявлены органолептическими и другими методами, однако проблемой остается правильная интерпретация этих предвестников и их увязка с надвигающимся землетрясением.

Гарантированно повторяющимся предвестником землетрясений является падение давления горных пород вблизи будущего гипоцентра от значений, близких к P_{max}, до $P_к$. Прямое измерение давления горных пород требует бурения достаточно глубоких скважин, поэтому наиболее достоверными и ста-

бильно проявляющимися предвестниками землетрясений являются косвенные признаки вариации давления горных пород, выраженные через изменения концентраций инертных газов радона и гелия в подземных водах, причем не глубинных, а близповерхностных флюидов, которые проявляют себя за сутки – несколько суток до землетрясения [*Prasolov, 1990; Vartanyan, 2000*].

Практическая реализация основных положений разработанной модели представлена в разработанном и запатентованном авторами способе гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений [*Semenov et al., 2016*]. Он основан на изучении вариаций концентраций растворенного в подземных водах гелия в Южном Прибайкалье, которые возникают при подготовке и реализации землетрясений в Байкальской рифтовой зоне. При этом более достоверные данные были получены в том случае, когда гидрогеохимические исследования проводились не на одном, а на трех пунктах наблюдений. Это дало возможность устранить влияние второстепенных (погодных, приливных и т.п.), относительно сейсмических, факторов на вариации концентраций гелия. А расчеты индикаторных и интегрированной индикаторной функции позволяют принимать их за среднесрочный предвестник землетрясений.

7. Благодарности

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 14-05-00245).

8. Литература / References

Alekseev A.S., Belonosov A.S., Petrenko V.E., 2001. On the concept of multidisciplinary forecasting of earthquakes using an integral precursor. In: G.M. Molchan, B.M. Naimark, A.L. Levshin (Eds.), Problems of lithosphere dynamics and seismicity. Computational Seismology, vol. 32. GEOS, Moscow, p. 81–97 (in Russian) [*Алексеев А.С.*, *Белоносов А.С.*, *Петренко В.Е.* О концепции многодисциплинарного прогноза землетрясений с использованием интегрального предвестника // Проблемы динамики литосферы и сейсмичности / Ред. Г.М. Молчан, Б.М. Наймарк, А.Л. Левшин. Вычислительная сейсмология. Вып. 32. М.: ГЕОС, 2001. С. 81–97].

Alternative Models for the Development of the Seismic Process and Precursors. Development of Scientific Foundations for Assessing the Threat of Endogenous Processes, 1991. Report of the Institute of the Earth's Physics, the USSR Academy of Sciences, Moscow, 108 p. (in Russian) [Построение альтернативных моделей развития сейсмического процесса и предвестников. Разработка научных основ оценки опасности эндогенных процессов. Отчет ИФЗ АН СССР. М.: ИФЗ АН СССР, 1991. 108 с.].

Arkusha A.I., 2008. Technical Mechanics. Theoretical Mechanics and Resistance of Materials. Vysshaya Shkola, Moscow, 263 p. (in Russian) [*Аркуша А.И.* Техническая механика. Теоретическая механика и сопротивление материалов. М.: Высшая школа, 2008. 263 с.].

Brace W.F., *Byerlee J.D.*, 1966. Stick-slip as a mechanism for earthquakes. *Science* 153 (3739), 990–992. https://doi.org/10.1126/science.153.3739.990.

Bune V.I., Gorshkov G.P. (Eds.), 1980. Seismic Zoning of the USSR Territory. Methodical Basis and the Regional Description of the 1978 Map. Nauka, Moscow, 308 p. (in Russian) [Сейсмическое районирование территории СССР. Методические основы и региональное описание карты 1978 г. / Ред. В.И. Бунэ, Г.П. Горшков. М.: Наука, 1980. 308 с.].

Dobrovolsky I.P., 1984. Mechanics of Tectonic Earthquake Preparation. Institute of the Earth's Physics, the USSR Academy of Sciences, Moscow, 188 p. (in Russian) [*Добровольский И.П.* Механика подготовки тектонического землетрясения. М.: ИФЗ АН СССР, 1984. 188 с.].

Fridman Ya.B., 1952. Mechanical Properties of Metals. 2nd edition, revised and added. Oborongiz, Moscow, 555 p. (in Russian) [*Фридман Я.Б.* Механические свойства металлов: 2-е изд. перераб. и доп. М.: Оборонгиз, 1952. 555 с.].

Kalinin V.A., Rodkin M.V., Tomashevskaya I.S., 1989. Geodynamic Effects of Physical-Chemical Transformations in Solid Medium. Nauka, Moscow, 157 p. (in Russian) [*Калинин В.А.*, *Родкин М.В.*, *Томашевская И.С.* Геодинамические эффекты физико-химических превращений в твердой среде. М.: Наука, 1989. 157 с.].

Logachev N.A., Bornyakov S.A., Sherman S.I., 2000. Mechanism of the Baikal rift zone formation based on results of physical modeling. *Doklady Earth Sciences* 373A (6), 980–982.

Mavlyanov G.A., Ulomov V.I., Sultankhodjaev A.N., Khasanova L.A., Gorbushina L.V., Tyminsky V.G., Spiridonov A.I., Mavashev B.Z., Khitarov N.I., 1979. The phenomenon of changes in the chemical composition of groundwater in case of an earthquake. Discovery No. 129 of February 21, 1966. In: Soviet Scientific Discoveries. Moskovsky Rabochii, Moscow, p. 163–166 (in Russian) [*Мавлянов Г.А.*, *Уломов В.И.*, *Султанходжаев А.Н.*, *Хасанова Л.А.*, *Горбушина Л.В.*, *Тыминский В.Г.*, *Спиридонов А.И.*, *Мавашев Б.З.*, *Хитаров Н.И.* Явление изменения химического состава подземных вод при землетрясении. Открытие № 129 от 21 февраля 1966 г. // Открытия советских ученых. М.: Московский рабочий, 1979. С. 163–166].

Myachkin V.I., Kostrov B.V., Sobolev G.A., Shamina O.G., 1975. Fundamentals of focal physics and precursors of earthquakes. In: M.A. Sadovsky (Ed.), Physics of earthquake foci. Nauka, Moscow, p. 6–29 (in Russian) [*Мячкин В.И.*, *Костров Б.В.*, *Соболев Г.А.*, *Шамина О.Г.* Основы физики очага и предвестники землетрясений // Физика очага землетрясений / Ред. М.А. Садовский. М.: Наука, 1975. С. 6–29].

Nikonov A.A., 2005. «Terrible Upheaval» of Europe. Lissabon earthquake, 1 November 1755. *Priroda* (*Nature*) (11), 21–29 (in Russian) [*Никонов А.А.* Ужасное потрясение Европы. Лиссабонское землетрясение 1 ноября 1755 г. // *Природа*. 2005. № 11. С. 21–29].

Prasolov E.M., 1990. Isotope Geochemistry and the Origin of Natural Gases. Nedra, Leningrad, 283 p. (in Russian) [*Прасолов Э.М.* Изотопная геохимия и происхождение природных газов. Л.: Недра, 1990. 283 с.].

Rummel F., Sobolev G.A., 1983. Studies of shearing and seismic regimes in samples containing inclusions of reduced strength. *Izvestiya AN SSSR, seriya Fizika Zemli* (6), 59–73 (in Russian) [*Руммель Ф.*, *Соболев Г.А.* Изучение образования сдвиговых трещин и сейсмического режима в образцах, содержащих включения пониженной прочности // *Известия АН СССР, серия Физика Земли*. 1983. № 6. С. 59–73].

Rzhevsky V.V., Ionin G.Ya., 1984. Fundamentals of Rock Physics: Textbook for Higher Education Institutions. 4th edition, revised and added. Nedra, Moscow, 369 p. (in Russian) [*Ржевский В.В.*, *Ионин Г.Я.* Основы физики горных пород: Учебник для вузов, 4-е изд., перераб. и доп. М.: Недра, 1984. 369 с.].

San'kov V.A., Parfeevets A.V., Lukhnev A.V., Miroshnichenko A.I., Ashurkov S.V., 2011. Late Cenozoic geodynamics and mechanical coupling of crustal and upper mantle deformations in the Mongolia-Siberia mobile area. *Geotectonics* 45 (5), 378–393. https://doi.org/10.1134/S0016852111050049.

Scholz C.H., *Sykes L.K.*, *Aggarwal Y.P.*, 1973. Earthquake prediction: a physical basis. *Science* 181 (4102), 803–810. https://doi.org/10.1126/science.181.4102.803.

Semenov R.M., 2010. Earthquake of 27 August 2008 in the Southern Baikal area and its precursors. *Geodynamics & Tectonophysics* 1 (4), 441–447 (in Russian) [*Семенов Р.М.* Землетрясение 27.08.2008 года на юге Байкала и его предвестники // *Геодинамика и тектонофизика*. 2010. Т. 1. № 4. С. 441–447]. https://doi.org/10.5800/GT-2010-1-4-0028.

Semenov R.M., Imaev V.S., Semenov A.R., Orgilyanov A.I., Smekalin O.P., Shirobokova N.P., 2014. The Method for Short-Term Forecasting of Earthquakes. Invention Patent RU 2 519 050 C2. Federal Service for Intellectual Property. Published on 10.06.2014. Bulletin No. 16 (in Russian) [*Семенов Р.М.*, *Имаев В.С.*, *Семенов А.Р.*, *Оргильянов А.И.*, *Смекалин О.П.*, *Широбокова Н.П.* Способ краткосрочного прогноза землетрясений. Патент на изобретение RU 2 519 050 C2. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Опубликовано 10.06.2014. Бюл. № 16].

Semenov R.M., Kashkovsky V.V., Lopatin M.N., 2016. The Method for Hydrogeochemical Determination of Earthquake Occurrence Times in Southern Pribaikalie. Invention Patent RU No. 2 601 403 C2. Federal Service for Intellectual Property. Published on 10.11.2016. Bulletin No. 31 (in Russian) [*Семенов Р.М.*, *Кашковский В.В.*, *Лопатин М.Н.* Способ гидрогеохимического определения времени возникновения землетрясений в Южном Прибайкалье. Патент на изобретение RU № 2 601 403 C2. Федеральная служба по интеллектуальной собственности. Опубликовано 10.11.2016. Бюл. № 31].

Semenov R.M., Smekalin O.P., 2011. The large earthquake of 27 August 2008 in Lake Baikal and its precursors. *Russian Geology and Geophysics* 52 (4), 405–410. https://doi.org/10.1016/j.rgg.2011.03.003.

Shreiner L.A., Petrova O.P., Yakushev V.P., Portnova A.T., Sadilenko K.M., Klochko N.A., Pavlova N.N., Balandin P.S., Spivak A.I., 1958. Mechanical and Abrasive Properties of Rocks. Gostoptekhizdat, Moscow, 201 p. (in Russian) [*Шрейнер Л.А.*, *Петрова О.П.*, *Якушев В.П.*, *Портнова А.Т.*, *Садиленко К.М.*, *Клочко Н.А.*, *Павлова Н.Н.*, *Баландин П.С.*, *Спивак А.И.* Механические и абразивные свойства горных пород. М.: Гостоптехиздат, 1958. 201 с.].

Sobolev G.A., 1993. Fundamentals of Earthquake Prediction. Nauka, Moscow, 313 p. (in Russian) [*Соболев Г.А.* Основы прогноза землетрясений. М.: Наука, 1993. 313 с.].

Sobolev G.A., Kol'tsov A.V., 1988. Large-Scale Modeling of Earthquake Preparation and Precursors. Nauka, Moscow, 203 p. (in Russian) [*Соболев Г.А.*, *Кольцов А.В.* Крупномасштабное моделирование подготовки и предвестников землетрясений. М.: Наука, 1988. 203 с.].

Ulomov V.I., Mavashev B.Z., 1967. About a precursor of a strong tectonic earthquake. *Doklady AN SSSR* 176 (2), 319–321 (in Russian) [*Уломов В.И.*, *Мавашев Б.З.* О предвестнике сильного тектонического землетрясения // *Доклады АН СССР*. 1967. Т. 176. № 2. С. 319–321].

Vartanyan G.S., 2000. Fluids, Geodynamic Filtration, and Formation of Fracture Permeability in the Course of Sediment Subsidence. Geology, Exploration, and Appraisal of Fuel Deposits. Issue 6. Geoinformmark, Moscow, 33 p. (in Russian) [*Вартанян Г.С.* Флюидосфера, геодинамическая фильтрация и формирование трещинной проницаемости в ходе погружения осадочных толщ. Геология, методы поисков, разведки и оценки месторождений топливно-энергетического сырья. № 6. М.: Геоинформмарк, 2000. 33 с.].

Vinogradov S.D., 1989. Acoustic Method in Studies in Earthquake Physics. Nauka, Moscow, 177 p. (in Russian) [*Виноградов С.Д.* Акустический метод в исследованиях в физике землетрясений. М.: Наука, 1989. 177 с.].

Zaslavsky B.V., 1986. Short Course of Resistance of Materials. Mashinostroenie, Moscow, 328 p. (in Russian) [*Заславский Б.В.* Краткий курс сопротивления материалов. М.: Машиностроение, 1986. 328 с.].

Рудольф Михайлович Семенов, докт. геол.-мин. наук, профессор, в.н.с.
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
Институт земной коры СО РАН
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия
Тел.: 8(3952)425404; ✉ e-mail: semenov@crust.irk.ru

Rudolf M. Semenov, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, Lead Researcher
Irkutsk State Transport University
15 Chernishevsky street, Irkutsk 664074, Russia
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS
128 Lermontov street, Irkutsk 664033, Russia
Tel.: 8(3952)425404; ✉ e-mail: semenov@crust.irk.ru

Виктор Владимирович Кашковский, докт. техн. наук, профессор, с.н.с.
Иркутский государственный университет путей сообщения
664074, Иркутск, ул. Чернышевского, 15, Россия
Тел.: 8(3952)638359; e-mail: kww542339@km.ru

Victor V. Kashkovsky, Doctor of Technical Sciences, Professor, Senior Researcher
Irkutsk State Transport University
15 Chernishevsky street, Irkutsk 664074, Russia
Tel.: 8(3952) 638359; e-mail: kww542339@km.ru

Максим Николаевич Лопатин, преподаватель
Иркутский государственный университет
664003, Иркутск, ул. Карла Маркса, 1, Россия
Тел.: 8(3952)521071; e-mail: flamewolf@mail.ru

Maxim N. Lopatin, Lecturer
Irkutsk State University
1 Karl Marx street, Irkutsk 664003, Russia
Tel.: 8(3952) 521071; e-mail: flamewolf@mail.ru