



УДК 551.2.01(-925.16)

Плотность разломов земной коры и термальные источники в зоне миграции сейсмической активности области Амурского роя землетрясений (северо-восточный фланг Байкальской рифтовой системы)

А. В. Новопашина, Е. А. Кузьмина

Институт земной коры СО РАН

Аннотация. На основе пространственно-временного анализа суммарной сейсмической энергии области Амурского роя выделена устойчивая тенденция медленного (месяцы и годы) смещения сейсмической активности вдоль зоны повышенной плотности разломов, характеризующейся выходами гидротермальных источников. Описан возможный механизм распространения сейсмической активности с участием подземных вод в процессе передачи напряжений, при котором изменение порового давления в трещиноватой зоне может являться одним из триггеров землетрясений и вместе с тем смягчать силу сейсмических событий. Амурский рой землетрясений как источник начального изменения напряженного состояния способствовал сбросу напряжений в области проявления сейсмических событий и передаче напряжений в более пластичные слои литосферы: нижнюю кору и верхнюю мантию, по которым оно передается медленней, чем в верхней коре, в силу реологических свойств. Распространение фронта изменения напряженного состояния вызывает в верхней и нижней коре увеличение порового давления флюидов, мигрирующих при этом наверх по пути наименьшего сопротивления – системам трещин. Повышенные значения теплового потока в зоне миграции сейсмического процесса соответствуют увеличению пластических свойств нижней коры, участвующей в процессе передачи напряжений, а высокая плотность разломов в районе Амурского роя способствует водной проницаемости верхнего хрупкого слоя земной коры и релаксации напряжений.

Ключевые слова: миграция сейсмической активности, передача напряжений, флюиды.

Введение

Упорядоченное во времени направленное распространение очагов землетрясений разной силы называют миграцией сейсмической активности, под которой в данном случае понимаются любые естественные сейсмические проявления. В качестве параметра, характеризующего сейсмическую активность, использован десятичный логарифм суммарной энергии землетрясений (LgE_{sum}), выделившейся на определенной площадке в течение заданного времени. Сильные и умеренные события, а также рои землетрясений могут располагаться в любом звене цепочек используемого параметра – быть как

причиной, так и следствием миграционного процесса. В случае рассматриваемого Амутского роя землетрясений получил развитие афтершоковый процесс.

Пространственно-временная развертка максимумов выделившейся при землетрясениях энергии позволяет выделить два основных вида миграции – быстрые и медленные. При быстрых миграциях отклик от сейсмических событий в соседних областях происходит в пределах очага (и даже выходит за его границы) в течение первых секунд, минут, часов и суток до или после начального землетрясения, что можно объяснить хрупким взаимодействием отдельных блоков верхней и средней земной коры. Медленное направленное распространение сейсмической активности – в течение лет и десятков лет – принято связывать с передачей положительных упругих напряжений через пластичную среду в нижней коре и верхней мантии [9].

Пространственно-временная привязка эпизодов миграций показывает приуроченность их к месту и времени максимальных напряжений. Сейсмическое событие или их группа изменяют поле статического напряжения на прилегающих территориях, что вызывает увеличение скорости сейсмического потока [10]. Перераспределение напряжений и вызванное им распространение деформаций, сопровождающих толчки разной силы, не обязательно ограничиваются областью разлома, на котором произошло начальное землетрясение. Таким образом проявляется взаимодействие соседних разломов (*fault interaction*). Явление такого взаимодействия можно наблюдать как на сопряженных, так и на разделенных перемычкой разломных структурах в разных сейсмоактивных частях планеты.

В работе [7] показано, что причиной, стимулирующей слабую сейсмичность и определяющей вариации ее амплитуды и активности по простиранию, является миграция флюидов из нижней коры и верхней мантии в ослабленную (дробную) зону с наименьшим фильтрационным сопротивлением, так как чем выше плотность разломов, тем значительней разуплотнение коры [1].

Наличие высокотемпературных подземных вод – дополнительный важный фактор разупрочнения геологической среды. Выходы горячих источников указывают на районы с высокой активностью глубинных флюидов, а повышенные температуры вод являются показателем активности конвективного теплопереноса. Разупрочнение земной коры может происходить, по-видимому, за счет изменения порового давления флюидов, приводящего к изменению сил трения на существующих плоскостях разрывов, а также за счет известного эффекта Ребиндера.

Таким образом, если процесс распространения фронта напряжений сопровождается латеральной и вертикальной миграцией флюидов, последние, с одной стороны, могут быть посредником передачи напряжений от нижних пластичных слоев к верхним хрупким слоям земной коры за счет изменения порового давления, а с другой стороны, способствовать уменьшению силы толчков в зоне дробления (релаксации напряжений) [8], поэтому статистически подтверждается связь роев землетрясений с районами выходов подземных вод с высокой температурой.

Поскольку очаговые зоны чаще всего связаны с крупными разломами или узлами их пересечения, они должны отличаться повышенной обводненностью от соседних менее нарушенных участков. Уровень обводненности и условия водообмена в таких зонах возрастают в случае растягивающих напряжений [3]. Степень нарушенности верхней упругой части коры может быть выражена количественным параметром – плотностью активных разломов, ответственных за генерацию землетрясений. В данной работе предпринята попытка оценить связь процесса сейсмомиграции с уровнем трещиноватости земной коры и геотермальными проявлениями для области Амутского роя в северо-восточной части Байкальской рифтовой системы (БРС), где ранее нами была зафиксирована миграция сейсмической активности. Амутский рой наблюдался в районе Амутской впадины, где сходятся четыре хребта – Баргузинский, Икатский, Северо-Муйский и Южно-Муйский. В течение 1979 г. было зафиксировано три землетрясения 13-го энергетического класса и два – 12-го, преимущественно сбросового характера. Ранее Н. А. Флоренсовым [5] в районе Амутской впадины выделен крупный глубинный разлом северо-восточного простирания, с которым авторы [4] связывают долгоживущий сейсмический процесс, не затухающий в течение многих лет.

Методы исследования

Миграции сейсмической активности выделяются на основе анализа трехмерных пространственно-временных диаграмм с осями времени, проекции расстояния и логарифма суммарной выделившейся энергии землетрясений ($\lg E_{\text{sum}}$), построенных для областей проецирования сейсмических данных, ось симметрии (или ось проекции) которых максимально приближена к осям концентраций эпицентров, а ширина и длина определены размером областей сгущения очагов. Шкала $\lg E_{\text{sum}}$ на диаграммах отражает сглаженные в окне 3 на 3 точки значения.

Для определения скорости миграций сейсмической активности используется отношение проекции расстояния (в км) к проекции времени (в годах). Наиболее близко расположенные максимумы используемого параметра объединяются в цепочку энергетических кластеров, наклон которой на пространственно-временной диаграмме отражает скорость и направление распространения сейсмической активности. Используемая методика позволяет выделить медленные миграции, измеряемые в километрах в год. Обнаружение смещений с более высокой скоростью требует более детальной временной развертки, чего данная методика сделать не позволяет.

Степень нарушенности верхней упругой части коры может быть выражена количественным параметром – плотностью активных разломов, ответственных за генерацию землетрясений (рис. 1). Параметры сети разломов рассчитывались на основе карт Государственной геологической съемки масштаба 1:200 000 с использованием прямоугольной палетки, размер которой составлял по широте и долготе 1° . Для сглаживания результатов использовалось 50%-ное наложение палеток.

Опробование термальных источников Баргузинской впадины, проведенное в 2008 г., включало отбор проб воды на макро- и микрокомпоненты, газовый состав и измерение температуры воды ртутным термометром.

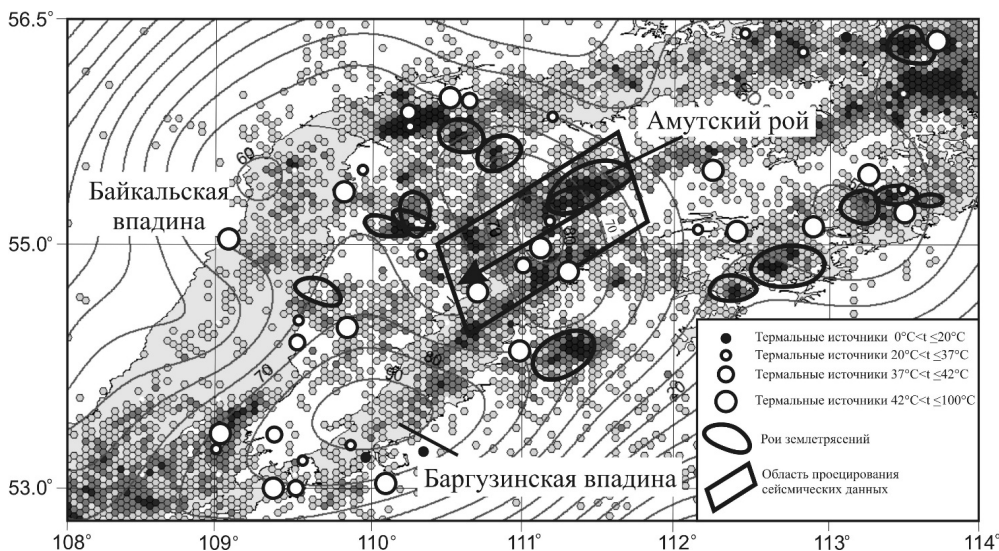


Рис. 1. Карта плотности активных разломов (изолинии) и плотности эпицентров северо-восточной части БРС с расположением области проецирования сейсмических данных

Фактический материал

Параметр LgE_{sum} получен по данным БФГС СО РАН за инструментальный период 1964–2002 гг. для представительных землетрясений (энергетический класс $K \geq 8$), энергия которых суммировалась за период времени $\Delta T = 1$ мес. в пределах ячеек проецирования размером $0,1^\circ$. Энергия в каждой элементарной ячейке вычисляется как: $lgE_{sum} = lg \sum_{i=1}^n E_i$, где n – количество землетрясений, E – энергия землетрясений в джоулях.

Для построения карты плотности разломов были использованы материалы Н. В. Солоненко, А. В. Солоненко (1987) и каталог землетрясений БФГС СО РАН по роевым событиям.

Описание модели

На основе наблюдений цепочек миграций на диаграммах с одинаковым азимутом и разной шириной зон проецирования сейсмических данных установлено, что яркость цепочек увеличивается с увеличением ширины зоны. Таким образом, можно предположить, что распространение сейсмической активности связано с распространением фронта напряжений, а сейсмичность проявляется в ослабленных зонах земной коры, где уже подготовлены условия для сейсмических событий разной силы. Такими зонами могут яв-

ляться зоны динамического влияния разломов, зоны сопряжения тектонических структур или области перемычек. Накопление напряжений, приводящее к землетрясениям, складывается из напряжений, нарастающих за счет тектонической нагрузки и за счет передачи напряжений из соседних областей, например за счет движения литосферных плит, от сильного или умеренного события, что иногда сопровождается миграцией кластеров землетрясений разной силы. Распространяющийся фронт напряжений может как выступать триггером землетрясений, так и оказывать накопительный эффект. Кроме того, более высокая скорость движения тектонических плит может способствовать более быстрому накоплению напряжений. На рисунке 2 предложена модель распространения фронта сейсмической активности, по направлению совпадающего с направлением распространения фронта положительных напряжений. Показано, что в узкую зону проецирования попадает меньшее число событий, в результате чего цепочка менее яркая, чем в случае проецирования в более широкой зоне. Влияние ширины зоны проецирования сказывается на расстоянии до 100 км и более в зависимости от размера сейсмоактивной зоны.

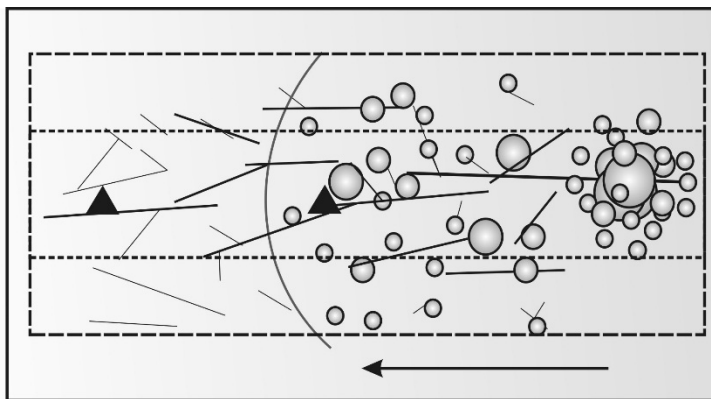


Рис. 2. Модель медленного распространения фронта сейсмической активности. Кружки разного диаметра – землетрясения разной силы, линии – разломы разного ранга, дуга – фронт передачи напряжений, стрелка – направление распространения сейсмической активности, треугольники – выходы термальных источников, тонкий пунктир – границы узкой области проецирования сейсмических данных, жирный пунктир – границы широкой области проецирования

Результаты

На рисунке 3 представлена пространственно-временная диаграмма логарифма суммарной выделившейся при землетрясениях энергии (параметр $\lg E_{\text{sum}}$) для области Амутского роя, на которой виден тренд направленного распространения сейсмической энергии от кластера толчков умеренной силы периода 1979–1981 гг. в юго-западном направлении на протяжении 22 лет на расстояние около 110 км, что соответствует скорости около 5 км/год. На фоне основного тренда фиксируются более высокоскоростные

разнонаправленные цепочки максимумов сейсмической активности: 10–40 км/год, что отражает возвратно-поступательные эпизоды деформаций по более мелким сегментам, чем зона общего смещения.

На рисунке 1 видно, что один из положительных максимумов количества активных разломов располагается в области миграций сейсмической активности, направление которой на рисунке показано стрелкой.

В области миграций и повышенной плотности активных разломов также сосредоточены выходы азотных термальных источников с температурой до +48 °С, притом что максимальная температура в БРС составляет +81 °С: Умхейский (+48 °С), Мегдылкон (+32 °С), Кучегерский (+42 °С), Сеюйский (+48,5 °С) и Алла (+40 °С). Преимущественно, распространение азотных терм связывают с ярко выраженной неотектонической активностью, глубинными омоложенными разломами в древних кристаллических породах, свойственных центральной части рифта. Данные термальные источники (кроме Сеюйского) приурочены к северной части Баргузинского сброса, с которым связаны максимумы теплового потока как дополнительного критерия активизации разломных зон. По данным С. В. Лысак [2], активным разломам БРС свойственны повышенные значения градиента теплового потока. Интенсивный вынос глубинного тепла наблюдается и на горных перемычках между впадинами, которые пронизаны мелкими разломами с термопроводящими зонами. Термоактивны также склоны Баргузинского хребта, обращенные к Баргузинской и Верхнеангарской впадинам. Геотермические аномалии могут быть связаны с подъемом астеносферных диапиров и наличием магматических камер под рифтовыми впадинами, являющихся источником глубинного тепла, поступающего на поверхность Земли с подземными флюидами по глубинным разломам [2]. Таким образом, зона миграции сейсмической активности связана с областью гидротермальных проявлений, аномально высоких значений теплового потока и его градиента, что говорит о пониженной вязкости нижних слоев земной коры в этой зоне.

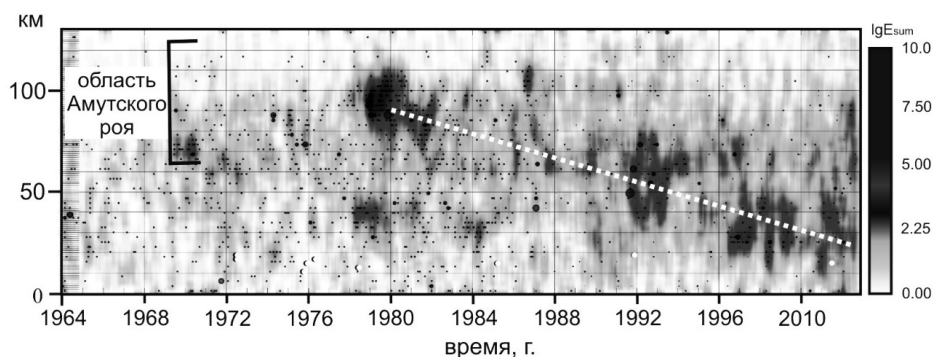


Рис. 3. Пространственно-временная диаграмма lgE_{Sum} для области Амурского роя. Пунктиром показан тренд смещения сейсмической активности

На рисунке 4 показан возможный механизм миграции сейсмической активности в разрезе, описывающий процесс распространения сейсмичности во времени за счет упруго-вязкой передачи напряжений в слоях литосферы, отличающихся между собой реологическими свойствами. Схема демонстрирует, что источником начального изменения напряжения является рой событий, который способствовал сбросу напряжений в области проявления сейсмических событий и передаче напряжений в более пластичные слои литосферы: нижнюю кору и верхнюю мантию, по которым оно передается медленней, чем в верхней коре в силу реологических свойств. Распространение фронта изменения напряженного состояния вызывает в верхней и нижней коре увеличение порового давления флюидов, мигрирующих при этом наверх по пути наименьшего сопротивления – системам трещин. Флюиды, заполняющие трещины на всех глубинах, до которых сохраняются упругие деформации, способствуют сбросу напряжений в трещиноватой зоне, вызывая срывы в местах критической тектонической нагрузки, одновременно смягчая силу землетрясений.

Повышенная плотность разломов в районе Амутского роя способствует значительному обводнению верхних хрупких частей коры, что должно оказывать значимое влияние на процесс релаксации напряжений. Это влияние может выражаться в виде высокого давления поровых или трещинных вод, которое нейтрализует геостатическую нагрузку, а также приводит к возникновению и расширению трещин. Если учесть, что сейсмичность является фактором, активизирующим водообмен [3], то данная модель подразумевает также обратную причинно-следственную связь, проявляющуюся в логической цепи: сейсмическое событие – увеличение порового давления пород – сейсмическое событие и так далее, пока распространение воды не встретит препятствие в виде экрана – консолидированного блока земной коры, отличающегося от зоны миграции повышенной вязкостью на всех глубинах.

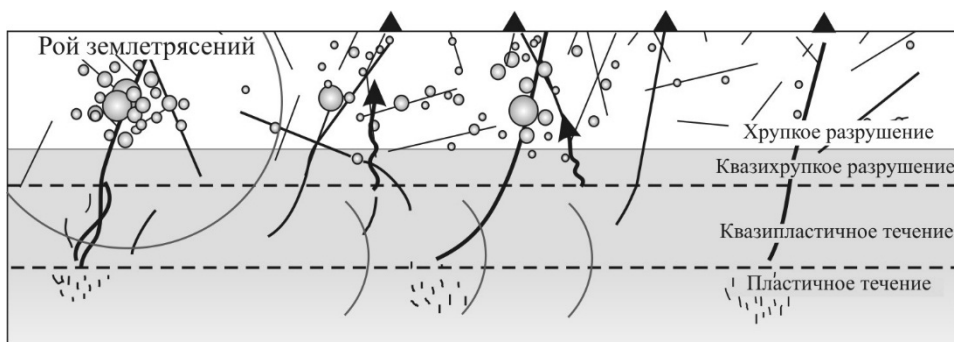


Рис. 4. Гипотетическая модель распространения сейсмической активности в разрезе на основе модели зоны современной деструкции литосферы [6]. Кругжки разного диаметра – землетрясения разной силы, сплошные линии – разломы разного ранга, пунктирные линии – условные реологические границы, дуги – фронт передачи напряжений, изогнутые стрелки – потоки флюидов, треугольнички – выходы термальных вод на поверхность

Выводы

На основе пространственного сопоставления установлена связь области повышенной трещиноватости земной коры, геотермальных проявлений и аномально высокого уровня теплового потока с зоной миграции сейсмической активности в области Амутского роя.

Упорядоченное распространение сейсмической активности происходит по ослабленным зонам дробления вследствие распространения фронта аномальных напряжений, что сопровождается процессами развития и взаимодействия разломных зон. Перераспределение упругих напряжений может происходить между разломами и не проявляться в миграциях, если зона перепада не является достаточно ослабленной для того, чтобы реагировать на изменения, проявляя умеренную и слабую сейсмическую активность, т. е. только «достаточно» дробная среда будет маркировать прохождение фронта деформаций, сопровождающегося землетрясениями средней и слабой силы, что подтверждает проведенный сопоставительный анализ.

Плотность активных разломов характеризует проницаемость земной коры, а миграция флюидов, усиливаемая перераспределением напряжения, может вносить существенный вклад в процесс миграции сейсмической активности. Вероятно, верхняя часть коры с повышенной степенью раздробленности лучше, чем консолидированная, маркирует прохождение фронта напряжений в виде землетрясений средней и слабой силы. Вместе с тем высокие значения теплового поля и геотермического градиента характеризуют повышение пластических свойств нижней коры, что может оказывать существенное влияние на процесс передачи напряжений. Таким образом, миграционный процесс связан с областью пониженной вязкости верхней и нижней земной коры.

Список литературы

1. Геология и сейсмичность зоны БАМ. Неотектоника / С. И. Шерман [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1984. – 207 с.
2. Лысак С. В. Тепловой поток в зонах активных разломов на юге Восточной Сибири / С. В. Лысак // Геология и геофизика. – 2002. – Т. 43, № 8. – С. 791–803.
3. Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах / Е. В. Пиннекер [и др.]. – Новосибирск : Наука, 1982. – 95 с.
4. Солоненко Н. В. Афтершоковые последовательности и рои землетрясений в Байкальской рифтовой зоне / Н. В. Солоненко, А. В. Солоненко. – Новосибирск : Наука, 1987. – 89 с.
5. Флоренсов Н. А. Мезозойские и Кайнозойские впадины Прибайкалья / Н. А. Флоренсов. – Л. : Изд-во АН СССР, 1960. – 258 с.
6. Шерман С. И. Тектонофизический анализ сейсмического процесса в зонах активных разломов литосферы и проблема среднесрочного прогноза землетрясений / С. И. Шерман // Геофиз. журн. – 2005. – Т. 2, № 1. – С. 20–38.
7. Becken M. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault / M. Becken, O. Ritter, P. A. Bedrosian, U. Weckmann // Nature. – 2011. – Vol. 480. – P. 87–90.
8. Parotidis M. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe / M. Parotidis, E. Rothert, S. A. Shapiro // Geophys. Res. Lett. – 2003. – Vol. 30, N 20. – 2075.

9. Pollitz F. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia / F. Pollitz, M. Vergnolle, E. Calais // *Journal of Geophysical Research*. – 2003. – Vol. 108, N B10. – 2503.

10. Reasenber P. A. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake / P. A. Reasenber, R. W. Simpson // *Science*. – 1992. – Vol. 255, N 5052. – P. 1687–1690.

Earth's Crust Faults Density and Thermal Springs in the Seismic Activity Migration Zone at the Amutsky Swarm Region

A. V. Novopashina, E. A. Kuz'mina

Institute of the Earth's Crust SB RAS

Abstract. Based on the total seismic energy spatial-temporal analysis of the Amurskiy swarm region, seismic activity slow migration trend (months and years) was fixated along zones of high faults density, characterized by the hydrothermal springs. We present the possible seismic activity propagation mechanism with groundwater participation, that take part in stress transfer by pore pressure change in in the fractured zone, could be one of the triggers of earthquakes, and could decrease seismic events force. The Amutsky swarm as a source of stress state initial change facilitated the stresses release in the seismic area and the stress transfer to the more plastic layers of the lithosphere: the lower crust and the upper mantle, transmitting stress slowly than the upper crust due to rheological properties. The stress state change front propagation causes an increase of fluids pore pressure in the upper and lower crust, migrating upward along the least resistance path – by the fracture systems. Increased terrestrial heat flow values at the migration seismic process zone correspond to an increase of the plastic properties in the lower crust, that take part in stress transfer process. High faults density of the Amutsky swarm region contributes to the water permeability of the upper earth's crust elastic layer and stress relaxation.

Keywords: migration of seismic activity, stress transfer, fluids.

References

1. Sherman S.I., Levi K.G., Ruzhich V.V., San'kov V.A., Dneprovskii Yu.I., Rasskazov S.V. *Geologiya i seismichnost' zony BAM. Neotektonika*. Novosibirsk, Nauka, 1984. 207 p.
2. Lysak S.V. *Terrestrial heat flow in zones of active faults in southern east Siberia*. *Russian Geology and Geophysics*, 2002, vol. 43, no 8, pp. 791-803 (in Russian).
3. Pinneker E.V., Pisarskii B.I., Shvartsev S.L., Yas'ko V.G., Dzyuba A.A., Kisin I.G., Zverev V.P., Lomonosov I.S., Tolstikhin O.N., Zhuravel' N.A., Nazarov A.D., Gerasimova Zh.A. *Osnovy gidrogeologii. Geologicheskaya deyatel'nost' i istoriya vody v zemnykh nedrakh*. Novosibirsk, Nauka, 1982. 95 p.
4. Solonenko N.V., Solonenko A.V. *Ahtershokovye posledovatelnosti i roi zemletrysenii v Baikalskoi Riftovoy Zone*. Novosibirsk, Nauka, 1987. 89 p.
5. Florensov N.A. *Mezozoiskie i Kainozoiskie vpadiny Pribaykalia*. Leningrad, Izd-vo AN SSSR, 1960. 258 p.
6. Sherman S.I. *Tektonofizicheskii analiz seismicheskogo protsessa v zonakh aktivnykh razlomov litosfery i problema srednesrochnogo prognoza zemletryasenii*. *Geofizicheskii zhurnal*, 2005, vol. 2, no.1, pp. 20-38 (in Russian).

7. Becken M., Ritter O., Bedrosian P.A. Weckmann U. Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Nature*, 2011, vol. 480, pp. 87-90. doi:10.1038/nature10609.

8. Parotidis M., Rothert E., Shapiro S.A. Pore-pressure diffusion: A possible triggering mechanism for the earthquake swarms 2000 in Vogtland/NW-Bohemia, central Europe. *Geophys. Res. Lett.*, 2003, vol. 30, no 20, 2075. doi: 10.1029/2003GL018110.

9. Pollitz F., Vergnolle M., Calais E. Fault interaction and stress triggering of twentieth century earthquakes in Mongolia. *Journal of Geophysical Research*, 2003, vol. 108, no B10, 2503. doi: 10.1029/2002JB002375.

10. Reasenberг P.A., Simpson R.W. Response of regional seismicity to the static stress change produced by the Loma Prieta earthquake. *Science*, 1992, vol. 255, no 5052, pp. 1687-1690. doi: 10.1126/science.255.5052.1687.

Новопашина Анна Владимировна
кандидат геолого-минералогических
наук, научный сотрудник
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: (3952)42-95-34
e-mail: anek_sanek@mail.ru

Novopashina Anna Vladimirovna
Candidate of Sciences (Geological and
mineralogical), Researcher
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952)42-95-34
e-mail: anek-sanek@mail.ru

Кузьмина Елена Александровна
инженер
Институт земной коры СО РАН
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128
тел.: 8(3952)42-95-34
e-mail: selenginsk2007@mail.ru

Kuz'mina Elena Alexandrovna
Engineer
Institute of the Earth's Crust SB RAS
128, Lermontov st., Irkutsk, 664033
tel.: (3952)42-95-34
e-mail: selenginsk2007@mail.ru