

МОДЕЛИРОВАНИЕ МНОГОЛЕТНЕЙ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ НА ПРИМЕРЕ АЛЕУТСКОЙ ОСТРОВНОЙ ДУГИ

К. Ю. Силкин¹, С. Н. Родина²

¹Воронежский государственный университет

²Институт физики Земли РАН им. О. Ю. Шмидта, г. Москва

Поступила в редакцию 10 января 2017 г.

Аннотация: Алеутский архипелаг – это одно из самых сейсмических мест на Земле. Более 100 землетрясений разной силы происходят в его пределах ежегодно. Была поставлена цель исследовать пространственно-временные особенности многолетней сейсмичности этого района. Для этого на основании простых эмпирических формул и упрощённых предположений аналитически была выведена расчётная формула, соединившая энергию сейсмического воздействия в пределах эпицентральной области землетрясения с его магнитудой для всех точек очага. С помощью этой формулы и с учётом суммирования энергетических эффектов от всех землетрясений, области очагов которых пересекаются, было проведено компьютерное моделирование генерации сейсмической энергии за почти столетний период. Результаты моделирования лежат в методической и практической плоскости. Во-первых, экспериментально подобрано значение параметра ε , входящего в расчётную формулу. Во-вторых, получены новые представления картины меры активизации литосферы под действием как локальных, так и дистанционно наведённых факторов любой тектонической природы. При этом, выявлена чёткая делимость изучаемой территории на основании системы разноранговых границ, ориентированных как вдоль, так и вкост островной дуги. Правомерность такого сегментирования подтверждена классическим способом оценки распределения сейсмической активности – с помощью расчёта пространственной плотности эпицентров. Однако подход, основанный не на простом поштучном учёте землетрясений, а учитывающий и их энергию, следует считать предпочтительным.

Ключевые слова: Алеутская островная дуга, сейсмичность, энергия землетрясений, алгоритм, математическое моделирование.

SIMULATION OF LONG-TERM SEISMIC EMISSION ON THE EXAMPLE OF THE ALEUTIAN ISLAND ARCH

Abstract: the Aleutian archipelago is one of the most seismically active places on Earth. More than 100 earthquakes of different force occur in its area annually. The object to investigate spatial and temporary features of long-term seismicity of this area was set. For this purpose on the basis of simple empirical formulas and the simplified assumptions the computing algorithm which connected energy of seismic influence inside earthquake epicenter area to its magnitude for all points of this area analytically was formulated. By means of this formula and taking into account summation of effects of all earthquakes computer modeling of generation of seismic energy for almost centenary period was carried out. Results of modeling lie in the methodical and practical plane. First, value of parameter ε , entering a formula is picked experimentally up. Secondly, new representations of lithosphere activization picture under the influence of any tectonic nature factors are received. At the same time accurate divisibility of the studied territory by the system of different rank borders was revealed. Admissibility of such segmentation is confirmed with a classical way of seismic activity distribution assessment – by means of epicenters spatial density calculation. However the approach based not on the simple piece accounting of earthquakes, but considering and their energy, is more preferable.

Keywords: Aleutian island arch, seismicity, energy of earthquakes, algorithm, mathematical simulation.

Введение

Выявление причинно-следственных связей между особенностями протекания сейсмического процесса в

смежных участках такого крупного сейсмоактивного региона как Алеутский архипелаг (рис. 1) требует оценки пространственно-временных характеристик

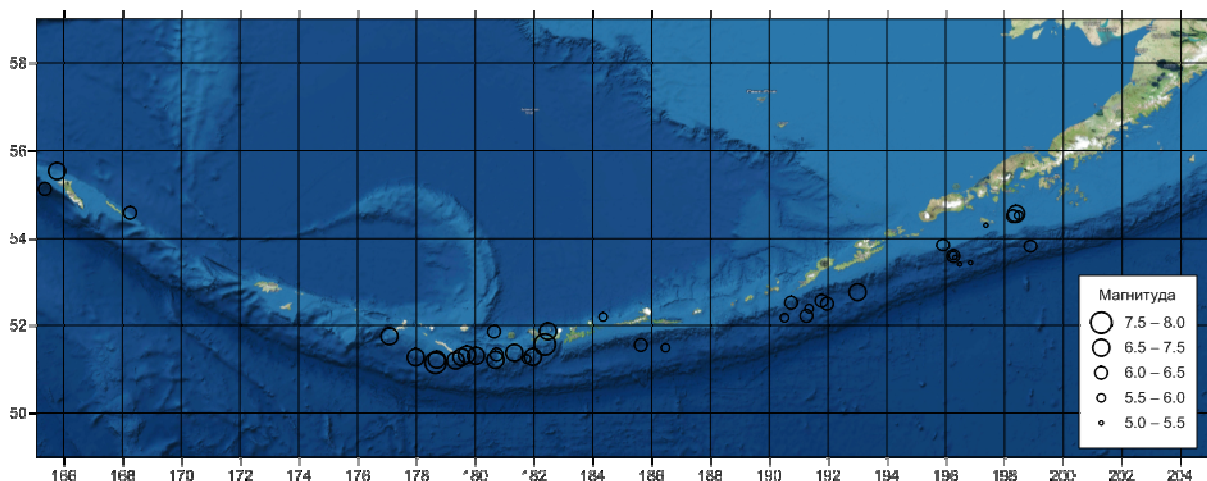


Рис. 1. Рельеф морского дна Алеутского архипелага и эпицентры сильнейших землетрясений. Для упрощения визуализации долготы западного полушария показаны значениями, продолжающими порядок долгот восточного полушария (значение 190° соответствует 170° з.д., 200° – 160° и т.д.).

генерации энергии землетрясений.

Сейсмический процесс, при этом, понимается не как совокупность землетрясений в виде дискретных точек в пространстве-времени, снабжённых энергетической характеристикой [1], а как непрерывный, хотя и нестационарный, процесс. Отсутствие задачи точного определения пространственно-временной координаты каждого дискрета позволило положить в основу исследования простые эмпирические формулы и упрощённые предположения.

Результатом стало соотношение, позволяющее приближённо оценить величину суммарной сейсмической энергии, приложенной к любой точке поверхности Земли в результате испускания её всеми землетрясениями, произошедшими в районе Алеутской островной дуги за рассматриваемый период времени, при условии попадания данной точки в пределы очагов этих событий. Искомый результат – получение распределения меры активизации литосферы под действием как локальных, так и дистанционно наведённых факторов любой тектонической природы.

Было проведено математическое моделирование указанных процессов, что позволило получить наглядное представление о сейсмическом процессе в его динамике, и выявлены некоторые интересные особенности сейсмичности изучаемой территории.

Методы

Пусть M – магнитуда землетрясения по каталогу. Вид магнитуды, определённой для данного события, в расчёт не принимается. Полагая, что проекция очага на дневную поверхность есть круг, получим его площадь $\lg(S) = M + 6$ [2]. Различия характера взаимосвязи магнитуды и размера очага для слабых и сильных событий не учитываются. Радиус очага (в градусах большого круга) будет определяться следующей формулой:

$$R = \frac{10^{0.5M-3}}{\sqrt{\pi}}.$$

Энергия землетрясения задаётся формулой $\lg(E) = 1.5M + 4.8$ (Дж) [2]. Будем считать, что это соотношение выполняется при любом значении M . С одновременным представлением энергии в ПДж (10^{15} Дж) для упрощения дальнейшей визуализации результатов получим:

$$E = 10^{(1.5M-10,2)}$$

Исходя из предположения о круговой форме проекции очага, изометричности среды, зависимости энергии от магнитуды и учёта затухания энергии с расстоянием, смоделируем распределение энергии в пределах поверхности очага в виде симметричной двумерной гауссоподобной функции:

$$y(r, \theta, M) = K_M e^{-(r/\sigma)^2},$$

где $r \in [0, R]$, а θ – азимут, от которого, как можно видеть, она не зависит. Функция эта удобна для использования благодаря своей простоте и форме, подобной функциям x^{-2} и x^{-3} (рис. 2) на средних и больших дистанциях, но имеет, в отличие от них, конечное значение вблизи источника. Функции x^{-2} и x^{-3}

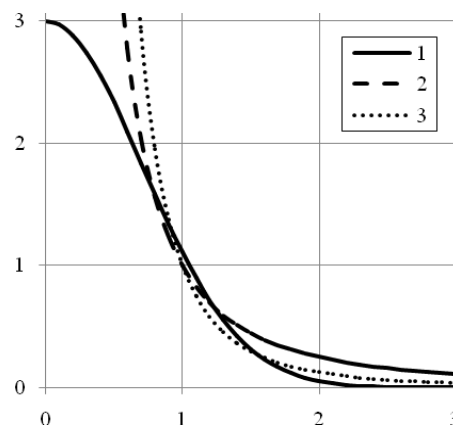


Рис. 2. Графики модельных функций. Условные обозначения: 1 – $3\exp(-x^2)$, 2 – x^{-2} , 3 – x^{-3} .

другие обратные функции описывают механизм затухания сейсмической энергиилучше [3], но проведение вычислений на базе каталога из многих тысяч землетрясений с близкими эпицентрами, минимизирует это различие. Кроме того в [4] мы доказали, что функция подобного (экспоненциального) вида хорошо аппроксимирует зависимость энергии афтершоков от расстояния между эпицентрами афтершока и главного события.

Форма графика $y(r, M)$ для любого азимута определяется параметрами K_M и σ . Первый из них нормирует функцию, а второй – задаёт крутизну её спада. При этом предполагается, что на границе очага выполняется равенство:

$$y(R, M) = y(0, M) \cdot 10^\epsilon = K_M \cdot 10^\epsilon, \quad (1)$$

где 10^ϵ – достаточно малая величина, выбираемая экспериментально.

Нормирующий коэффициент K_M задаётся исходя из требования сосредоточения энергии землетрясения (с точностью до 10^ϵ) в пределах кругового очага площадью S , что можно представить в виде следующего соотношения:

$$\int_S y(r, M) = E.$$

Нахождение интеграла преобразует последнее выражение:

$$\frac{K_M}{2} \sigma \sqrt{\pi} \cdot \operatorname{erf} \left(\frac{10^{(0,5M-3)}}{\sigma \sqrt{\pi}} \right) = E. \quad (2)$$

Если решить совместно систему из уравнений (1) и (2), можно получить несложную расчётную формулу:

$$y(r, M) \approx \frac{4,6\epsilon}{(10^\epsilon - 1)10^p}, \quad (3)$$

где

$$p = 4,2 - \epsilon\pi \cdot 10^{(6-M)} r^2 - M/2.$$

Здесь значения $y(r, M)$ измеряются в ПДж. Очевидно, что кроме параметра функция $y(r, M)$, приближённо описывающая распределение энергии в пределах очаговой области, зависит только от магнитуды M события и расстояния r , на котором оно оказывает воздействие на среду. Общий вид функции при $\epsilon = -6$ представлен на рис. 3. Можно видеть, что на удалении 0,5 и 2,5° землетрясения магнитудой 5,5 и 7,5, соответственно, будут производить равнозначное воздействие.

Результаты

Для выбора оптимального значения ϵ в пределах изучаемого региона было проведено моделирование многолетней генерации сейсмической энергии и сопоставления её структуры с выявленной по распределению пространственной плотности эпицентров [5]. В качестве исходных данных был взят каталог NEIC

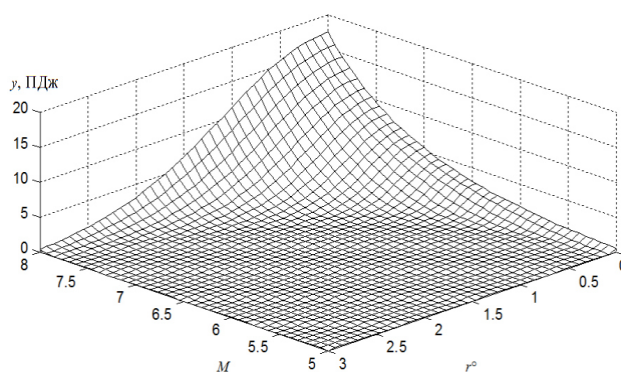


Рис. 3. Графическое изображение модели функции энергии в зависимости от расстояния и магнитуды при $\epsilon = -6$.

землетрясений, произошедших в районе Алеутской островной дуги, почти вековой длительности (с 1916 г.) объёмом более 16 тыс. сейсмических событий разной магнитуды.

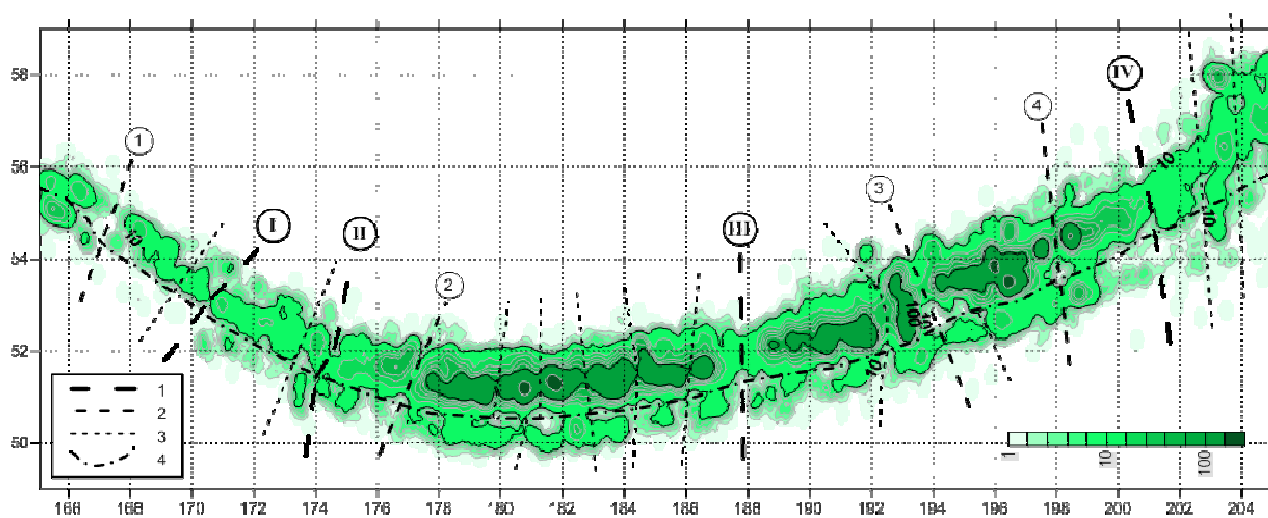


Рис. 4. Пространственная плотность эпицентров за весь период наблюдений, $(^\circ)^{-2}$.

Пространственная плотность эпицентров была получена в виде функции числа эпицентров на единицу площади. Мы проводили подсчёт в скользящем окне круговой формы диаметром 1° (рис. 4) по сетке с шагом $0,1^\circ$ как по широте, так и по долготе.

Можно видеть, что достаточно чётко прослежива-

ется продольная граница, отделяющая фронтальную и тыльную части островной дуги. Она совпадает с бровкой крутого внутреннего склона глубоководного жёлоба. Кроме того, в поперечной структуре дуги выделяется несколько крупных сейсмически активных участков, прерываемых более спокойными интервалами.

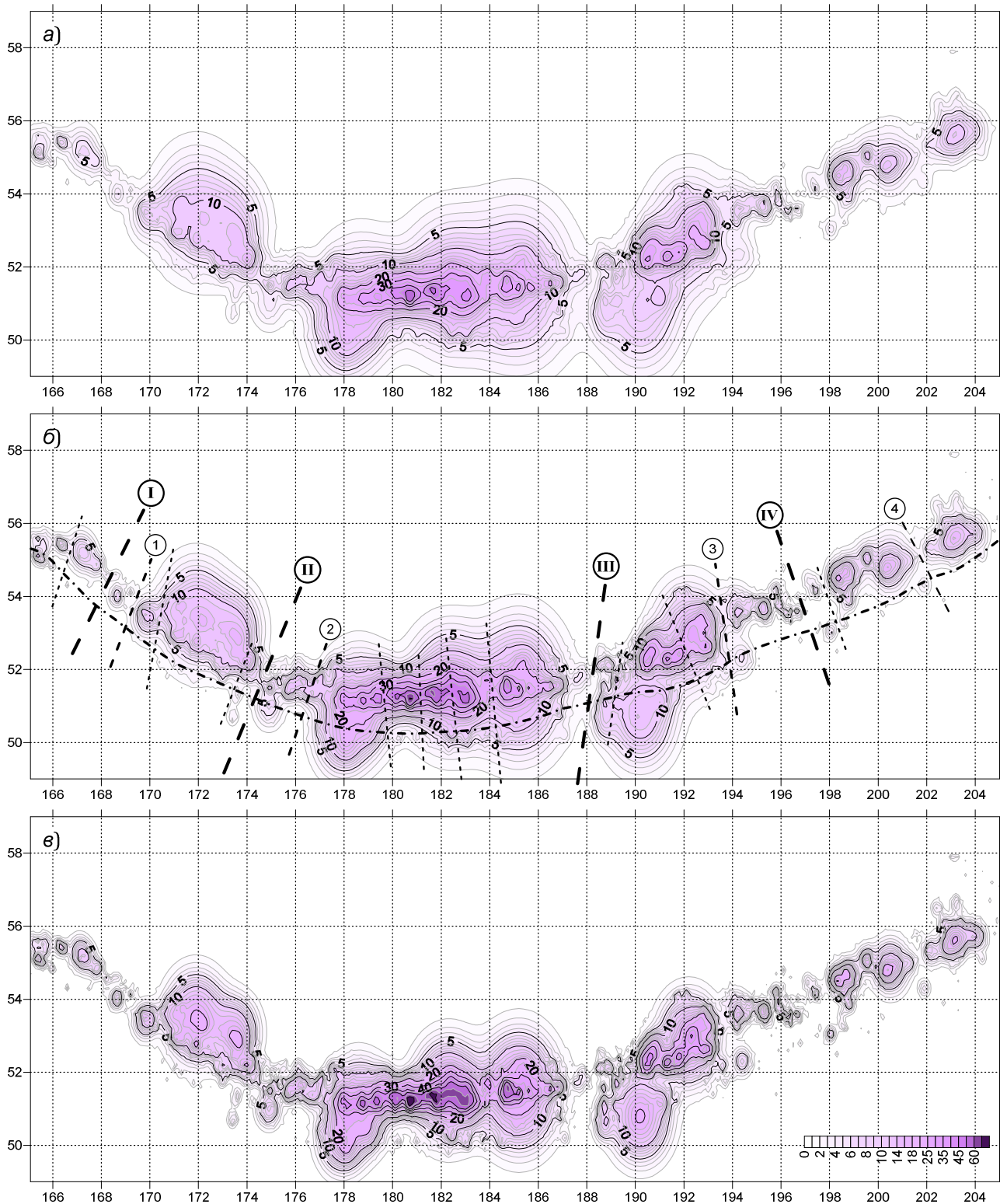


Рис. 5. Модель поля сейсмической эмиссии Алеутских островов (ПДж) за 100 лет: а) $\varepsilon = -3$, б) $\varepsilon = -6$, в) $\varepsilon = -9$.

В зависимости от ширины спокойных интервалов и интенсивности проявления сейсмической активности между ними была выделена система разноранговых границ, позволяющих провести иерархическое сегментирование района Алеутской дуги. Всего было выделено по 4 границы 1-го и 2-го ранга. Они пронумерованы на рис. 4 римскими и арабскими цифрами соответственно. Также отмечены несколько границ 3-го ранга.

На рис. 5 показано распределение в пределах изучаемой территории результата суммирования вклада в общую генерацию сейсмической энергии всех событий каталога, рассчитанной по формуле (3). Рисунки 5,а) – 5,в) показывают как изменяется расчётная модель распределения энергетического воздействия в случае применения разных значений ε , соответственно, -3 , -6 и -9 .

Сравнивая разные варианты модели можно видеть, что при $\varepsilon = -3$ Энергия размыта в пространстве очень широко, многие структурные особенности сейсмичности сглажены и малозаметны. Например, невозможно с уверенностью провести границу между внешней и внутренней сторонами островной дуги. Наоборот, при $\varepsilon = -9$ наблюдается высокая фрагментация поля сейсмической эмиссии, что очень мало похоже на структуру сейсмического поля, представленную на схеме пространственной плотности эпицентров. В итоге можно принять за оптимальную модель многолетней сейсмической эмиссии ту, которая задаётся параметром $\varepsilon = -6$.

Можно отметить, что общая картина пространственной структуры сейсмического процесса, как проявление иерархической делимости литосферы, в общих чертах совпадает при выявлении её разными способами (при условии оптимального подбора параметра ε). Однако наблюдаются и некоторые расхождения, проявляющиеся в положении отдельных границ. Кроме того, некоторые литосферные блоки получают отличающуюся оценку интенсивности происходящих в них сейсмических процессов. Это доказывает простое соображение – в вопросе интенсивности сейсмического процесса большое число слабых толчков не всегда эквивалентно нескольким сильным землетрясениям.

Тем не менее, однозначно совпадают границы II, 2, III и 3. Совпали по положению, но не по рангу границы IV и 4. Есть проблема с районированием западной части архипелага, где выделены границы I и 1, но, по-видимому, это связано со слабостью её сейсмичности, что проявляется в малом числе зареги-

стрированных событий. Границы 3-го ранга совпадают почти всегда.

Выводы

Можно отметить, что предложенный подход, основанный на простых эмпирических соотношениях, даёт технически легко осуществимую возможность исследовать пространственную структуру длительно развивающегося сейсмического процесса.

Полученные нами результаты моделирования суммарной генерации сейсмической энергии за 100 лет продемонстрировали состоятельность этой методики при сравнении её с другим способом оценки интенсивности сейсмического процесса – анализом пространственной плотности эпицентров. Кроме того, этот анализ может быть уточнён с помощью предлагаемой методики, т.к. нами было доказано, что простой формальный учёт числа сейсмических событий без учёта их энергии оправдывает себя далеко не всегда.

Поле генерации сейсмической энергии может быть также предметом многолетнего мониторинга при условии рассмотрения его достаточно длительными шагами, например, ежемесячно для наиболее активной средней части Алеутского архипелага и с более крупным шагом в остальных местах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Казахара, К.* Механика землетрясений / К. Казахара. – М.: Мир. – 1985. – 262 с.
2. *Каракин, А. В.* Разломы, трещиноватые зоны и волноводы в верхних слоях земной оболочки / А. В. Каракин, Ю. А. Курьянов, Н. И. Павленкова. – М.: Государственный научный центр Российской Федерации. – ВНИИГеосистем. – 2003. – 222 с.
3. *Адушкин, А. В.* Геодинамический мониторинг при разработке угольного месторождения Воркутской мульды / А. В. Адушкин, Л. И. Беляева, В. И. Куликов, А. И. Гончаров // ГИАБ, – 2009. – №12. – С.150-160.
4. *Силкин, К. Ю.* О зависимости энергии афтершоков от расстояния до эпицентра главного события / К. Ю. Силкин, С. Н. Родина // Глубинное строение, минералогия, современная геодинамика и сейсмичность Восточно-Европейской платформы и сопредельных регионов: материалы XX Всероссийской конференции с международным участием. – Воронеж. – 2016. – С. 361-366.
5. *Захаров, В. С.* Самоподобие структур и процессов в литосфере по результатам фрактального и динамического анализа: дис. ... докт. геол.-минерал. наук: 25.00.03. – Москва. – 2014. – 281 с.

Воронежский государственный университет
Силкин Константин Юрьевич, доцент, кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: Const.Silkin@mail.ru; Tel.: +7-909-210-05-52

Институт физики Земли РАН. Россия, Москва
Родина Светлана Николаевна, научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук
E-mail: Rodina@IFZ.ru; Tel.: +7-926-899-84-60

Voronezh State University
Silkin K.Yu., Associate Professor, PhD in Geological and Mineralogical Sciences
E-mail: Const.Silkin@mail.ru; Tel.: +7-909-210-05-52

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Moscow
Rodina S. N., Research Officer, PhD in Geological and Mineralogical Sciences. E-mail:
Rodina@IFZ.ru; Tel.: +7-926-899-84-60