

УДК 550.343.6

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТОКА СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

Малышев А.И., Малышева Л.К.

Институт геологии и геохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, malyshev@igg.uran.ru

Введение

Данная работа выполняется в рамках исследования, ориентированного на оценку прогнозных возможностей уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов (уравнения ДСПП, см. ниже) и, в случае положительных перспектив, на разработку алгоритмов его практического использования. Исследование теоретических и практических прогнозных возможностей уравнения ДСПП предполагает наличие нескольких этапов. На первом этапе исследований [3] разработана методика выявления основных трендов развития сейсмичности и предложены критерии оценки их экстраполяционной прогнозируемости. На следующем этапе исследований выполнена оценка связи таких природных катастроф, как сильные землетрясения [6, 7] или извержения вулканов [3–5], с трендами сейсмической активности, а также возможность прогноза на основе экстраполяции этих трендов. Эти работы позволили сделать вывод о том, что сейсмический поток, в целом, и поток сейсмической энергии, в частности, обладают хорошей прогнозируемостью и демонстрирует хорошие перспективы для прогноза вулканической активности и сильных землетрясений.

В августе 2018 г. в течение месяца выполнялось тестирование возможности оперативного мониторинга сейсмической активности в прогнозных целях с использованием уравнения динамики саморазвивающихся природных процессов. Результаты показали техническую возможность ежедневного мониторинга и выявили основную проблему – обилие быстропротекающих процессов, затрудняющих выделение устойчивых тенденций к затуханию или активизации. Вышесказанное делает возможным и необходимым переход к очередному этапу исследований – обобщающей оценке прогностического потенциала уравнения ДСПП и статистической настройке его параметров на максимальную эффективность прогноза трендов потока сейсмической энергии.

Методика исследований

В работе используется уравнение ДСПП [1, 2]

$$x'' = k |(x')^\lambda - (x'_0)^\lambda|^{a/\lambda}, \quad (1)$$

где x – расчетная характеристика процесса, моделирующая имеющиеся фактические данные, x' и x'' – ее первая и вторая производные по времени t , k – коэффициент пропорциональности, а показатели степени λ и a определяют нелинейность процесса соответственно в окрестностях стационарного состояния ($x' \approx x'_0$) и на значительном от него удалении ($x' \gg x'_0$).

Для прогноза потенциально катастрофических процессов наиболее интересен случай $x' \gg x'_0$. Поэтому в качестве аппроксимационной модели имеет значение уравнение:

$$x'' = k (x')^a. \quad (2)$$

Под прогнозируемостью трендов потока сейсмической энергии понимается нахождение фактических данных “будущего” в полосе допустимых ошибок относительно расчетной кривой в ее экстраполяционной части. Полоса допустимых ошибок определяется на аппроксимационном участке последовательности по среднему отклонению σ фактических точек от расчетной кривой по нормали в координатах, нормированных на диапазон от 0 до 1. Затем аппроксимация экстраполируется в “будущее” до тех пор, пока нормальное расстояние каждой последующей (прогнозируемой) фактической точки до расчетной кривой находится в полосе допустимых ошибок ($\pm 3\sigma$) [3].

Исходные данные

В качестве исходных данных в работе используются Каталог землетрясений Камчатки и Командорских островов (1962 г. – наст. вр.)¹ по состоянию на 1 января 2019 г. (Кам), Каталог землетрясений Японского метеорологического агентства (1923 г. – наст. вр.)² по состоянию на

¹ Камчатский филиал ФИЦ ЕГС РАН, <http://sdis.emsd.ru/info/earthquakes/catalogue.php>

² http://www.data.jma.go.jp/svd/eqev/data/bulletin/hypo_e.html

31 октября 2016 г. (JMA) и Всемирный каталог Геологической службы США (1900 г. – наст. вр.)³ по состоянию на 1 января 2017 г. (USGS).

Таблица 1. Статистика прогнозных оценок

Радиус, км	Всего	Активизация	Затухание
1.5	1096174	288641	788926
3	1616944	364954	1226596
7.5	2250165	425902	1794352
15	2578669	382869	2167256
30	2754641	300195	2429350
60	2809066	238648	2548473
150	2846153	177670	2651046
	15951812	2178879	13605999

Эти данные были проанализированы в локальных гипоцентральных выборках с радиусами 1.5, 3, 7.5, 15, 30, 60 и 150 км. В общей статистике используется 16 млн прогнозных определений, в том числе 2 млн по активизации и 14 млн по затуханию (табл. 1). В качестве параметра x рассматривается сумма энергии землетрясений E . При этом энергия одиночного землетрясения в Дж оценивается согласно имеющейся зависимости между его магнитудой M и энергетическим классом K [8]: $K = 1.5 \times M + 4.8$.

Результаты исследований и их обсуждение

Выявлены области параметров уравнения ДСПП (рис. 1), дающие наибольший вклад в нелинейность (слева и в центре, оттенки красного) и связанные с прогнозируемостью сильных землетрясений ($M = 5-8$, в центре и справа, оттенки серого). Область прогнозируемости сильных землетрясений расположена в нижней части области нелинейности, т.е. соответствует более низким значениям коэффициента k . Сама область нелинейности характеризуется тонкими наклонными структурами, что соответствует цикличности сейсмического процесса разных временных масштабов от быстропротекающих (вверху) до наиболее длительных (внизу). С более длительными связаны сильные землетрясения. Это позволяет отфильтровать быстропротекающие процессы, препятствовавшие прогнозируемому мониторингу на прошлом этапе тестирования.

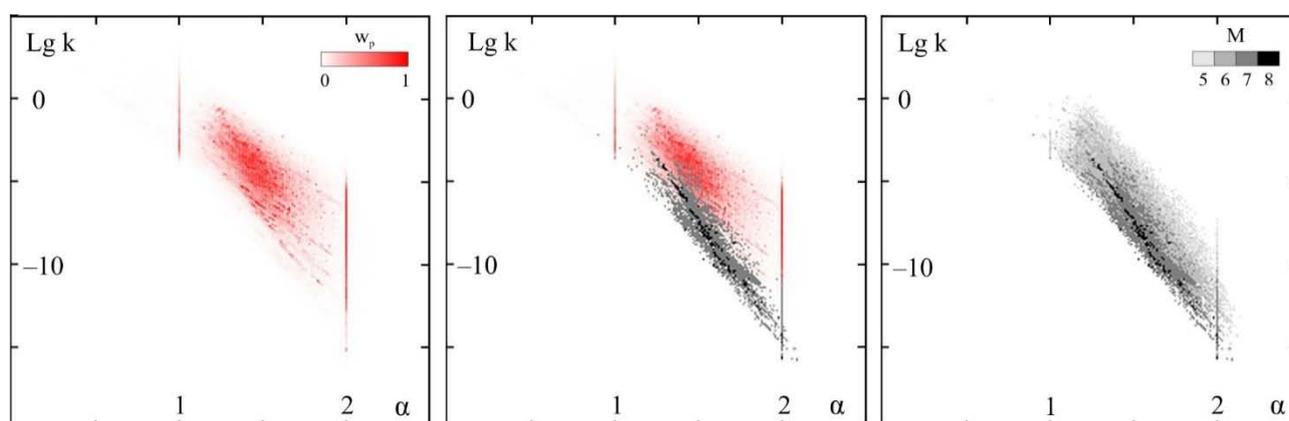


Рис. 1. Распределение веса прогнозной нелинейности w_p и магнитуды M прогнозируемых землетрясений в зависимости от параметров уравнения ДСПП (коэффициента k и показателя степени α) для активизации

Распределения удельного веса прогнозных определений и области прогнозируемости сильных землетрясений в координатах α - $-\lg|k|$ резко неоднородны и имеют ряд характерных геометрических особенностей. Одной из них является наличие вертикальных неоднородностей, связанное с увеличением удельного веса прогнозных определений и концентрацией прогнозируемости сильных землетрясений при $\alpha = 1$ и $\alpha = 2$. Эти неоднородности обусловлены особенностями алгоритма, используемого в поиске оптимального соответствия между фактическими данными и решениями уравнения (2). В частности, для уменьшения вероятности ошибок переполнения в окрестностях критических точек ($\alpha = 1$ и $\alpha = 2$), решения, полученные в оптимизационном поиске и мало отличающиеся от решений при $\alpha = 1$ или $\alpha = 2$ (менее 1% по бикоординатному отклонению) заменяются на последние. Тем самым прогнозные определения при $\alpha = 1$ или $\alpha = 2$ получают преимущество для обнаружения на самой ранней стадии среди плохо выраженных последовательностей и, соответственно, получают более высокий прогнозный вес и относительную концентрацию прогнозируемости. Хотя появление этих неоднородностей и обусловлено

³ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

особенностями используемого алгоритма, полученные на их основе прогнозные определения вполне объективны. Поэтому относить данные неоднородности к артефактам было бы не вполне корректно.

Важнейшее теоретическое и практическое значение имеет вторая группа неоднородностей – наклонные, практически линейные и параллельные друг другу, чередующиеся между собой зоны повышения и понижения удельного веса. Сам факт наклонной линейности свидетельствует о существующей для потока сейсмической энергии взаимосвязи между параметрами уравнения ДСПП: $\lg|k| = C_1 \times \alpha + C_2$, где C_1 и C_2 – константы линейности. Эта взаимосвязь нуждается в дополнительном изучении и может быть полезна для дальнейшего развития уравнения ДСПП. В свою очередь чередующиеся зоны повышения и понижения удельного веса прогнозных определений отражают цикличность потока сейсмической энергии: наклонные линейные зоны повышенного удельного веса, расположенные правее и выше, характеризуют прогнозируемость кратковременных и быстропротекающих циклов в потоке сейсмической энергии, тогда как расположенные левее и ниже соответствуют прогнозируемости медленно развивающихся и наиболее масштабных по параметру и времени циклов потока сейсмической энергии.

В сторону наиболее масштабных циклов потока сейсмической энергии смещена и область прогнозируемости сильных землетрясений. При этом прогнозируемость наиболее сильных ($M \geq 8.0$) ориентирована более круто по отношению к наклонным неоднородностям в распределении удельного веса прогнозных определений и формирует концентрации прогнозируемости на нескольких уровнях цикличности, что, скорее всего, и обуславливает для землетрясений этого уровня наличие нескольких максимумов в распределении прогнозных определений по заблаговременности.

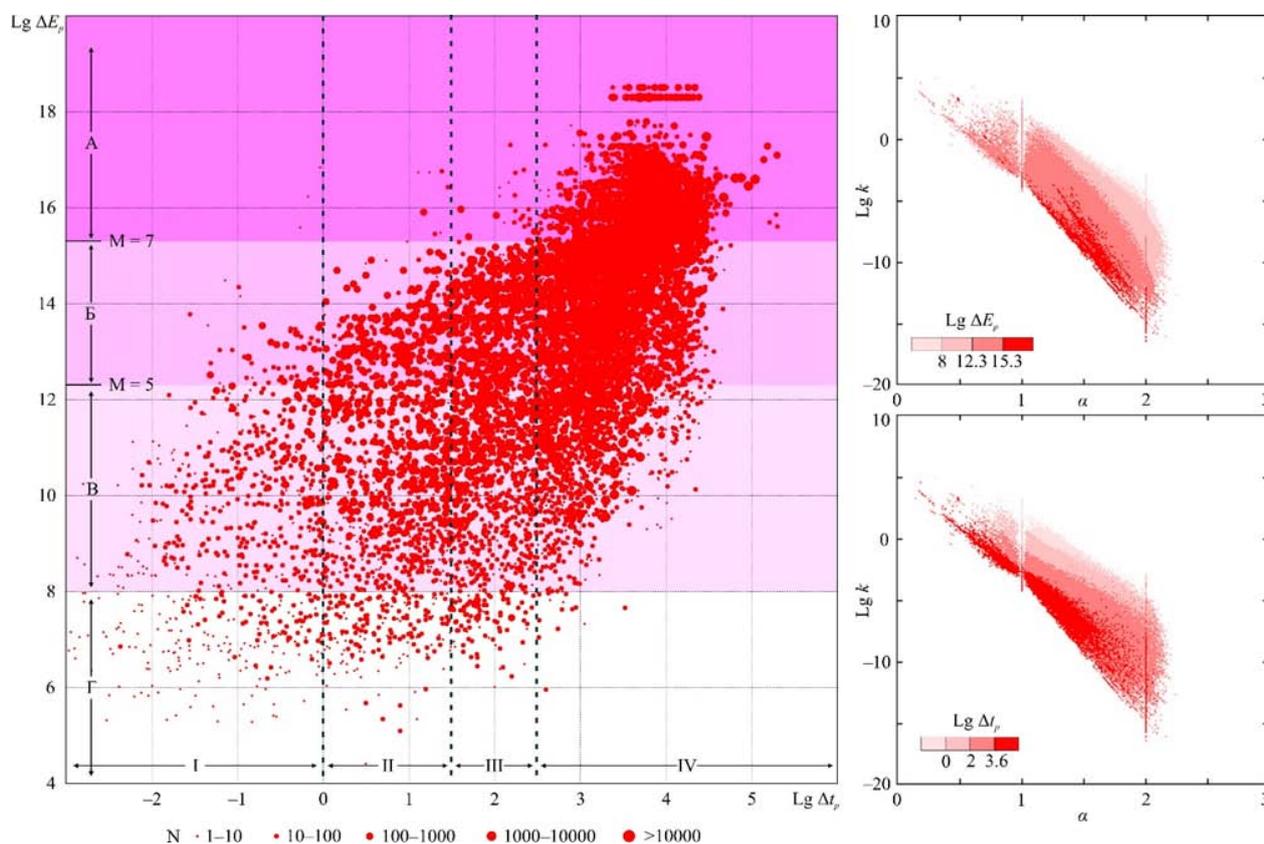


Рис. 2. Прогнозный потенциал уравнения ДСПП по энергии ΔE_p и времени Δt_p при активизации потока сейсмической энергии.

На диаграмме соотношения прогнозных потенциалов $\lg \Delta t_p - \lg \Delta E_p$ (слева) размер фигуративных точек зависит от числа прогнозных определений N , использовавшихся при расчете. На диаграммах справа показано распределение прогнозного потенциала по энергии ΔE_p (вверху) и времени Δt_p (внизу) в координатах $\alpha - \lg|k|$ параметров уравнения ДСПП. Пояснения – см. текст

Приуроченность наиболее масштабных по параметру и времени циклов потока сейсмической энергии к левой нижней части диаграммы $\alpha - \lg|k|$ подтверждается при анализе прогнозного потенциала: именно в этой части диаграммы находятся максимумы прогнозного потенциала и по энергии ΔE_p , и по времени Δt_p как для активизации (рис. 2), так и для затухания. Диаграммы $\lg \Delta t_p - \lg \Delta E_p$ для активизации (см. рис. 2, слева) наглядно иллюстрируют перспективы практического

использования уравнения ДСПП для прогноза потока сейсмической энергии. В частности, шкала интервалов прогноза по энергии (ось ординат) на этих диаграммах охватывает весь спектр наблюдаемых сейсмических процессов: А – область особо сильных землетрясений ($M \geq 7.0$), Б – область умеренно сильных землетрясений ($M = 5.0-6.9$), В – область слабой сейсмической и вулканосейсмической активности ($\lg \Delta E_p = 8-12.3$), Г – область особо слабой сейсмической активности, прогноз которой может иметь значение только для важных техногенных объектов. Соответственно, на шкале прогнозного потенциала по времени можно выделить 4 диапазона: I – с прогнозированием менее суток, в которой прогноз возможен только в перспективе и на аппаратном уровне, II – краткосрочного прогноза (от 1 суток до 1 месяца), III – среднесрочного прогнозирования (от 1 месяца до 1 года), IV – долгосрочного прогнозирования на период более 1 года. Наибольший практический интерес представляет область А-IV, подтверждающая перспективы использования уравнения ДСПП для долгосрочного количественного прогноза наиболее сильных землетрясений.

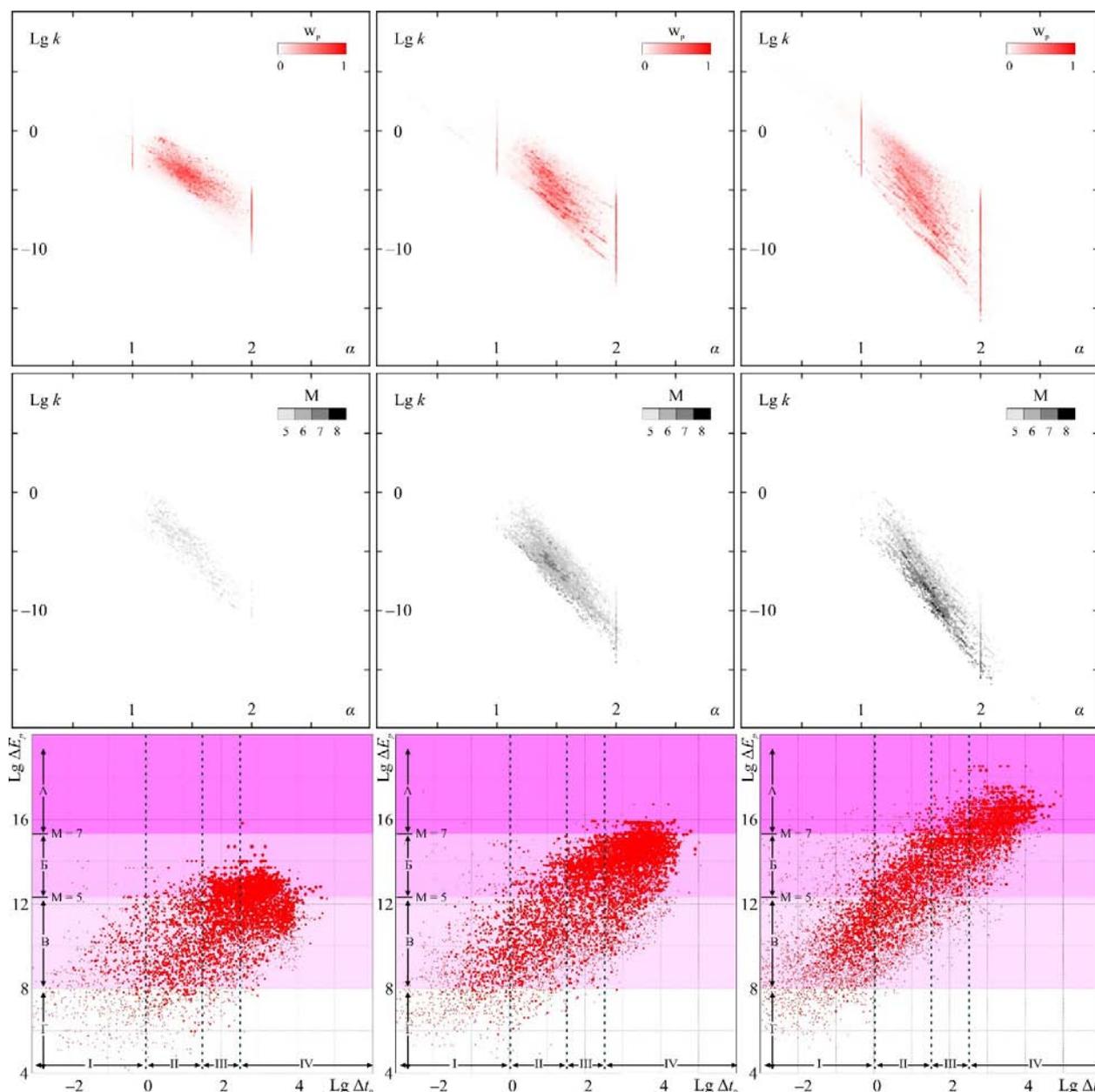


Рис. 3. Зависимость распределений удельного веса прогнозных определений (вверху), прогнозируемости сильных землетрясений (в центре) и прогнозного потенциала (внизу) от гипоцентральных радиусов выборок (левый столбец – 1.5 км, центральный – 15 км, правый – 150 км) для активизации потока сейсмической энергии

Распределения удельного веса прогнозных определений, прогнозируемости сильных землетрясений и прогнозного потенциала уравнения ДСПП существенно зависят от гипоцентрального радиуса выборок (рис. 3), в пределах которых анализируется прогнозируемость

потока сейсмической энергии. Поэтому корректную отбраковку малозначимых и неперспективных прогнозных определений необходимо выполнять, используя результаты статистической обработки в выборках соответствующего гипоцентрального радиуса. Простейший фильтр для подобной отбраковки – использование прогнозных определений из той части области параметров уравнения ДСПП, которая обеспечивает 3σ (99.73%) от распределения суммарного удельного веса прогнозных определений. Эта область полностью включает прогнозируемость землетрясений $M \geq 7.0$. Однако для землетрясений $M = 5.0–6.9$ небольшая часть определений с прогнозируемостью оказывается за пределами области 3σ , что обусловлено очень редко встречающимися определениями с прогнозируемостью на левой нижней кромке их распределения в поле диаграммы $\alpha - \lg|k|$. Для активизации потока сейсмической энергии потери определений с прогнозируемостью сильных землетрясений составляют всего $\sim 0.02\%$ от их общего числа. Для исключения потерь при фильтрации прогнозных определений предполагается использовать область $3\sigma+$, которая представляет собой область 3σ суммарного удельного веса прогнозных определений, дополненную всеми зарегистрированными сочетаниями $\alpha - \lg|k|$, в которых отмечена прогнозируемость сильных землетрясений за пределами области 3σ . при дальнейшей отбраковке прогнозных определений уже в пределах области $3\sigma+$ применимо простое правило: из всех доступных прогнозных определений необходимо отдавать предпочтение тем, у которых значения параметров уравнения ДСПП находятся в наиболее левой и нижней части диаграммы или, что то же самое, которые обладают наибольшим прогнозным потенциалом. Это позволяет выявлять главные тренды потока сейсмической энергии и прогнозировать их развитие, отбраковывая осложняющие тенденции мелких масштабов. При работе на прогноз сильных землетрясений область $3\sigma+$ можно сократить до области прогнозируемости землетрясений соответствующего уровня ($M5+ - M8+$, см рис. 1).

Заключение

Выявленная в распределении плотности веса прогнозных определений по сочетаниям значений параметров уравнения ДСПП область $3\sigma+$ позволяет работать с прогнозируемостью потока сейсмической энергии любого уровня – от самых сильных землетрясений до слабой сейсмичности. В пределах этой области предпочтение отдается тем определениям, у которых значения параметров уравнения ДСПП соответствуют наибольшим прогнозным потенциалам. Это позволяет выявлять главные тренды потока сейсмической энергии и прогнозировать их развитие, отбраковывая осложняющие тенденции мелких масштабов. Область прогнозируемости сильных землетрясений соответствует значениям параметров уравнения ДСПП, обладающих наибольшим прогнозным потенциалом. При этом прогнозируемость наиболее сильных ($M \geq 8.0$) землетрясений формирует концентрации на нескольких уровнях цикличности, что обуславливает для землетрясений этого уровня наличие нескольких максимумов в распределении прогнозных определений по заблаговременности. Максимумы прогнозируемости сильных землетрясений приурочены к средне- и долгосрочным диапазонам заблаговременности, отмечается общая тенденция к смещению максимума прогнозируемости в сторону большей заблаговременности для более сильных землетрясений. Перспективы уравнения ДСПП в средне- и долгосрочном прогнозировании сильных землетрясений подтверждены расчетами прогнозного потенциала этого уравнения.

Список литературы

1. Мальшев А.И. Динамика саморазвивающихся процессов // Вулканология и сейсмология. 1991. № 4. С. 61–72.
2. Мальшев А.И. Закономерности нелинейного развития сейсмического процесса. Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2005. 111 с.
3. Мальшев А.И. Оценка прогнозируемости сейсмического потока на примере извержения вулкана Шивелуч 1964 г. // Вулканология и сейсмология. 2016. № 6. С. 22–36.
4. Мальшев А.И. Прогнозируемость сейсмического потока вулкана Шивелуч // Вулканология и сейсмология. 2018. № 2. С. 30–39.
5. Мальшев А.И. Прогнозируемость сейсмического потока вулкана Безымянный // Вулканология и сейсмология. 2018. № 3. С. 46–63.
6. Мальшев А.И. Прогнозируемость сейсмического потока и сильных землетрясений Камчатки в 1962–2014 г. // Вулканология и сейсмология. 2019. № 1. С. 52–66.
7. Мальшев А.И., Мальшева Л.К. Прогнозируемость потока сейсмической энергии северо-западного обрамления Тихого океана по данным каталога USGS // Геосистемы переходных зон. 2018. Т. 2. № 3. С. 141–153.
8. Kanamori H. The Energy Release in Great Earthquakes // JGR. 1977. V. 82. No 20. P. 2981–2987.