

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АНАЛИЗА ВРЕМЕННОГО РЯДА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ ДЛЯ ИХ ПРЕДСКАЗАНИЯ

**Дубянский М.А.**

*Всероссийский научно-исследовательский институт сахарной свеклы и сахара  
им. А.Л.Мазлумова, Воронеж, art\_pmd@sani-c.ru*

### **Введение**

В настоящее время существуют десятки заслуживающих внимания перспективных выходов к прогнозу землетрясений, основанных на вариациях сейсмических, геофизических, флюидных, геодезических и других факторов [4]. Однако эти выходы не обеспечивают пока оперативного прогноза с удовлетворительной точностью и оптимальной заблаговременностью.

Предлагаемый нами способ прогнозирования сильных землетрясений ( $\geq 5.8M_w$ ) основан на использовании временных рядов объекта прогноза.

Временные ряды, т.е. ряды чисел, отражающие развитие явления во времени, вместе с вариантами их преобразования содержат значительную информацию о развитии природных процессов в будущем.

Особенно продуктивно использование временных рядов эндогенных процессов в сложных вероятностных системах, поскольку такие ряды отражают в себе всю совокупность взаимодействий факторов, включая и устойчивые элементы детерминации в отдельных подсистемах [3].

Автору удалось показать высокую информативность временных рядов при прогнозировании солнечной активности, циркуляции чумного микроба, численности особей в изолированных популяциях животных [2].

### **Методика исследований**

Наиболее информативные результаты дало нам изучение отклонений вариантов временного ряда сейсмической активности от его центральной тенденции. В качестве показателя сейсмической активности нами избран энергетический класс землетрясения ( $K$ -индекс), мерой центральной тенденции временного ряда назначили выборочную среднюю арифметическую. Отклонения от центральной тенденции измеряли абсолютными показателями с учетом направления вариаций.

Таким образом, для любого интервала временного ряда абсолютное отклонение от уровня центральной тенденции можно определить по формуле:

$$ПН = \sum_{i=1}^n x_i - \tilde{X}_n;$$

где  $\sum x_i$  - сумма  $K$ -индексов землетрясений за интервал времени,  $\tilde{X}$  - выборочная средняя арифметическая,  $n$  - число землетрясений в интервале времени,  $ПН$  - отклонение суммы  $K$ -индексов от уровня центральной тенденции.

Показатель  $ПН$  отражает, очевидно, степень неуравновешенности системы. Мы допускаем, что синонимом "неуравновешенности" может быть "возмущенность". В дальнейшем мы употребляем оба этих термина.

Приведенный расчет может быть употреблен для прогноза при двух дополнительных условиях: интервал, для которого ведут расчет, должен быть соизмерим с длительностью сейсмических неуравновешенностей, т.е. - промежутков временного ряда с увеличенными показателями неуравновешенности ( $ПН$ ); расчет же для конкретизации прогноза должен быть привязан к определенному участку территории сейсмогена, где наблюдают неуравновешенность. Оба условия зависят от свойств сейсмогена или его части, где ведется прогнозирование. Например, на Камчатке неуравновешенности бывают краткосрочными (1 - 2 мес.), среднесрочными (8 - 12 мес.) и долгосрочными (13 - 15 мес.). Понятно, что месячный интервал временного ряда для этого региона наиболее оптимален. В этом же регионе при любой длительности неуравновешенности показатели последней хорошо локализируются в пределах площади одного географического градуса. Поэтому становится возможной привязка расчетов и

прогноза к названной формализованной единице территории. Все обозначенные условия соблюдены при составлении таблицы 1, где представлены преобразованные из исходных рядов  $K$ -индексов временные ряды месячных показателей неуравновешенности (ПН).

Таблица 1. Сильные землетрясения и показатель сейсмической неуравновешенности (возмущенности) системы на отдельных участках п-ова Камчатки.

1	2	3	4																							
			Месяцы 2001 – 2006 годов																							
№	Шифр участка	Показатели	я ф м а м и и а с о н д												я ф м а м и и а с о н д											
			1	54-159	з п	(-1	1	4	1	1	1	2	5	4	3	8	2	5	4	6	4	4	2	2	6	3
2	52-160	з п																								
3	55-161	з п	4	1	8	10	6	4	2	0	9	0	18	(3	10	3	6	3	5	12	3	6	7	3	4	4)
4	55-163	з п	0	1	0	3	1	2	24																	
5	56-164	з п	0	0	8	0	0	0	0	22	1	0	2	1	2	1	0	(0	4	5	1	1	1	0	1	2
6	55-165	з п	1	1	1	4	2	2	7	0	5	2	1	1)	(1	1	5	6	4	1	0	0	0	(0	4	1

1	2	3	4																							
			Месяцы 2001 – 2006 годов																							
№	Шифр участка	Показатели	я ф м а м и и а с о н д												я ф м а м и и а с о н д											
			1	54-159	з п	5	4	(1	2	5	2	2	7	8	0	4	6	10	0	7	3	-8	5	2	0	2
2	52-160	з п	1)	(-4		5	3	-6	3	-7	3	-18	5	-3	-17	7	6	-1	-6	-6	0	-6	(10	4	4	3
3	55-161	з п	3	10	6	7	1								3	2	7	3	0							
4	55-163	з п	-1)	(0	5	6	8	4	12	9	9	3	4	6	120	24	12									
5	56-164	з п	2	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	2	-1)	(-1	0	0	-1	-1	2	4	1	2	0	0
6	55-165	з п	8	4	5	3	8	2	19	10	8	1	2		22	1	5	0)	(0	0	2	1	3	1	0	0

1	2	3	4																												
			Месяцы 2001 – 2006 годов																												
№	Шифр участка	Показатели	я ф м а м и и а с о н д												я ф м а м и и а с о н д																
			1	54-159	з п	5	2	6	0	4	2	4	5	4	20	15	10	8	17	3	2										
2	52-160	з п	-10	6	-10	-15	-18	-8							(9	6	-1	-13	-1	2	-10	0	-16	-6	-4	-8	8	-8	2	-2)	(33
3	55-161	з п	10	2	1	3	2	1	-1	-9	(0	1	2	7	8	8	2	-6	5	3	5										
4	55-163	з п	5	0	8	6	13	4	7	7	2	3	3	3	2	3	10	-2	1	9	0)	(0	1	12	6	5					
5	56-164	з п	1	0	0	1	-1	0	1	2	2	6	2	6	0	33	9														
6	55-165	з п	0	0)	(0	2	8	0	2	7	2	2	4	4	1	13	0	3	2	5	1	0)	(1	2	2	0					

Примечание: В скобках – отдельные квазициклы; укрупненными цифрами отмечены максимумы квазициклов; шифр участка – географические градусы, по которым проходят южная и западная границы участка. В рамке – землетрясение и его сила по шкале Рихтера

В основе преобразования исходных рядов  $K$ -индексов лежат два приема: укрупнение интервалов и сглаживание – приемы, направленные на устранение случайной компоненты и выявление скрытой цикличности. В результате в преобразованных рядах довольно отчетливо проявилась ритмичность колебаний частоты отклонений  $K$ -индексов от выборочной средней. Другими словами, проявились квазициклы сейсмической неуравновешенности (табл. 1).

Месячный показатель неуравновешенности ( $ПН$ ) удобен тем, что автоматически показывает общую неуравновешенность любого участка подконтрольной территории и, кроме того, сообщает сведения комбинаторного характера об особенностях распределения неуравновешенности по месяцам. Нами замечено, что наиболее информативно предвещает сильное землетрясение случай, когда высокие показатели неуравновешенности следуют без перерыва в течение трех месяцев и более. Напротив, вклинивание минимальных показателей или чередование последних, различных по направлению, снижает вероятность сильного землетрясения.

Исходя из изложенного, для каждого квазицикла неуравновешенности во временном ряду мы приняли в качестве предвестника сейсмической ситуации наибольшую сумму показателей неуравновешенности за три смежных месяца (табл. 1). Эта формализованная единица (максимум квазицикла) употреблена для сравнений, статистических расчетов и прогноза сильных землетрясений или их невозможности.

Для осуществления нашего прогноза необходима непрерывная регистрация всех землетрясений, начиная с 4-5 энергетического класса. Поэтому полигоном для наших исследований послужили центральная и южная части п-ова Камчатки ( $50^{\circ}$ - $56^{\circ}N$ ) с прилегающими акваториями. Данные исходных измерений  $K$ -индекса мы получили из сети Интернет.

### Обсуждение результатов

В таблице представлены данные по шести участкам, на которых в 2001 – 2006 гг. произошли наиболее сильные и частые землетрясения. Проанализируем представленные временные ряды.

Во временных рядах показателя сейсмической неуравновешенности ( $ПН$ ) ритмичность выражена неодинаково. На некоторых участках (54-159, 56-164), в течение ряда лет ритмы едва различимы, на других участках (52-160, 55-161) мы наблюдаем выраженную квазицикличность (табл.1). Можно сказать, что выраженность ритмичности зависит от величины показателя неуравновешенности: возрастает величина показателя – отчетливее проявляется ритмичность. Отсюда возникает предположение, что в сложных динамических системах, элементом которых являются землетрясения [5] неуравновешенность временного ряда сопровождается возникновением ритмичности.

Сильные землетрясения также приурочены к отрезкам временных рядов с выраженной ритмичностью. Как видно (табл. 1) мощные подземные толчки привязаны к хорошо выраженным квазициклам, причем значение имеет не только выраженность квазициклов, но и их величина. Последнее нуждается в статистическом подтверждении.

Для удобства суждения вынесем из таблицы 1 максимумы всех квазициклов (ритмов), предварительно заменив трехмесячные показатели их суммами. Образует общий упорядоченный ряд максимумов, разделив его на две выборки. К первой выборке (левая), отнесем максимумы, после которых состоялись сильные землетрясения, к другой выборке (правая) – максимумы квазициклов, после которых сильных землетрясений не было:

156, 46, 45, 43, 42, 38, 37, 27, 25, 23, 23,  
27, 26 24, 22, 22, 21, 20, 18, 17, 15, 13, 11, 10, 6.

Представленный ряд информирует о степени пересечения выборок и легко трансформируется в алгоритмы нескольких критериев статистики. Отметим критерии и результаты, наиболее значимые в нашем вопросе. Критерий  $U$  удостоверяет превосходство первой выборки по величине средней тенденции ( $Pu < 0.001$ ). Критерий  $X^2$  позволяет сделать вывод о том, что между величиной максимума квазицикла и фактом сильного землетрясения имеется надежная статистическая зависимость ( $Px^2 < 0.001$ ). Критерий  $K$  оценивает корреляцию между предиктором и объектом прогноза ( $K = 0.814$ ). Корректно предположить, что регистрация всех

сильных отклонений  $K$ -индекса от центральной тенденции по предлагаемой методике обещает гарантированное предсказание всех сильных землетрясений на подконтрольной территории. Величина коэффициента корреляции допускает ошибочные прогнозы, но, судя по характеру пересечения изученных выборок, это должны быть преимущественно "ложные тревоги".

Действительно, применяя к данному общему упорядоченному ряду секвенциальный анализ [1], можно убедиться, что члены ряда, предвещающие сильное землетрясение, в полтора раза информативнее членов, предвещающих отсутствие сильного землетрясения. Отсюда – тенденция к преобладанию среди ошибочных прогнозов ошибок второго рода, т.е. "ложных тревог".

Предсказание места землетрясения, с нашей точки зрения, обещает быть удовлетворительным. По полученным результатам, в семи случаях из одиннадцати эпицентры предсказанных по ретроспективному прогнозу землетрясений были в границах назначенных участков, в четырех случаях эпицентры отклонялись от назначенных участков (55-161, 55-163) на 0.05; 0.17; 0.18; 0.33 градуса. Такие отклонения всегда можно предвидеть, по расположению относительно границ участка сгущений эпицентров землетрясений, генерирующих показатель неуравновешенности.

Интервал времени, в котором должно произойти предсказанное землетрясение в среднем составляет 3.5 месяца. Это средняя продолжительность нисходящей ветви квазицикла. Так как выраженность квазициклическости различна (табл. 1), и также различна, как уже отмечалось, длительность возмущенности участков, возникают разные варианты отсчета времени от предиктора до события.

Большие по продолжительности (13 – 15 мес.) и по показателю неуравновешенности возмущения (табл. 1) образуют хорошо выраженные квазициклические колебания с одной вершиной (уч. 55-163). Такая разновидность возмущений предвещает малый срок упреждения землетрясения (0.5 – 2 мес.). Обычно, чем больше максимум квазицикла, тем меньше упреждение, и тем значительнее явление афтершока. Встречаются случаи (уч. 52-160, табл. 1) сближения квазициклов, максимумы которых разделены одним – тремя месяцами. Такие образования мы считаем за один сдвоенный квазицикл.

Средние по продолжительности (8 – 12 мес.) и по показателю неуравновешенности возмущения возникают при хорошо выраженной ритмичности. Землетрясение происходит в конце цикла на его стыке со следующим циклом. Промежуток времени от максимума квазицикла до землетрясения достигает 6 – 7 месяцев.

Краткосрочные (1 – 2 мес.) возмущения возникают на фоне слабо выраженной ритмичности при небольших показателях неуравновешенности системы. Обычно такие возмущения предвещают умеренные по силе землетрясения ( $4.6 - 5.6 M_w$ ) со сроком упреждения 4 – 5 мес. Часто такие возмущения предваряют следующие более значимые (табл. 1). В таком случае они утрачивают роль предвестника.

С января 2007 г. нами производится (при наблюдении и консультациях со стороны РЭС) пробный оперативный прогноз землетрясений для центральной и южной частей п-ова Камчатка ( $50^\circ - 56^\circ N$ ) с прилегающими акваториями.

Для детализации прогноза ввели следующие градации участков: 1) спокойные, где не предвидят землетрясения  $> 4.5 M_w$ ; 2) возмущенные, где предвидят землетрясения  $\geq 4.6 M_w$ . Для возмущенных участков введены еще две градации: а) умеренно опасные, где не ожидают землетрясения более  $5.7 M_w$ , б) особо опасные, где ожидают землетрясения  $\geq 5.8 M_w$ .

Всего под наблюдением находились ежемесячно 46 участков, на которых регистрировали любые подземные толчки. Помесячно по принципу мониторинга мы анализировали сейсмическую ситуацию на каждом участке и заблаговременно сообщали результаты для регистрации.

Для второй половины 2006 г. оказались характерными малые значения  $PH$  и слабовыраженные квазициклы. Из 46 подконтрольных участков возмущенными были только 6, причем возмущения в большинстве случаев были краткосрочными (табл. 2). Это дало нам основание прогнозировать понижение сейсмической активности в первой половине 2007 г.

На четырех участках из числа возмущенных произошли землетрясения  $\geq 4.6 M_w$ , два прогноза оказались ошибочными (табл. 2). С учетом сбывшихся прогнозов на 40 спокойных участках, где землетрясений  $\geq 4.6 M_w$  не было, прогноз на первое полугодие 2007 г. в целом можно считать удовлетворительным. Во втором полугодии 2007 г., осенью и зимой, следует ожидать некоторого осложнения сейсмической обстановки у южной оконечности Камчатки (уч. 50-157), в акватории Авачинского залива (уч. 52-159), а так же – вдоль  $55^\circ N$  на промежутке от  $160^\circ E$  до

165°E. Здесь, на побережье и в акватории Камчатского залива в сентябре - декабре 2007 г. можно ожидать землетрясения из разряда сильных ( $\geq 5.8 M_w$ ). Показатели возмущенности и сроки упреждения землетрясений по участкам представлены в таблице 2.

Таблица 2. Временные ряды показателя неуравновешенности (ПН) в 2006 – 2007 гг. на возмущенных участках.

№	Шифр участка	Показатели	Годы, месяцы																				
			2006						2007														
			и	а	с	о	н	д	я	ф	м	а	м	и	и	а	с	о	н	д			
1	51-159	з п																					
			14	3	<b>31</b>	6	0	4	1	0	0	2	1	1	0								
2	51-158	з п																					
			3	<b>29</b>	2	<b>10</b>	<b>10</b>	<b>9</b>	0	6	6	5	<b>6.1</b>	11	4								
3	52-160	з п																					
			-8	8	-8	2	-2	<b>33</b>	0	2	6	12	<b>5.0</b>	-9	-2								
4	53-160	з п																					
			11	4	-4	-2	8	<b>23</b>	-3	-1	5	8	<b>4.7</b>	-9	10								
5	54-161	з п																					
			15	7	4	1	4	<b>29</b>	4	0			<b>5.7</b>	<b>4.7</b>	10	13	4						
6	50-157	з п																					
			11	7	9	9	6	12	2)	<b>(16</b>	<b>16</b>	<b>18</b>	7	14	15								
7	52-159	з п																					
			-16	-7	-7	-13	-3)	(-25	-11	-18	<b>-13</b>	<b>-21</b>	<b>-21</b>	-9	-11	+	+	+	+				
8	54-162	з п																					
			18	0	4	-1	8	1)	(4	4	4	-6	<b>16</b>	<b>48</b>	<b>0</b>	+	+	+	+	+	+	+	
9	54-163	з п																					
			14	4	8	1	1	2	0)	(9	3	1	<b>11</b>	<b>29</b>	<b>2</b>	+	+	+	+	+	+	+	
10	55-161	з п																					
			5	3	-3	-4)	(2	1	3	10	<b>11</b>	<b>4</b>	<b>18</b>	5	9	+	+	+	+	+	+	+	
11	55-162	з п																					
			17	8	-1	6	5	2	-3)	(4	<b>53</b>	<b>26</b>	<b>29</b>	21	3	+	+	+	+	+	+	+	
12	55-163	з п																					
			0	0	0	<b>12</b>	<b>6</b>	<b>5</b>	1	6	4	4)	<b>(7</b>	<b>35</b>	<b>1</b>	+	+	+	+	+	+	+	

Примечание. Крестиками обозначены интервальные сроки предсказанных землетрясений. Остальные обозначения те же, что и в табл. 1.

### Заключение

Информативность одного фактора не может удовлетворить все требования к прогнозированию такого процесса, как землетрясения. Поэтому остаются неустранимыми ошибки второго рода – "ложные тревоги", недостаточная четкость пороговых значений предвестника и др.

Использование нового предвестника в монофакторной прогностической модели имеет целью, прежде всего, испытать его в качестве осведомительного сигнала о предстоящем сильном землетрясении. Высокая информативность относительно наступления события и легкость применения для мониторинга позволяет рассчитывать на некоторую исключительность представленного предвестника в данном направлении.

### Список литературы

1. Гублер Е.В., Генкин А.А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: Медицина, Ленинградское отделение, 1973. 141 с.
2. Дубянский М.А. Эмпирический анализ природных циклических процессов в связи с пятнообразовательной деятельностью Солнца // Матер. 20(29) заседания рабочей группы проекта №8б "Вид и его продуктивность в ареале" программы ЮНЕСКО "Человек и биосфера". Вильнюс, 1990. С. 14–22.
3. Дубянский М.А. Анализ долговременных наблюдений за результатами игр лото / Вестник факультета прикладной математики и механики. Вып.4. Воронеж: ВГУ, 2003. С. 152 – 163.
4. Курские А.К. Проблемы прогнозирования землетрясений. Алма-Ата: Наука, 1990. 264 с.
5. Шебакин П.Н. Цепочки эпицентров как индикатор возрастания радиуса корреляции сейсмичности перед сильными землетрясениями // Вулканология и сейсмология. 2005. №1. С. 3–15.