

Применение методов математической статистики к анализу предвестников землетрясений, возможных для наблюдения из космоса

В.В. Платонов, И.А. Зубков, Ю.А. Полушковский, В.О. Скрипачёв,
А.В. Тертышников

ФГУП «Центр космических наблюдений»
Email: sonm@cpi.space.ru

Введение

Несколько десятков лет назад сейсмологи оптимистично полагали, что проблема прогноза сейсмических условий (землетрясений) будет решена в ближайшее время. Проблема точности прогноза обычно связывалась с созданием необходимой плотности сети наземных станций наблюдения, а также с тесным сотрудничеством наземного и космического сегментов прогноза землетрясений [1].

За прошедшие годы исследований стала понятной сложность мониторинга сеймотектонических аномалий на основе наблюдений за морфологией сейсмогенных возмущений геофизических полей, классификация которых представлена на рис. 1.

При этом было разработано множество способов прогнозирования землетрясений, некоторые характеристики которых представлены в табл. 1. Знак «+» в таблице означает наличие или учет параметра, обозначение «-/+» означает скорее отрицательный результат исследований.

Одним из выводов, следующих из представленной классификации (табл. 1), является необходимость активного использования спектрального анализа данных при выявлении сейсмогенных эффектов, замаскированных на фоне естественных шумов.

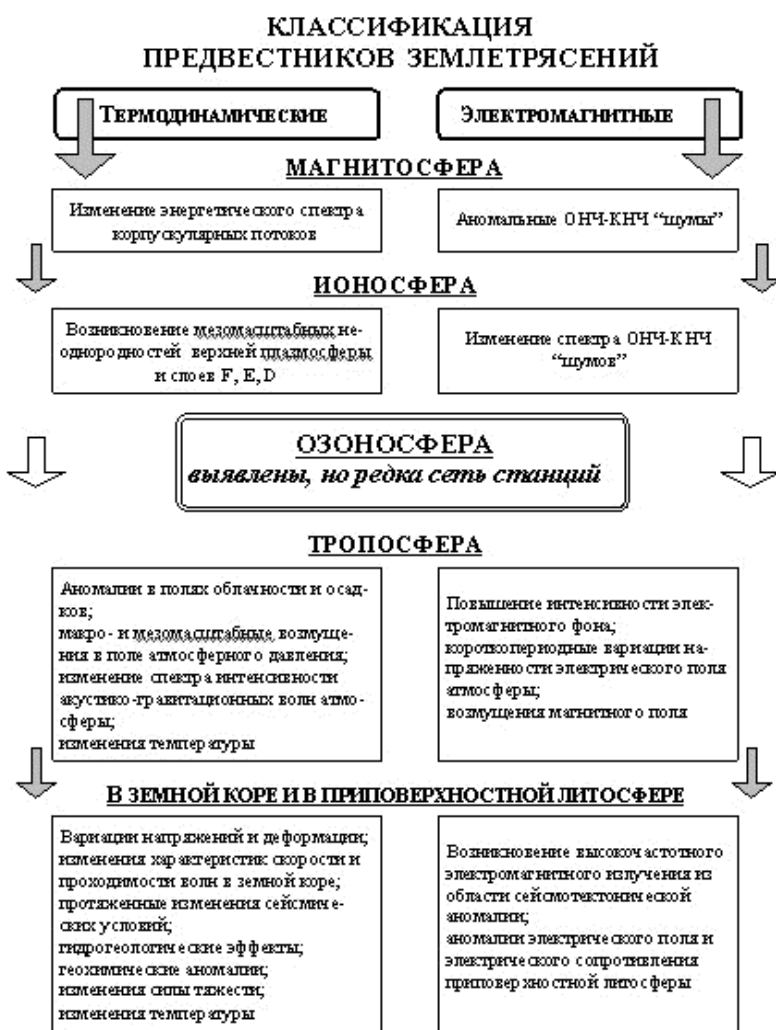


Рис. 1. Классификация предвестников землетрясений

В Российской Федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (ФССН и ПЗ) могут активно использоваться данные космического сегмента мониторинга окружающей среды. При этом для диагностики предвестников сейсмической активности (сильных землетрясений) необходим выбор оптимального состава бортовой научной аппаратуры космических аппаратов ДЗЗ (дистанционного зондирования земли). Для этого необходим анализ перспектив мониторинга краткосрочных предвестников сильной сейсмической активности с КА (космических аппаратов).

Таблица 1. Классификация известных способов краткосрочного прогнозирования сейсмической активности

Тип используемых характеристик	Оценка коэффициента корреляции с землетрясением / заблаговременность	ХАРАКТЕР НАБЛЮДЕНИЙ				АНАЛИЗИРУЕМАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА		Учет модели землетрясения	Учет солнечных эффектов
		в точке	по траверсу	по полю	регулярность	амплитуда (А) и dA	спектр вариаций		
ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ	~ 0,2 / до нескольких недель	+	-/+	-/+	-	+	-/+	-/+	-
СЕЙСМИЧЕСКИЕ	до 0,8 / месяцы	+	+	-	-	+	+	-/+	-
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ	До 0,35 / несколько суток – часы	+	-/+	-/+	-/+	+	+	-	-/+
ГРАВИТАЦИОННЫЕ	До ~ 0,5 / месяцы – несколько суток	+	-	-	-	+	-/+	-	-
ГЕОТЕРМИЧЕСКИЕ	~ 0,2 / месяцы - несколько недель	+	-	-/+	-	+	-	-	-
ДЕФОРМАЦИОННЫЕ	~ 0,3 / месяцы	+	+	-	-	+	-	-/+	-
АКУСТИЧЕСКИЕ	~ 0,2 / часы	+	-	-	-	+	-/+	-	-
Потоки энергичных частиц	~ до 0,7 / часы	-	+	-	-	+	-/+	-	+
АСТРОНОМИЧЕСКИЕ	<0,1 / недели	+	+	-	+	+	-	-	+
КОМПЛЕКСНЫЕ	До ~ 0,5 / несколько суток – часы	+	+	-	-	-	-	-	-/+
МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ	~ до 0,5 / несколько суток – часы	+	+	-	+	+	+	-/+	+

Одним из выводов, следующих из представленной классификации, является необходимость активного использования спектрального анализа данных при выявлении сейсмогенных эффектов, замаскированных на фоне естественных шумов.

В российской Федеральной системе сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений (ФССН и ПЗ) могут активно использоваться данные космического сегмента системы мониторинга окружающей среды. При этом для диагностики предвестников сейсмической активности (сильных землетрясений) необходим выбор оптимального состава бортовой научной аппаратуры космических аппаратов дистанционного зондирования земли (ДЗЗ). Для этого необходим анализ перспектив мониторинга краткосрочных предвестников сильной сейсмической активности с космических аппаратов (КА).

Методика анализа перспективности наблюдений из космоса предвестников сейсмической активности

В сложных системах, к которым относятся сеймотектонические аномалии, количество предвестников сильной сейсмической активности может измеряться десятками. Для мониторинга сейсмических условий необходимо выбрать среди них наиболее информативные и перспективные для дальнейшего использования в системе мониторинга сейсмической опасности.

Вероятность появления хотя бы одного из известных к настоящему времени предвестников не равна единице. Поэтому для анализа неполной группы предвестников при ограниченных архивах можно использовать факторный анализ публикаций об известных краткосрочных предвестниках сильной (с магнитудой $M > 5$) сейсмической активности, а также экспертные оценки.

Каждую группу предвестников целесообразно оценивать по критериям:

- физическая обоснованность;
- возможность регистрации;
- проявляемость.

Для ранжирования предвестников сейсмической активности могут использоваться разные методы. Например, метод парного сравнения, с помощью которого можно получить наиболее точное отражение субъективных предпочтений. При этом на выбор налагается гораздо меньше ограничений, чем при других видах экспертного оценивания.

В методе парных сравнений делается выбор из двух альтернатив, то есть решается задача, уровень неопределенности которой не превышает одного бита. Один бит информации требуется при сравнении только одной пары из n объектов, а сравниваемых пар $\frac{n(n-1)}{2}$. Так как

$\frac{n(n-1)}{2} > \log_2(n!)$, то объем информации, затраченный на решение задачи ранжирования, в сумме превосходит тот, который затрачивается при других способах ее решения.

Для получения парных сравнений объектов $A_i, i = 1, \dots, N$ используется заполнение таблицы, в которой количество строк равно количеству столбцов.

Значение элемента, стоящего на пересечении $i_{\text{ой}}$ строки и $j_{\text{ого}}$ столбца, определяется по формуле:

$$a_{ij} = \begin{cases} 0, & A_i < A_j \\ 1, & A_i \approx A_j \\ 2, & A_i > A_j \end{cases}, \quad (1)$$

На пересечении $i_{\text{ой}}$ строки и $j_{\text{ого}}$ столбца должен стоять 0, если объект с номером i по мнению эксперта менее значим, чем объект с номером j , должна стоять 1 если объекты равнозначны и 2, если вес i объекта превосходит вес объекта j .

Полностью заполненная таблица представляет собой квадратную матрицу A , элементы которой удовлетворяют соотношению $a_{ij} + a_{ji} = 2$. Метод вычисления весовых коэффициентов, в соответствии со значениями которых ранжируются объекты, представляет собой итерационную процедуру:

$$p^t = A \cdot p^{(t-1)}, \quad (2)$$

где p - весовые коэффициенты, $p^0 = (1, 1, \dots, 1)$, t - номер шага итерации.

Чтобы избежать в процессе итерирования получения чрезвычайно больших весовых значений, компоненты вектора p^t на каждом шаге нормируются путем деления на сумму:

$$\lambda^t = \sum_i p_i^t = \sum_i \sum_j a_{ij} p_j^{t-1}. \quad (3)$$

С учетом нормирующего множителя процедура вычисления весовых коэффициентов записывается следующим образом:

$$p^t = \frac{1}{\lambda^t} \cdot A \cdot p^{t-1}. \quad (4)$$

Ее применение приводит к получению весовых коэффициентов p_i в виде относительных величин, так как $\sum_i p_i^t = 1$. Вычислительный процесс продолжается до момента, когда весовые ко-

эффициенты, полученные на двух соседних итерациях, будут незначительно отличаться друг от друга:

Вычислительный процесс продолжается до момента, когда весовые коэффициенты, полученные на двух соседних итерациях, будут незначительно отличаться друг от друга:

$$\max_i |p_i^t - p_i^{t-1}| < \varepsilon, \quad (5)$$

где ε - малое положительное число, задающее точность расчетов (величина ε была выбрана равной 0.005).

Матрица парных сравнений неотрицательна ($a_{ij} \geq 0$ для любых i, j) и неразложима. Среди номеров строк и столбцов нельзя выделить такие подмножества I и J , что $a_{ij} = 0$ для всех $i \in I$ и $j \in J$.

У таких матриц максимальное собственное значение является действительным положительным числом λ , которому отвечает собственный вектор p с положительными компонентами. Причем и собственное число, и собственный вектор получаются в виде предельных значений:

$$\lambda = \lim_{t \rightarrow \infty} \lambda^t, \quad p = \lim_{t \rightarrow \infty} p^t, \quad (6)$$

Оценка компонент вектора приоритетов для каждой группы исследований (физическая обоснованность, возможность регистрации, проявляемость) производилась отдельно.

Анализ адекватности присвоения весовых коэффициентов каждому предвестнику землетрясения, проведенный с помощью метода анализа иерархий, заключается в вычислении отношения согласованности (ОС). Величина ОС должна быть порядка 20% или менее, чтобы быть приемлемой [4]. Величина ОС более 20 % говорит о большой степени рассогласованности начальных данных. При большой степени рассогласованности «веса» предвестников переписываются и процедура расчёта повторяется. Таким образом формируется группа наиболее перспективных предвестников сейсмической активности, возможных для наблюдения с КА ДЗЗ.

Результаты анализа перспективности наблюдения из космоса предвестников сейсмической активности

После анализа публикаций по известным краткосрочным предвестникам сильных ($M > 5$) землетрясений, возможных для наблюдения с КА ДЗЗ, были отобраны основные группы краткосрочных предвестников сильной сейсмической активности (табл. 2).

При этом вопросы исследования с КА сейсмогенных деформаций земной поверхности перед землетрясениями были отнесены к среднесрочным предвестникам землетрясений.

В процедуре оценивания участвовало семь экспертов. Так как мнения экспертов могут быть рассогласованы, то перед формированием групповой оценки был рассчитан ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Данный коэффициент был использован, поскольку результаты экспертного опроса были представимы в ранговой шкале. В дальнейшем во всех расчетах использо-

вались групповые экспертные оценки, являющиеся среднеарифметическими оценками для каждого критерия (физическая обоснованность, возможность регистрации и проявляемость).

С помощью метода парных сравнений была оценена перспективность краткосрочных предвестников сильной сейсмической активности, которые целесообразны для наблюдения средствами бортовой научной аппаратуры КА ДЗЗ. Приемлемая точность расчётов ($\mathcal{E} \leq 0.005$) достигалась за 4 итерации. При расчётах использовались оптимистические и пессимистические оценки. Итоговые результаты среднеарифметических оценок приведены в таблице 2.

Таблица 2. Оценка перспективности исследования предвестников сильной сейсмической активности с космических аппаратов

№ п/п	Характеристика предвестника землетрясения	Итоговая перспективность предвестника
1	Состав аэрозолей и малых газовых составляющих сейсмогенного происхождения	$0,29 \pm 0,02$
2	Вариации параметров ВЧ электромагнитного поля (напряженности и индукции)	$0,28 \pm 0,01$
3	Изменения спектра мощности потока частиц высоких энергий на высоте орбиты КА	$0,27 \pm 0,01$
4	Интенсивность КНЧ-ОНЧ шумов	$0,26 \pm 0,01$
5	Аномальные облачные образования мезо и микро-масштаба	$0,22 \pm 0,03$
6	Вариации электронной и ионной концентрации на высоте орбиты спутника	$0,20 \pm 0,01$
7	Вариации интенсивности ИК-излучения земной поверхности	$0,18 \pm 0,01$
8	Изменения орбитальных характеристик КА, обусловленные сейсмогравитационными эффектами	$0,18 \pm 0,02$
9	Вариации температуры электронов и ионов на высоте орбиты КА	$0,14 \pm 0,01$

Под итоговой перспективностью понимается результирующая среднеарифметическая характеристика, объединяющая физическую обоснованность, возможность регистрации и проявляемость предвестника.

Анализ полученных результатов показал, что наибольшее внимание экспертами было уделено предвестнику «состав аэрозолей и малых газовых составляющих сейсмогенного происхождения». Данный предвестник представляет особый интерес для развития системы космического мониторинга сейсмических условий, учитывая активный интерес в последние годы к лидарной технологии и СВЧ-радиометрам. Так же значительный «вес» получили предвестники, связанные с вариациями параметров высокочастотного (ВЧ) э/м поля и потоками высокоэнергичных частиц, что отчасти объясняется большим количеством публикаций по данным вопросам и физической обоснованностью предвестника. В вопросе аномальных облачных образований эксперты ориентировались на анализ барических градиентов и их влияния на срыв созревших напряжений в земной коре.

Проверка полученных результатов, проведённая методом анализа иерархий, показала, что во всех трёх группах величина согласованности превысила допустимую норму. Это свидетельствует о диспропорции присвоения весовых коэффициентов предвестникам, используемым при расчётах методом парного сравнения. Наиболее хорошая согласованность была в группе «физическая обоснованность». В группе «возможность регистрации» и в группе «проявляемость» степень согласованности была выше.

Для улучшения качественных показателей второй и третьей групп необходима более полная

систематизация экспериментальных данных, проведение экспериментальных исследований сейсмической активности по выбранным перспективным направлениям с более полным анализом физических параметров, возможных для наблюдения средствами КА ДЗЗ.

Для улучшения показателей согласованности была проведена корректировка весовых коэффициентов на основе имеющейся информации в Центре Космических Наблюдений. Корректировка позволила улучшить показатели согласованности, однако характер ранжирования не изменился. Согласованность улучшалась при увеличении веса предвестника «аномальные облачные образования мезо- и микромасштаба» и при уменьшении разрыва в «весах» предвестников, являющихся более значимыми.

Высокий уровень рассогласованности в группе «возможность регистрации» подтверждает слабость разработки практических вопросов прогнозирования сейсмической активности с помощью космического сегмента ФССН.

Выводы

Для наблюдения средствами КА ДЗЗ наиболее перспективными предвестниками сейсмической активности являются:

- состав аэрозолей и малых газовых составляющих сейсмогенного происхождения;
- вариации параметров ВЧ электромагнитного поля Земли;
- изменение спектра мощности потока частиц высоких энергий на высоте орбиты КА.

Представляют интерес исследования предвестника «аномальные облачные образования мезо и микро-масштаба» в плане анализа барических градиентов, влияющих на структуру напряжений земной коры.

Недооценена роль предвестника «вариации температуры электронов и ионов на высоте орбиты КА».

Полученные результаты позволяют оценить оптимальный состав аппаратуры зондирования предвестников сильной сейсмической активности и определить перспективы развития мониторинга сейсмической активности с помощью КА ДЗЗ.

Литература

1. *Тертышников А.В.* Сейсмоозонные эффекты и проблема прогнозирования землетрясений // СПб.: ВИКУ, 1999.
2. *Липеровский В.А.* Ионосферные предвестники землетрясений // М.: Наука, 1992.
3. *Давнис В.И., Тинякова В.В.* Прогнозные модели экспертных предпочтений // Воронеж: Издательство Воронежского гос. ун-та, 2005.
4. *Саати Т.* Принятие решений: методы анализа иерархий // М.: Радио и связь, 1993.
5. *Карлин Л.Н., Абрамов В.М.* Управление энвиронментальными и экологическими рисками // СПб.: РГГМУ, 2006.