

DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-4-5

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ОЧАГА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ**С. А. Зими́на, М. И. Зими́н**2554620 ONTARIO LTD., г. Торонто, Канада, zimin7@yandex.ru

Аннотация: рассматривается системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. Оценивается влияние сейсмических событий на окружающую среду. Приводятся примеры расчёта.

Ключевые слова: системный анализ, очаг землетрясений, мониторинг, сейсмическое событие, риск.

Для цитирования: Зими́на С. А., Зими́н М. И. Системный анализ состояния очага землетрясений и его применение. *Успехи кибернетики*. 2020;1(4):38–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-4-5.

SYSTEMS ANALYSIS OF EARTHQUAKE SOURCE STATUS AND ITS APPLICATIONS**S. A. Zimina, Mikhail I. Zimin**2554620 ONTARIO LTD., Toronto, Canada, zimin7@yandex.ru

Abstract: The study proposes systems analysis of earthquake source status and its applications. The impact of seismic events on the environment is estimated. The analysis examples are included.

Keywords: systems analysis, earthquake source, monitoring, seismic event, risk.

Cite this article: Zimina S. A., Zimin M. I. Systems Analysis of Earthquake Source Status and Its Applications. *Russian Journal of Cybernetics*. 2020;1(4):38–48. DOI: 10.51790/2712-9942-2020-1-4-5.

Введение

При проектировании сооружений в сейсмоопасных районах основное внимание уделяется обеспечению их прочности и тому, как избежать воздействия цунами. Также необходимо учитывать весьма разнообразное воздействие землетрясений на окружающую среду.

Так, сейсмические события оказывают вредное воздействие на экологическую обстановку тех регионов, где они происходят, что выражается в нервном стрессе, характеризующемся паническими состояниями [1], и ухудшении протекания различных заболеваний [2]. Например, во время Ташкентского землетрясения причиной 55 % травм было неосознанное поведение самих пострадавших, обусловленное паническим состоянием и страхом [3]. Впоследствии количество смертельных случаев умножилось в результате сердечных приступов в период возникновения даже незначительных афтершоков [3]. Ташкентскими медиками отмечена прямая зависимость количества сосудистых заболеваний сердца и головного мозга от силы и частоты сейсмических колебаний, а также своеобразие клинического течения заболеваний и их исхода [3]. Отрицательные эмоции, обусловленные землетрясением и его афтершоками, оказывали сильное влияние на эндокринную систему, играющую основную роль в возникновении общего адаптационного синдрома, и приводили к глубоким перестройкам организма [3]. Наблюдалось функциональное поражение нервной и сердечно-сосудистой систем, называемый медиками «болезнью землетрясения»: во время или вскоре после подземного толчка возникали испуг, страх, появлялось учащенное сердцебиение, иногда сжимающая или колющая боль в области сердца, ощущались похолодание конечностей, дрожь во всем теле, слабость в ногах, наблюдались потеря ориентации и связности мышления, увеличение холестерина в сыворотке крови, значительный рост гипертонических кризов, инсультов, острой коронарной недостаточности и других сердечно-сосудистых осложнений [3]. Психический шок регистрировался в течение нескольких недель после основного толчка Спитакского землетрясения 1988 года [3].

Перед сейсмическим событием 6 мая 1976 года во Фриули (Италия) у многих людей отмечены недомогания, головные боли, легкая тошнота [4]. Эти же симптомы были зарегистрированы и после многих других землетрясений [4].

Следует отметить, что даже увеличение числа вызовов скорой помощи может быть предвестником сейсмического события [4]. То есть даже процессы, предшествующие землетрясениям, оказывают влияние на людей.

Неблагоприятное экологическое воздействие процессов в локальных разломах также отмечено в [5]. Весьма вероятно, что самым опасным из них является возникающий перед разрушением горных пород инфразвуковой подземный шум [6], наличие которого проще всего объясняет возникновение на больших расстояниях от эпицентра биологических предвестников землетрясений, описанных в многочисленных работах, например, в [4].

Использование результатов мониторинга очага землетрясений при оценке влияния сейсмических процессов на состояние здоровья людей может быть важно не только для профилактики различных заболеваний, но для планирования работы на объектах повышенной опасности, таких как, к примеру, атомные электростанции.

Действительно, потеря ориентации и связности мышления, недомогания, головные боли, обусловленные процессами в очагах землетрясений, могут привести к неадекватным действиям персонала и к аварийным ситуациям. Например, не исключено, что ошибки персонала Чернобыльской АЭС, которые имели место перед аварией 1986 года [7], связаны с землетрясением, произошедшим примерно в то же время рядом с этим объектом [8], причем ухудшение состояния людей, действительно, было отмечено [8].

Таким образом, учет влияния подземных толчков на человека весьма важен, так как это вполне может предотвратить болезнь землетрясений или, по крайней мере, облегчить ее течение. Однако для этого необходимо проводить мониторинг очага землетрясений и оценивать возможность возникновения подземных толчков различной интенсивности.

Подобный мониторинг важен и для сельского хозяйства. Так, клеточные батареи широко применяются в современном промышленном птицеводстве [9] и звероводстве [10]. Их внезапные и интенсивные колебания, вполне возможно, неопасные для самой конструкции, могут вызвать сильный стресс у сельскохозяйственных животных и птиц. Их паническое состояние, нередко возникающее во время землетрясений [1], при клеточном содержании весьма опасно, и нельзя исключить даже летальный исход.

Таким образом, землетрясение, не вызвав повреждений конструкций, может привести к серьезным экономическим потерям в промышленном птицеводстве и звероводстве.

Серьезную опасность представляют также сейсмогенные склоновые процессы. Например, согласно [11] в Перу в 1970 году из-за грандиозного снежного обвала, вызванного землетрясением, погибло 19 000 человек.

В связи с этим мониторинг очага землетрясений может быть использован и при оценке лавинной опасности с учетом сейсмической нагрузки по методике, описанной в [12], после чего возможно принятие обоснованного решения о закрытии каких-либо районов, о проведении предупредительного спуска лавин или о других организационных мероприятиях.

Даже вполне успешный краткосрочный прогноз землетрясений не упрощает задачу сейсмостойкого строительства. Опыт сейсмических событий указывает на несоразмерно большие, чем затраты на антисейсмические усиления, материальные потери в связи с массовым разрушением сооружений, инженерных сетей, возникновением больших пожаров в тех случаях, когда землетрясение происходило в населенных пунктах, сооружения которых не имели сейсмозащиты [11]. Тем не менее, если сейсмостойкость сооружений явно не соответствует интенсивности возможного землетрясения, не исключено принятие решения об эвакуации. Так, в соответствии с указанием местных властей незадолго до землетрясения в городе Хайчен (Китай) 04.02.1975 жители покинули дома и были приняты меры безопасности [13]. В 19:36 мощный толчок вызвал обширные разрушения, но жертв оказалось немного [13].

Таким образом, мониторинг состояния очага землетрясений представляет значительный научно-практический интерес. Так как предвестники подземных толчков весьма разнообразны [14], то системный анализ совокупности данных о них выглядит перспективным направлением исследований. Кроме того, важно также использование его результатов при прогнозировании связанных с ним опасных явлений, таких как ухудшение состояния людей и животных, склоновые процессы и так далее.

Системный анализ данных об очаге землетрясений

Принципиальная возможность прогноза подземных толчков определяется теми процессами постепенного накопления деформаций горных пород, которые предшествуют их внезапному разрушению

в очаге и вследствие этого — сейсмическому событию [11]. Однако, поскольку полезный сигнал в данном случае может быть меньше помехи, была разработана новая методика системного анализа для его выявления.

В [15] описана методика краткосрочного прогнозирования землетрясений, теоретически пригодная для использования в системах оценки возможности стресса сельскохозяйственных животных и птиц, вызываемых подземными толчками и процессами их подготовки. Однако в ней используются данные о предвестниках, сбор информации о которых достаточно трудоемок. Например, получение сведений о деформационных и гидродинамических явлениях может быть весьма сложным и затратным. Не всегда доступны и сведения об изменении геофизических полей.

В связи с этим используются 4 группы предвестников, которые, с одной стороны, достаточно доступны, а с другой — позволяют выполнять удовлетворительный прогноз: биологические, метеорологические, световые и сейсмические.

Вычисления в условиях ограниченности и неточности данных содержат значительную ошибку. Тем не менее они все-таки позволяют получить некоторую полезную информацию и выделить возможное появление различных достаточно легко наблюдаемых предвестников сейсмических событий.

Параметры прогностических зависимостей подбирались так, чтобы сумма ложных тревог и пропущенных землетрясений была минимальной.

Из сейсмических предвестников используются форшоки и индуцированные форшоки. По ним лучше всего определяются координаты эпицентра и глубина очага. Следует отметить, что в отличие от многих других прогностических эффектов реальность форшоков не вызывает ни малейшего сомнения [14]. Они наблюдались перед большим количеством землетрясений в различных сейсмоактивных регионах мира [14]. Однако физически обоснованного определения форшока не существует [14].

По данным математического моделирования, расстояние от места форшока до эпицентра не превышает 11 км [15], временной интервал между ним и основным землетрясением составляет до 52 часов [15]. Таким образом, форшоки очень важны для предсказания времени и места сейсмических событий.

Индукцированные форшоки также показывают координаты эпицентров будущих землетрясений и служат подтверждением близкого к критическому состоянию горной породы [16], однако математическое моделирование показало, что между ними и основным толчком могут пройти даже десятилетия [15].

К световым предвестникам относятся необычные свечения в атмосфере, не являющиеся шаровыми молниями, самопроизвольное свечение выключенных люминесцентных ламп и шаровые молнии. В соответствии с математическим моделированием [15] эти предвестники могут возникать на расстоянии до 38 км от эпицентра, временной интервал между их появлением и основным толчком составляет до 20 часов.

В качестве метеорологических предвестников рассматриваются [15]:

а) нарушения уравнения Менделеева–Клайперона для атмосферного воздуха.

Этот предвестник возникает на расстоянии до 360 км от эпицентра [15]. Временной интервал между ним и основным толчком составляет до 11 суток [15].

Данные о температуре воздуха и атмосферном давлении можно получать с метеоплощадок. Предвестник имеет место только в том случае, когда как минимум в шести случаях из восьми тенденции между сроками измерения средней температуры воздуха и атмосферного давления не совпадают. То есть температура не изменяется, а давление изменяется; или температура изменяется, а давление не изменяется; или давление возросло, а температура упала; или температура выросла, а давление упало.

б) увеличение за месяц числа дней с нарушением уравнения Менделеева–Клайперона.

Данный предвестник проявляется на расстоянии до 360 км [15]. Временной интервал между ним и основным толчком составляет до 32 суток [15].

в) многолетний максимум температуры почвы.

Это явление может наблюдаться на расстоянии до 180 км от эпицентра [15]. Временной интервал между ним и основным толчком составляет до 11 месяцев [15].

Необычные действия или состояния биологических объектов рассматриваются как биологические предвестники землетрясений. При этом их возможное наличие изучается только в том случае, если отсутствуют заболевания, имеющие аналогичные симптомы.

В соответствии с результатами математического моделирования [15] биологические предвестники проявляются на расстоянии до 320 км от эпицентра. Временной интервал между ними и основным толчком может достигать 33 дней [15].

В [17] описана методика оптимизации структуры прогностических систем искусственного интеллекта, предназначенных для предсказания опасных или нежелательных явлений в условиях неопределенности и взаимовлияния исходных данных. Применительно к краткосрочной оценке сейсмической опасности оптимизированная структура этой системы показана на рисунке.



Рис. Оптимизированная структура системы искусственного интеллекта для краткосрочного прогноза землетрясений

В качестве первого специалиста выступает сейсмолог, в качестве второго — метеоролог, в качестве третьего — эксперт в области световых предвестников сейсмических событий.

Предполагается, что в группе, занимающейся биологическими предвестниками землетрясений, каждый специалист имеет дело с каким-то одним биологическим видом.

Степень выраженности биологических предвестников (a_B) землетрясений рассчитывается следующим образом: 1 — аномальное поведение отдельных особей (не более 5 каждого вида или любое число одного или двух видов), 2 — аномальное поведение 3 или 4 видов животных, причем аномальным должно быть поведение не менее чем 6 особей каждого вида, 3 — аномальное поведение более чем 4 видов животных, причем отклонения от нормы должны быть более чем у 5 особей каждого вида. Если отмечается аномальное состояние людей, то степень выраженности биопредвестников увеличивается на 1, даже если она равна 3. Это связано с тем, что аномальное состояние наблюдается у людей гораздо реже, чем у животных, что следует, например, из описания биопредвестников в [4], и, если оно возникло, есть основания для увеличения соответствующей степени выраженности.

Числа особей при расчете степени выраженности биологических предвестников землетрясений получены следующим образом. Согласно [18] зависимость среднего риска от степени полинома (при использовании в качестве базисных функций полиномов Чебышева) и объема выборки имеет вид:

$$J(k) = \frac{I_M}{1 - \sqrt{\frac{(k+1) \left[\ln\left(\frac{l}{k+1}\right) + 1 \right] - \ln \eta}{l}}}, \tag{1}$$

где $1 - \eta$ — вероятность, с которой справедлива оценка (1), $J(k)$ — средний риск, I_3 — эмпирический риск, k — степень аппроксимирующего полинома, l — объем выборки.

Для $1 - \eta = 0,95$ (почти значимая величина доверительной вероятности согласно [19]) минимальное значение даже для $k = 0$ составляет 6, так как начиная с этой величины знаменатель

выражения (1) становится положительным. То есть в этом случае нельзя восстановить какую-либо зависимость и можно говорить только об отдельных особях. Поэтому если аномальное поведение имело место не более чем у 5 особей отдельного вида, то это рассматривается как аномальное поведение отдельных особей.

Числа видов при расчете степени выраженности биологических предвестников землетрясений выбраны на основе расчета знаменателя (1) при выборе $1 - \eta = 0,51$, то есть на основе баланса вероятностей [20]. Если $\ell = 1$ или 2, то объема выборки не хватает даже для восстановления зависимости при $k = 0$, так как знаменатель (1) в этом случае отрицательный. Таким образом, в этой ситуации можно говорить только об отдельных проявлениях аномального поведения видов животных. Если $\ell = 3$ или 4, то можно восстановить зависимость при $k = 0$ и можно считать, что уже группа видов оказалась подверженной процессам подготовки сейсмического события. Если $\ell > 4$, то можно восстановить зависимость при $k = 1$ и есть основания рассматривать биопредвестники как достаточно распространенные.

Аномальное состояние других биологических объектов при вычислении степени выраженности биологических предвестников учитывается аналогично.

Если аномальное поведение или состояние биологических объектов отсутствует, то степень выраженности биопредвестников равна нулю.

Степень выраженности сейсмических предвестников (a_s) равна 0, если форшоки или индуцированные форшоки отсутствуют. Если форшоки или индуцированные форшоки имели место, то она равна 1. Также $a_s = 1$ при наличии и форшоков, и индуцированных форшоков. Чтобы подземные толчки рассматривались как возможные форшоки или индуцированные форшоки, их интенсивность на поверхности Земли должна составлять не менее 3 баллов по шкале MSK — 81.

Степень принадлежности явлений к предвестникам землетрясений рассчитывается в 2 этапа. На первом шаге нечеткие множества биологических, сейсмических, метеорологических и световых событий состоят из одного элемента:

$$\frac{\mu_B^{(1)}}{B} \quad \frac{\mu_S^{(1)}}{S} \quad \frac{\mu_W^{(1)}}{W} \quad \frac{\mu_L^{(1)}}{L}, \quad (2)$$

где $\mu_B^{(1)}$ — степень принадлежности аномального состояния биологических объектов к предвестнику землетрясения на первом шаге, B — совокупность аномальных состояний биологических объектов, которые могут быть использованы в качестве предвестников землетрясения; $\mu_W^{(1)}$ — степень принадлежности метеорологического явления к предвестнику землетрясения на первом шаге, W — метеорологическое явление, представляющее собой один или более метеорологических эффектов, описанных выше, которые могут быть использованы в качестве предвестников землетрясения; $\mu_L^{(1)}$ — степень принадлежности светового явления к предвестнику землетрясения на первом шаге, L — световое явление, представляющее собой один или более световых эффектов, описанных выше, которые могут рассматриваться в качестве предвестников землетрясения; $\mu_S^{(1)}$ — степень принадлежности сейсмического явления к предвестнику землетрясения на первом шаге, S — сейсмическое явление, представляющее собой один или более сейсмических эффектов, описанных выше, которые могут рассматриваться в качестве предвестников землетрясения.

Если $a_s > 0$, то на данном шаге $\mu_S^{(1)}$ получает значение 0,25. В противном случае $\mu_S^{(1)} = 0,05$.

Если имеет место хотя бы один метеорологический феномен, который может быть предвестником сейсмического события, то на этом шаге $\mu_W^{(1)}$ получает значение 0,25. В противном случае $\mu_W^{(1)} = 0,05$.

Если имеет место хотя бы один световой эффект, который может считаться предвестником землетрясения, то на данном шаге $\mu_L^{(1)}$ получает значение 0,25. В противном случае $\mu_L^{(1)} = 0,05$.

Если $a_B > 0$, то на данном шаге $\mu_B^{(1)}$ получает значение 0,25. В противном случае $\mu_B^{(1)} = 0,05$.

На втором шаге нечеткие множества биологических, сейсмических, метеорологических и световых событий также состоят из одного элемента:

$$\frac{\mu_B^{(2)}}{B} \quad \frac{\mu_S^{(2)}}{S} \quad \frac{\mu_W^{(2)}}{W} \quad \frac{\mu_L^{(2)}}{L}, \quad (3)$$

где $\mu_B^{(2)}$ — степень принадлежности аномального состояния биологических объектов к предвестнику землетрясения на втором шаге; $\mu_W^{(2)}$ — степень принадлежности метеорологического явления к предвестнику землетрясения на втором шаге; $\mu_L^{(2)}$ — степень принадлежности светового явления к предвестнику землетрясения на втором шаге; $\mu_S^{(2)}$ — степень принадлежности сейсмического явления к предвестнику землетрясения на втором шаге.

$\mu_B^{(2)}, \mu_S^{(2)}, \mu_L^{(2)}, \mu_W^{(2)}$ вычисляются по формулам

$$\mu_B^{(2)} = \begin{cases} 0,5 & \text{если } \mu_B^{(1)} = 0,25 \text{ и } (\mu_S^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_L^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_W^{(1)} = 0,25) \\ 0,05, & \text{если } \mu_B^{(1)} = 0,05 \text{ или } (\mu_S^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_L^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_W^{(1)} = 0,05), \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_S^{(2)} = \begin{cases} 0,5 & \text{если } \mu_S^{(1)} = 0,25 \text{ и } (\mu_B^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_L^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_W^{(1)} = 0,25) \\ 0,05, & \text{если } \mu_S^{(1)} = 0,05 \text{ или } (\mu_B^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_L^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_W^{(1)} = 0,05), \end{cases} \quad (5)$$

$$\mu_L^{(2)} = \begin{cases} 0,5 & \text{если } \mu_L^{(1)} = 0,25 \text{ и } (\mu_S^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_B^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_W^{(1)} = 0,25) \\ 0,05, & \text{если } \mu_L^{(1)} = 0,05 \text{ или } (\mu_S^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_B^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_W^{(1)} = 0,05), \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_W^{(2)} = \begin{cases} 0,5 & \text{если } \mu_W^{(1)} = 0,25 \text{ и } (\mu_S^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_B^{(1)} = 0,25 \text{ или } \mu_L^{(1)} = 0,25) \\ 0,05, & \text{если } \mu_W^{(1)} = 0,05 \text{ или } (\mu_S^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_B^{(1)} = 0,05 \text{ и } \mu_L^{(1)} = 0,05). \end{cases} \quad (7)$$

Если три и более элемента множества $\{\mu_B^{(2)}, \mu_S^{(2)}, \mu_W^{(2)}, \mu_L^{(2)}\}$ равны 0,5, или $a_B \geq 3$ и хотя бы 1 элемент множества $\{\mu_S^{(2)}, \mu_W^{(2)}, \mu_L^{(2)}\}$ равен 0,5, или $a_B \geq 2$ и $\mu_S^{(2)} = 0,5$, то угроза землетрясения в течение последующих 30 суток считается реальной. В противном случае предполагается, что она нереальна.

Если угроза землетрясения реальна, то далее оценивается его интенсивность на земной поверхности по шкале MSK — 81 (она равна и интенсивности по шкале MSK — 64). Для этого сначала вычисляются степени выраженности метеорологических и световых предвестников:

$$a_W = \begin{cases} 0, & \text{если } \mu_W^{(2)} < 0,5 \\ 1, & \text{если } \mu_W^{(2)} = 0,5 \text{ и } \{a_B > 0 \text{ или } [\mu_S^{(2)} \text{ или } \mu_L^{(2)}] = 0,5\}, \end{cases} \quad (8)$$

где a_W — степень выраженности метеорологических предвестников землетрясения,

$$a_L = \begin{cases} 0, & \text{если } \mu_L^{(2)} < 0,5 \\ 1, & \text{если } \mu_L^{(2)} = 0,5 \text{ и } \{a_B > 0 \text{ или } [\mu_S^{(2)} \text{ или } \mu_W^{(2)}] = 0,5\} \\ & \text{и присутствует только 1 световой предвестник} \\ 2, & \text{если } \mu_L^{(2)} = 0,5 \text{ и } \{a_B > 0 \text{ или } [\mu_S^{(2)} \text{ или } \mu_W^{(2)}] = 0,5\} \\ & \text{и присутствуют 2 и более световых предвестника,} \end{cases} \quad (9)$$

где a_L — степень выраженности световых предвестников землетрясения.

Предполагаемая интенсивность землетрясения в эпицентре по шкале MSK — 81 оценивается по формуле

$$I = \begin{cases} < 4, & \text{если } a < 3 \\ 4 - 6, & \text{если } a = 3 \\ 7 - 9, & \text{если } a = 4 \\ 10, & \text{если } a = 5 \\ 11 - 12, & \text{если } a > 5 \end{cases}, \quad (10)$$

где

$$a = a_B + a_L + a_W + a_S \quad (11)$$

Предполагается, что глубина очага и координаты эпицентра совпадают с этими параметрами для форшока. Если форшоки не зарегистрированы, то магнитуда землетрясения определяется по формуле

$$M = 1,8 \cdot \left[a_B + \begin{cases} a_L & \text{при } a_L \geq a_S \\ a_S & \text{при } (a_S > a_L \text{ и наличии форшока}) \end{cases} \right], \quad (12)$$

где — магнитуда землетрясения.

Описанная методика оценки состояния очага землетрясений была опробована на ряде примеров.

Одним из них является ретроспективный прогноз Ашхабадского землетрясения 1948 года. Согласно [14] ему предшествовал максимум среднегодовых значений температуры почвы на глубине 3,2 м. Таким образом, в данном случае $\mu_W^{(1)} = 0,5$.

Перед этим землетрясением отмечено довольно много биологических предвестников. Так, за месяц до катастрофы змеи покинули свои укрытия и появились на поверхности земли [4]. Поскольку в Туркмении обитает довольно много видов змей [21], то уже в это время можно было бы сказать, что $a_B = 3$. В день накануне землетрясения овцы сбивались в кучу и не паслись [4]. За два часа до основного толчка на ашхабадском конезаводе буквально взбесились лошади [4]. За полтора — два часа началось массовое переселение муравьев [4]. Кроме того, за несколько часов до землетрясения забеспокоились люди [4]. Следовательно, за несколько часов до землетрясения расчетное значение a_B составляет 4.

Таким образом, в данном случае

$$a = a_B + a_W = 4 + 1 = 5$$

и расчетная интенсивность землетрясения равна 10 баллам. Согласно [11] она составила 9–10 баллов.

Расчетная магнитуда этого сейсмического события составляет

$$M = 1,8 \cdot 4 = 7,2,$$

где — магнитуда землетрясения.

Глубина очага определяется из уравнения, приведенного в [22]:

$$I = 1,5 \cdot M - 3,5 \lg h + 3, \quad (13)$$

где I — интенсивность землетрясения, баллы по шкале MSK – 81; h — глубина очага, км. Причем в расчетах берется наименьшее из рассчитанного интервала значение интенсивности землетрясения.

Тогда

$$h = 10^{(1,5 \cdot 7,2 + 3 - 10)/3,5} = 12,2 \text{ км.}$$

По данным, приведенным в [11], Ашхабадское землетрясение имело магнитуду 7,3, а глубина очага составляла 10–40 км. То есть результаты прогноза достаточно близки к реальным параметрам этого сейсмического события.

Другим примером является аналогичный прогноз Ташкентского землетрясения 26 апреля 1966 года. Оно имело интенсивность 8 баллов, магнитуду 5,1 [11], а глубина очага составляла от 3 до 8 км [3]. За 5 часов до землетрясения в нескольких километрах от эпицентра необычно громко и неприятно кричали кошки [4]. Перед этим сейсмическим событием имел место максимум среднегодовых значений температуры почвы [14]. В ночь перед основным толчком самопроизвольно загорались люминесцентные лампы [14]. Таким образом, $a_B = 1$, $a_L = 2$, $a_W = 1$. Тогда $I = 8$, $M = 5,4$, $h = 7,7$ км, что также достаточно близко к параметрам произошедшего сейсмического события.

Третьим примером является прогноз такого же рода для Хайченского землетрясения, произошедшего согласно [13] в 19:36 04.02.1975 в Северо-Восточном Китае. Его магнитуда составила 7,3 [13]. Незадолго до землетрясения возникло свечение неба [23]. Утром 04.02.1975 произошло землетрясение с магнитудой 4,7 [13]. В январе — начале февраля 1975 года стали поступать тысячи сообщений о необычном поведении животных [4].

Таким образом, утром 04.02.1975 можно было бы сказать, что $a_B = 3$, $a_L = 1$, $a_S = 1$. Тогда $a = 5$, $I = 10$, $M = 7,2$, $h = 12,2$ км.

Расчетная магнитуда практически не отличается от реальной, и, судя по тому, что основной толчок вызвал обширные разрушения [13], интенсивность этого сейсмического события достаточно близка к предсказанной.

Следующим примером является системный анализ состояния очагов землетрясений на Северном Кавказе с 30.09.1998 по 26.03.1999, выполненный в реальном времени. Данные об индуцированных форшоках взяты из [16], а данные о сейсмических событиях — из [15].

Проведенный анализ иллюстрируется таблицей. В этой таблице N — северная широта; E — восточная долгота; S обозначает сейсмические предвестники, W — метеорологические, B — биологические; цифры после этих букв показывают степень выраженности этих предвестников.

Таблица

Прогнозирование состояния очагов землетрясений на Северном Кавказе

Дата прогноза	Время		Предвестники	Прогноз				Землетрясения				
	от	до		h	I	N	E	Дата	h	I	N	E
30.09 1998	30.09 1998	30.10 1998	S1, B3, W1	2,1	10	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	02.10 1998	0,2	10,9	42,91	43,77
07.10 1998	07.10 1998	06.10 1998	S1, B1, W1	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	08.10 1998	24,6	5,0	44,17	44,39
13.10 1998	13.10 1998	-	S1	Землетрясения не ожидаются				Землетрясения не происходили				
18.10 1998	18.10 1998	-	S1	Землетрясения не ожидаются				Землетрясения не происходили				
21.10. 1998	21.10 1998	20.11 1998	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	23.10 1998	19,3	4,9	43,02	45,67
25.10 1998	25.10 1998	24.11 1998	S1, B2, W1	2,5	7 – 9	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	26.10 1998	1	6,6	43,94	42,44
01.11 1998	01.11 1998	-	S1, W1	Землетрясения не ожидаются				Землетрясения не происходили				
07.11 1998	07.11 1998	07.12 1998	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	16.11 1998	15,5	4,4	43,25	43,33
20.11 1998	20.11 1998	20.12 1998	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	23.11 1998	9,63	5,4	43,75	43,21

Дата прогноза	Время		Прогноз					Землетрясения				
	от	до	Пред-вест-ники	h	I	N	E	Дата	h	I	N	E
26.11 1998	26.11 1998	26.12 1998	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	08.12 1998	11,6	5,5	42,56	42,46
14.12 1998	14.12 1998	13.01 1999	S1, B3	18,1	7 – 9	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	03.01 1999	10	7	43,11	46,99
05.01 1999	05.01 1999	04.02 1999	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	31.01 1999	25	5,6	43,11	46,99
05.02 1999	05.02 1999	-	S1, W1	Землетрясения не ожидаются				Землетрясения не происходили				
09.02 1999	09.02 1999	12.03 1999	S1, B3	14,8	7 - 9	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	21.02 1999	33	6,5	43,37	47,32
26.02 1999	26.02 1999	28.03 1999	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	07.03 1999	20	4,4	42,59	44,13
12.03 1999	12.03 1999	11.04 1999	S1, B2	18,1	4 – 6	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	14.03 1999	13	4,7	42,56	44,06
18.03 1999	18.03 1999	-	S1, W1	Землетрясения не ожидаются				Землетрясения не происходили				
26.03 1999	26.03 1999	25.04 1999	S1, B2, W1	2,5	7 – 9	43,50 42,70 45,00 43,50 45,00 43,00 42,00	42,50 43,30 43,50 45,60 46,00 47,00 46,00	07.04 1999	6,2	6,7	42,61	45,41

Как видно из этой таблицы, предлагаемый системный анализ данных о предвестниках землетрясений обеспечивает прогнозирование состояния очага землетрясений с удовлетворительной точностью, что в дальнейшем может быть использовано для планирования мероприятий по снижению ущерба от землетрясений и связанных с ними явлений.

Использование результатов мониторинга очагов землетрясений при прогнозировании экстремальных событий

Экстремальные события чрезвычайно редки [24]. В тоже время принятие высоких мер безопасности — весьма дорогостоящее мероприятие [24], которое может превзойти по затратам ущерб от катастрофы.

Катастрофы возможны и при неправильном сейсмическом районировании. Например, в Ашхабаде к 1948 году многие здания были построены без учета требований антисейсмического строительства или проектировались с учетом сейсмичности 8 баллов (в соответствии с действовавшей тогда картой районирования) [11]. Интенсивность же сейсмического события в 1948 году составила 9–10 баллов [11].

В 1976 году в Газли произошло девятибалльное землетрясение [11]. До этого считалось, что там возможны только пятибалльные землетрясения [11].

11 апреля 2011 года в Японии произошло сейсмическое событие с магнитудой $M = 9$, одно из сильнейших за всю историю наблюдений [24]. Возникшая волна цунами привела к техногенной катастрофе на АЭС, погибли 16 892 человека [24].

Япония является одной из немногих стран, в наибольшей степени обеспеченных длинными рядами сейсмических данных [24]. Первое известное сильнейшее землетрясение (с $\approx 8,6$) датируется здесь 869 годом; за последующие столетия по историческим данным известны еще три подобных события (с магнитудами $= 8,6$ и $8,7$) [24]. За время инструментальных наблюдений (1923–2010 годы) максимальная зарегистрированная магнитуда составила 8,3 [24]. Соответственно, были веские основания полагать, что землетрясений с $M = 9$ в Японии и не бывает [24]. Это предположение подкреплялось и мировым опытом [24]. Мегаземлетрясения (с ≥ 9) были известны ранее только на протяженных (более 1000 км) однородных участках зон субдукции: в Южной Америке, на Аляске, в Индонезии, а в Японии таких участков нет [24]. Недооценка возможной максимальной силы землетрясения обусловила и недооценку возможной высоты цунами [24].

Недорогой мониторинг состояния очагов землетрясений может быть весьма полезен и для предотвращения подобных ситуаций, так как при удовлетворительном прогнозе реально принять меры безопасности, минимизирующие ущерб и предотвращающие человеческие жертвы.

То, что это, в принципе, возможно, показывает успешный прогноз Хайченского землетрясения, произошедшего 4 февраля 1975 года в Северо-Восточном Китае, когда в результате своевременной эвакуации населения были спасены десятки тысяч человеческих жизней [23]. Это подтверждается также приведенным ретроспективным прогнозом Ашхабадского землетрясения 1948 года.

Важным аспектом применения этого мониторинга может быть прогнозирование воздействия сейсмических процессов на состояние здоровья людей и животных, которое описано в [25, 26], так как устранить этот эффект методами сейсмостойкого строительства, указанными в [22], как минимум, проблематично.

Описанный системный анализ состояния очага землетрясений может быть также использован при предсказании сейсмогенных склоновых процессов, при некотором изменении алгоритмов, приведенных в [27].

Заключение

Системный анализ состояния очага землетрясений может быть эффективно использован для решения тех задач предотвращения обусловленного землетрясением ущерба, которые сложно или вообще невозможно решить методами сейсмостойкого строительства. Эти работы не являются дорогостоящими, но могут обеспечить приемлемый уровень безопасности в сейсмоактивных районах. Они применимы также в регионах, где возможен сход лавин и селей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coburn A., Spence R. Earthquake Protection. Chichester: John Wiley&Sons Ltd.; 1992. 355 p.
2. Brown D. L. Disparate Effects of the 1989 Loma Prieta and 1994 Northridge Earthquakes on Hospital Admissions for Acute Myocardial Infarction: Importance of Superimposition of Triggers. *American Heart Journal*. 1999;137:830–836.

3. Уломов В. И. Сейсмическая опасность и «синдром» землетрясений. Медицина катастроф. *Защита*. 1996;1(13):72–80.
4. Мариковский П. И. Животные предсказывают землетрясения. Алма-Ата: Наука; 1984. 144 с.
5. Брагашов В. А., Кострюкова Н. К., Карпин В. А., Дрожжин Е. В. *Гелиогеофизические факторы риска здоровью населения северных урбанизированных территорий. Биопатогенные эффекты локальных разломов земной коры (на примере г. Сургут)*. Сургут: РИИЦ «Нефть Приобья»; 2006. 76 с.
6. Белоносов С. М. Применение моментной теории упругости к изучению землетрясений. *Обратные задачи математической физики*. Новосибирск, 1998. С. 15–16.
7. Чернобыльская авария: Дополнение к INSAG-1. *INSAG-7. Доклад международной консультативной группы по ядерной безопасности*. Вена: МАГАТЭ, 1993.
8. Ацюковский В. А., Васильев В. Г. *Обнаружение и нейтрализация геопатогенных излучений Земли*. М.: ООО «Петит»; 2005. 195 с.
9. Кочиш И. И., Петраш М. Г., Смирнов С. Б. *Птицеводство*. М.: КолосС; 2004. 407 с.
10. Балакирев Н., Колдаева Е., Столбов С. Перспективы развития соболеводства в России. *Главный зоотехник*. 2011;2:44–48.
11. Поляков С. В. *Последствия сильных землетрясений*. М.: Стройиздат; 1978. 311 с.
12. Зимин М. И. Прогнозирование лавинной опасности. Санкт-Петербург: Гидрометеоздат; 2000. 16 с.
13. Короновский Н., Наймарк А. Землетрясение: возможен ли прогноз? *Наука и жизнь*. 2013;3:36–42.
14. Сидорин А. Я. *Предвестники землетрясений*. М.: Наука; 1992. 192 с.
15. Зимин М. И., Шабельников В. А., Тимишев В. М., Зими́на С. А. *Результаты практического применения математического моделирования физико-механических процессов в структурно-неоднородных телах*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет, 1999. 69 с. Деп. в ВИНТИ 30.12.1999, № 3936–В99.
16. Славина Л. Б. Сейсмический режим и возможные зоны возникновения землетрясений на территории Дагестана и сопредельных районов. *Федеральная система сейсмологических наблюдений и прогноза землетрясений: Информационно-аналитический бюллетень*. 1994;2:18–24.
17. Зимин М. И. Двухуровневая система прогнозирования опасных природных явлений и ее использование в системах автоматизации проектирования. *Естественные и технические науки*. 2010;6:359–360.
18. Вапник В. Н., Глазкова Т. Г., Кошечев В. А., Михальский А. И., Червоненкис А. Я. *Алгоритмы и программы восстановления зависимостей / под ред. В. Н. Вапника*. М.: Наука; 1984. 816 с.
19. Соболев И. М. Численные методы Монте-Карло. М.: Наука; 1973. 312 с.
20. Будылин С. Л. Внутреннее убеждение или баланс вероятностей. Стандарты доказывания в России и за рубежом. *Вестник Высшего Арбитражного Суда Российской Федерации*. 2014;3:25–57.
21. Ананьева Н. Б., Орлов Н. Л., Халиков Р. Г., Рябов С. А., Барабанов А. В. *Атлас пресмыкающихся Северной Евразии (таксономическое разнообразие, географическое распространение и природоохранный статус)*. Санкт-Петербург: Зоологический институт; 2004. 939 с.
22. Поляков С. В. *Сейсмостойкие конструкции зданий*. М.: Высшая школа; 1983. 304 с.
23. Семенов Р. М. Сахалинская трагедия 1995 года и проблемы прогноза землетрясений. *Геологическая среда и сейсмический процесс: Материалы Всероссийской межрегиональной конференции*. Иркутск: ИЗК СО РАН. 1997. С. 202–205.
24. Родкин М. Редкие экстремальные события – головная боль человечества. *Троицкий вариант – Наука*. 2015;186:3.
25. Еськов В. М., Гавриленко Т. В., Зимин М. И., Зими́на С. А. *Нейросетевые принципы в идентификации и изучении систем с хаотической динамикой*. Тула: Издательство ТулГУ; 2016. 398 с.
26. Znamenskiy V. S., Zimina A. M. Forecasting Adverse Effect of the Earthquake on. *Reflexive Theater of Situational Center-2012: Materials of the 6-th All-Russian Conference with the International Participation*. Omsk: Omsk Institute of Consumer Service Technology; 2013. P. 165–169.
27. Зимин М. И., Рубцов Е. А., Тимишев В. М., Бейтуганова Н. М., Зими́на С. А. *Моделирование многофазных структурно-неоднородных тел*. Нальчик: Кабардино-Балкарский государственный университет; 2001. 25 с. Деп. в ВИНТИ 27.11.2001, № 2468–В2001.