

*Г.М. Нигметов<sup>1</sup>, А.А. Кузьмин<sup>2</sup>, Ю.В. Прус<sup>2</sup>*  
(<sup>1</sup>ВНИИ ГОЧС МЧС России, <sup>2</sup>Академия ГПС МЧС России;  
e-mail: andrei2306rus@mail.ru)

## **КОНЦЕПЦИЯ ИНФОРМАЦИОННО-УПРАВЛЯЮЩЕЙ СИСТЕМЫ ЗАЩИТЫ ОТ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЯ**

*Предлагается концепция построения системы мониторинга сейсмической опасности и поддержки принятия решений о мероприятиях по защите населения на этапах угрозы, возникновения и затухания катастрофического землетрясения.*

*Ключевые слова: катастрофическое землетрясение, стадии сейсмической опасности, сейсмостойкость зданий, система поддержки принятия решений.*

*G.M. Nigmatov, A.A. Kuzmin, Yu.V. Prus*  
**CONCEPT OF INFORMATION MANAGEMENT SYSTEMS  
PROTECTION FROM CATASTROPHIC EARTHQUAKE**

*A concept of building a system of seismic hazard monitoring and decision support about actions on protection of the population on phases threats, appearance and attenuation of catastrophic earthquake are proposed.*

*Key words: catastrophic earthquake, stage of seismic hazard, earthquake resistant buildings, decision support system.*

Статья поступила в редакцию Интернет-журнала 3 ноября 2013 г.

Имеющийся во ВНИИ ГОЧС опыт работы по предупреждению катастрофических землетрясений и ликвидации их последствий показывает, что существует необходимость и реальная возможность создания автоматизированных **систем мониторинга сейсмической опасности и поддержки принятия решений (СППР)**, позволяющих оперативно решать организационные задачи по защите проживающего в сейсмоопасных районах населения на трёх основных этапах катастрофического землетрясения.

В соответствии с [1], выделяют следующие основные этапы катастрофического землетрясения:

- подготовка очага катастрофического землетрясения с форшоковыми проявлениями или без них;
- срабатывание очага катастрофического землетрясения;
- затухание очага катастрофического землетрясения с афтершоковыми проявлениями.

Разрабатываемая СППР должна включать в себя три подсистемы, поэтапно включающиеся в работу на различных стадиях сейсмической опасности:

- при угрозе возможного землетрясения (стадия форшоков);
- при воздействии землетрясения (стадия главного толчка);
- после воздействия землетрясения (стадия афтершоков).

## Поддержка принятия решений при угрозе возможного катастрофического землетрясения

На данном этапе основной целью СППР является обоснование и планирование профилактических мероприятий по "смягчению" возможных последствий, обусловленных риском возникновения катастрофического землетрясения. При этом, в рамках реализации целевой программы [2], предлагается использовать карты территориальных значений введенного в [1] индивидуального сейсмического риска, представляющего собой комплексную величину, определяемую как частное от деления величины математического ожидания потерь в рассматриваемой 6-бальной зоне (по шкале MSK-64) возможного сейсмического события на произведение времени, в течение которого ожидается землетрясение, и количества людей в рассматриваемой 6-бальной зоне:

$$Rei = \frac{m_6}{T \times N_6} = \left[ \frac{1}{cod} \right], \quad (1)$$

где  $m_6$  – математическое ожидание потерь в рассматриваемой 6-бальной зоне возможного землетрясения, чел.;

$T$  – время, в течение которого прогнозируется возможное сейсмическое событие, год;

$N_6$  – количество людей, находящихся в рассматриваемой 6-бальной зоне возможного землетрясения.

Сравнивая полученные величины индивидуального сейсмического риска с нормативными значениями уровней (в соответствии с [3]), можно выявлять зоны повышенного риска и своевременно планировать мероприятия по его снижению. К таким мероприятиям относятся организация и проведение строительного-монтажных работ по повышению сейсмической надежности зданий и систем жизнеобеспечения, заблаговременное оповещение населения об опасности возникновения землетрясения и устойчивости зданий, подготовка населения к действиям в условиях сильного землетрясения, расселение жителей и другие мероприятия, выполнение которых позволит свести к минимуму возможные вследствие землетрясения человеческие и материальные потери.

Для осуществления мониторинга индивидуального сейсмического риска необходимо:

- иметь данные о координатах и мощности возможных очагов землетрясения и времени их возможного срабатывания;
- иметь данные о тектонике, геологии и рельефе местности в рассматриваемой возможной эпицентральной 6-бальной зоне;
- иметь данные о сейсмостойкости зданий и сооружений в рассматриваемой зоне;
- использовать математические модели для расчёта макросейсмического поля в эпицентральной зоне возможных очагов землетрясений и построения изосейст.

Необходимость определения величины индивидуального сейсмического риска подтверждают результаты общего сейсмического районирования [2], согласно которым сейсмическая опасность на территории России оказалась

значительно выше, чем это представлялось прежде в картах общего сейсмического районирования территории России – ОСР-97 [4]. Так, согласно новым картам, сейсмическая опасность на территории многих субъектов РФ оказалась выше на 1-2 и даже 3 балла, то есть уровень сейсмического риска на этих территориях значительно повысился, в сравнении с прежними расчётными величинами.

Вместе с тем, застройка данных районов много лет велась без учёта реального уровня сейсмической активности. Здания и сооружения, построенные до уточнения величины сейсмической опасности, имеют значительный дефицит сейсмостойкости, вследствие чего их разрушения в результате землетрясений могут привести к огромным людским и материальным потерям.

Проведение масштабной реконструкции зданий и сооружений в данной ситуации не представляется возможным, поэтому остается единственный путь для снижения возможных потерь, заключающийся в развитии и совершенствовании методов прогноза землетрясений и мониторинга сейсмического риска.

Одну из главных ролей при мониторинге сейсмического риска должны выполнять многоканальные инженерно-сейсмометрические мониторинговые системы, включающие в себя как сейсмологические, так и сейсмометрические станции.

**Сейсмологические станции** предназначены для выполнения задач по определению параметров землетрясений. В отличие от сейсмометрических станций, которые устанавливаются в пределах одного объекта города, сооружения, здания, они должны быть территориально удалены друг от друга.

Технические параметры акселерометров, устанавливаемых на сейсмологических станциях, имеют частотный диапазон от 0,5 Гц до 20 Гц и предназначаются только для своевременной засечки координат гипоцентров землетрясений и их мощности и не предназначены для мониторинга технического состояния системы грунт-сооружение.

**Сейсмометрические системы** мониторинга грунт-сооружение должны включать минимум четыре рядом расположенных датчика: один датчик должен располагаться на грунте рядом с сооружением, второй – в основании сооружения, третий – в средней части сооружения, четвёртый – в верхней части сооружения. Частотные характеристики систем мониторинга грунт-сооружение должны иметь диапазон 0,1-1000 Гц при чувствительности 1 В·м/с<sup>2</sup>. Задача системы мониторинга системы грунт-сооружение заключается не только в фиксации параметров воздействия сейсродинамических нагрузок, но и в непрерывном определении технического состояния системы грунт-сооружение, его устойчивости и сейсмостойкости.

В СССР, наряду с сейсмологическими станциями, существовала сеть сейсмометрических станций, с использованием которых фиксировалось воздействие сейсмических нагрузок на сооружение и его основание. В настоящее время в России сейсмометрические системы, оставшиеся со времён Советского Союза, в основном были утрачены по ряду организационных и технических причин, тогда как сейсмологические системы в современных условиях получили бурное развитие, оснастившись эффективными цифровыми станциями.

Проведенные под научным руководством авторов исследования в условиях реального воздействия динамических и сейсмических нагрузок с использованием многоканальных сетей дают основание заключить, что можно создать мониторинговые технологии, обеспечивающие своевременное определение технического состояния систем грунт-сооружение, их устойчивости и сейсмостойкости [5]. Такие системы позволят оперативно предлагать мероприятия по усилению устойчивости здания либо принимать решения, при необходимости, об эвакуации людей из здания.

Другим перспективным направлением в области прогнозирования землетрясений и их последствий, наряду с сейсмологическими и сейсмометрическими станциями, является развитие методов и средств выявления первичных признаков возможных очагов землетрясений.

Как показывает опыт международных геодеформационных наблюдений, изложенный в статьях [6-8], землетрясениям предшествуют специфические деформации земной коры. Например, в декабре 1995 г. на Кавказских минеральных водах проводились геодеформационные измерения, где удалось зафиксировать сверхдлинные геодеформационные волны перед землетрясением в станции Лысогорская. Геодеформационная сеть состояла из 8 стационарных пунктов наблюдений, оборудованных в населенных пунктах Георгиевск, Суворовская, Железноводск, Эссентуки, Лермонтов, Лысогорская, Минеральные воды, Кисловодск. Время наблюдений совпало с периодом новолуния – 21 декабря 1995 г. Наблюдения выполнялись 4 высокоточными геодезическими GPS-приёмниками фирмы "Тримбл" серии SSE 4000. Наблюдения проводились с 17 по 24 декабря 1995 г. Наблюдения были организованы и выполнены таким образом, что продолжительность синхронных измерений наиболее ответственных хорд составляла 58-62 часа. Во время наблюдений в ночь на 21 декабря 1995 г. были обнаружены колебательные синхронные изменения длин хорд. Схема геодеформационных наблюдений приведена на рис. 1.

### Использование высокоточных GPS приемников для геодинамического мониторинга



Рис. 1. Схема геодеформационных наблюдений на Кавказских Минеральных Водах

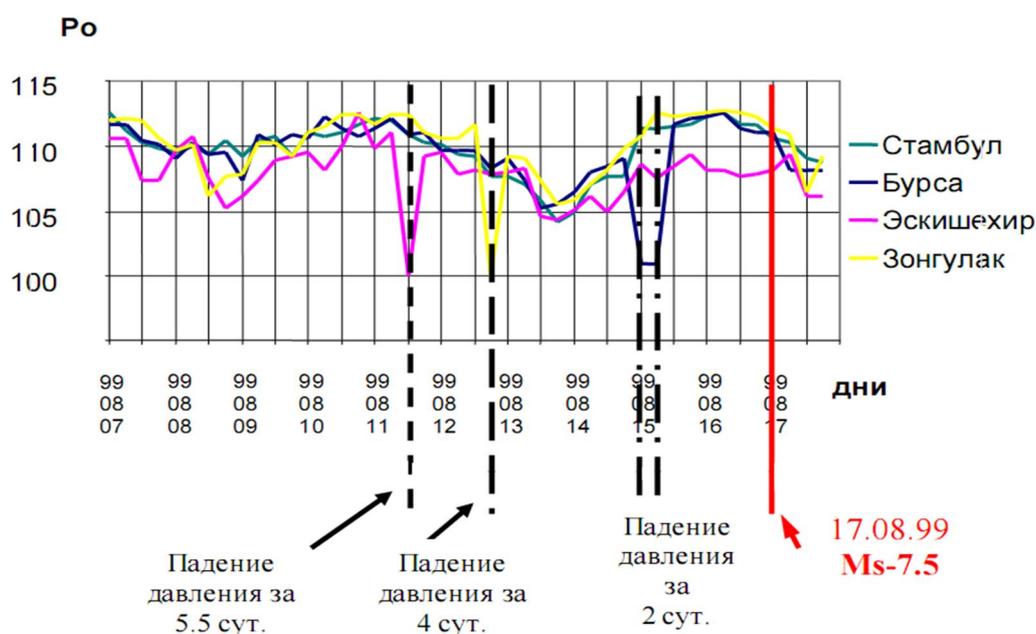
Рассмотренные примеры дают возможность установить, что землетрясению предшествуют низкочастотные и высокочастотные колебания земной коры.

При выполнении сейсмодинамических наблюдений в г. Бам Исламской Республики Иран многоканальной широкопостной станцией "Струна 3М" удалось зафиксировать колебания грунта в районе крепости "Арге-Бам" и отеля "Азади", за несколько часов до разрушительного землетрясения в соседней провинции Керман.

В [6] высказано предположение, что срабатывание очага землетрясения может произойти при условии, если жесткость участка литосферы снижается до некоторого критического уровня, приводящего к увеличению периода собственных колебаний рассматриваемого участка литосферы (который характеризуется некоторым критическим значением отклонения от фонового значения). Таким образом, период собственных колебаний рассматриваемого участка литосферы учитывает практически все основные физико-механические показатели и геометрию, от которых зависит опасность срабатывания возможного очага землетрясения.

Применяя вероятностный алгоритм оценки, изложенный в монографии [9], можно вычислить риск возможного землетрясения на участке литосферы.

Помимо описанных наблюдаемых деформаций земной коры, также были зафиксированы колебательные изменения атмосферного давления, интенсивности молниевых разрядов и уровня воды в скважинах. Характер изменений атмосферного давления представлен на рис. 2, эти изменения наступают за одну неделю до возникновения катастрофического землетрясения с магнитудой более 4,5.



**Рис. 2.** Изменения атмосферного давления по результатам измерений 4 раза в сутки. Турция, район г. Измир

Определённым образом себя ведут в краткосрочный период подготовки к землетрясению и *электромагнитные предвестники*. В качестве электромагнитного предвестника использовалась *интенсивность молниевых разрядов*. За неделю до землетрясения наблюдался рост интенсивности молниевых разрядов, а за день-два – наблюдалось затишье.

Существует мнение [7], что описанные выше признаки, в первую очередь, обусловлены активной геодинамикой подготавливающейся эпицентральной зоны. Этот вывод был подтвержден геодинамическими наблюдениями на Северном Кавказе, в районе Кавминвод. Зафиксированная с помощью высокочастотных спутниковых GPS-приёмников геодинамическая аномалия совпала по времени с резким изменением атмосферного давления и уровня воды в скважинах.

Данный факт даёт основания говорить о необходимости сбора любой информации для предсказания землетрясений и её обработки с использованием современных методов и алгоритмов многомерного статистического анализа, что и может являться одной из составляющих предлагаемой СППР.

Таким образом, работа СППР при угрозе возможного очага землетрясения должна базироваться на основании данных по мониторингу индивидуального сейсмического риска сейсмоопасного региона. Для определения *возможных очагов землетрясений (ВОЗ)* предлагается применять комплексные системы мониторинга и прогнозирования сейсмической опасности. Для мониторинга индивидуального сейсмического риска предлагается использовать данные по сейсмостойкости и данные о ВОЗ.

Соответственно, при угрозе возможного очага землетрясения предлагается:

- выполнить оценку сейсмической опасности сейсмоопасной территории, для этого использовать адаптированные модели Нигметова Г.М. и других авторов по анализу геодинамических, сейсмических, геофизических, электромагнитных, метеорологических, спутниковых данных и определению координат возможных очагов землетрясений за 2-7 дней вперед с магнитудой  $M < 5$  и  $M > 5$ ; определить возможные очаги землетрясений;

- выполнить работы по оперативной оценке сейсмостойкости зданий и сооружений с использованием метода динамических испытаний, уточнить базу данных по сейсмостойкости застройки и объектов территории;

- адаптировать модели для оценки последствий сильных землетрясений и оценки индивидуального сейсмического риска для рассматриваемой территории;

- разработать геоинформационную систему заданной территории и окрестных территорий по прогнозированию возможных очагов сильных землетрясений, прогнозированию возможных последствий сильных землетрясений, мониторинговой оценке индивидуального сейсмического риска и отображению мониторинговой информации по сейсмической опасности и индивидуальному сейсмическому риску.

## **Поддержка принятия решений при воздействии очага катастрофического землетрясения**

Основной толчок катастрофического землетрясения продолжается от несколько секунд до нескольких минут и может повлечь за собой необратимые последствия колоссального масштаба. Главной задачей предлагаемой СППР на данном этапе является подсчёт пострадавших и планирование мероприятий по ликвидации сложившейся ЧС, с учётом величины индивидуального сейсмического риска, определённого на первой стадии.

Для прогнозирования потерь населения и объёмов спасательных и неотложных работ, а также для разработки подсистемы поддержки принятия решений при воздействии очага землетрясения предлагается применение методики [10], весомым достоинством, которой является возможность прогнозирования потерь населения и объёмов спасательных и неотложных работ как при заблаговременном планировании превентивных мероприятий, так и в случае оперативного реагирования на землетрясение.

В методике [10] применяется вероятностный подход при анализе потерь людей и объёмов разрушений, что позволяет определить основные показатели, влияющие на объёмы аварийно-спасательных работ и решение задач по жизнеобеспечению населения в зонах разрушительных землетрясений. К таким показателям относят:

- численность пострадавших людей;
- численность людей, оказавшихся без крова;
- количество зданий с возникшими обвалами, частичными разрушениями, тяжёлыми, умеренными и лёгкими повреждениями;
- объём завалов,  $m^3$ .

Помимо основных показателей, при оценке инженерной обстановки могут определяться вспомогательные показатели, используемые для организации выполнения неотложных работ:

- площадь разрушенной части города, в пределах которой произошли тяжёлые повреждения, частичные разрушения и обвалы (3, 4 и 5 степени повреждения);
- количество участков, требующих укрепления (обрушения) повреждённых или частично разрушенных конструкций;
- характеристики завалов;
- количество аварий на коммунально-энергетических сетях;
- пожарная обстановка.

Соответственно, при воздействии очага землетрясения предлагается:

- провести предварительный подсчет последствий и количества пострадавших в результате воздействия землетрясения;
- уточнить количество сил и средств, необходимых для ликвидации ЧС;
- спланировать мероприятия по ликвидации сложившейся ЧС, с учётом величины индивидуального сейсмического риска, определённого на первой стадии, а также с учётом предварительного подсчета последствий и количества пострадавших.

## Поддержка принятия решений после воздействия катастрофического землетрясения с афтершоковыми проявлениями

После воздействия основного толчка землетрясения, который повлек за собой разрушения зданий и сооружений, возникает оперативная задача по оценке их уязвимости, устойчивости, категорий состояния и сейсмостойкости. Однако существующие локальные методы оценки категорий состояния сооружений и их уязвимости не позволяют определить интегральную уязвимость сооружений. К локальным методам обследования сооружений и оценки их категорий состояния относятся: визуальный контроль, геодезический контроль и прочностной контроль [3].

Предлагается для оценки категорий состояния сооружений и их уязвимости применять локальные методы совместно с интегральными. К интегральным методам оценки категорий технического состояния сооружений относятся методы динамических и геофизических испытаний систем грунт-сооружение [11, 12]. Наиболее интегральным показателем для сооружений, характеризующим его несущую способность, является величина жёсткости  $E \times I$  [13]. Жёсткость сооружений можно измерить через период собственных колебаний. В общем виде связь между жесткостью и периодом собственных колебаний можно выразить (в соответствии с [13, 14]) в виде следующей зависимости:

$$T = k \sqrt{\frac{M}{E \times I}}, \quad (2)$$

где  $M$  – масса здания, кг;

$E$  – модуль упругости, Н/м<sup>2</sup>;

$I$  – момент инерции, м<sup>4</sup>;

$k$  – коэффициент пропорциональности, учитывающий расчётную схему и геометрию конструкций.

Из формулы видно, что чем больше период собственных колебаний, тем меньше жесткость конструкции. Таким образом, период собственных колебаний сооружений является именно тем необходимым параметром, с использованием которого можно контролировать изменение жесткости конструкций и уязвимости сооружений. Для оценки возможного риска обрушения сооружений предлагается использовать динамические параметры, полученные по результатам динамических испытаний. По алгоритму [3] экспериментально полученные величины периодов собственных колебаний сооружений сравниваются с рассчитанными величинами критических значений периодов собственных колебаний и определяется уязвимость сооружений.

Наряду с выполнением динамических испытаний, после воздействия основного толчка, используя прогностические данные о возможных повторных толчках и данные об уязвимости зданий и сооружений, с учётом их повреждений от многократного воздействия сейсмических событий, необходимо уточнить возможный индивидуальный риск.

Соответственно, после воздействия возможного очага землетрясения с афтершоковыми проявлениями предлагается:

1) вести учёт количества сил и средств, которые принимают участие в ликвидации ЧС;

2) выполнять мониторинг сейсмостойкости *зданий и сооружений (ЗиС)* с применением метода динамических испытаний и уточнять базу данных по сейсмостойкости застройки и объектов территории;

3) выполнять изменения в базе данных ГИС по сейсмостойкости зданий и сооружений;

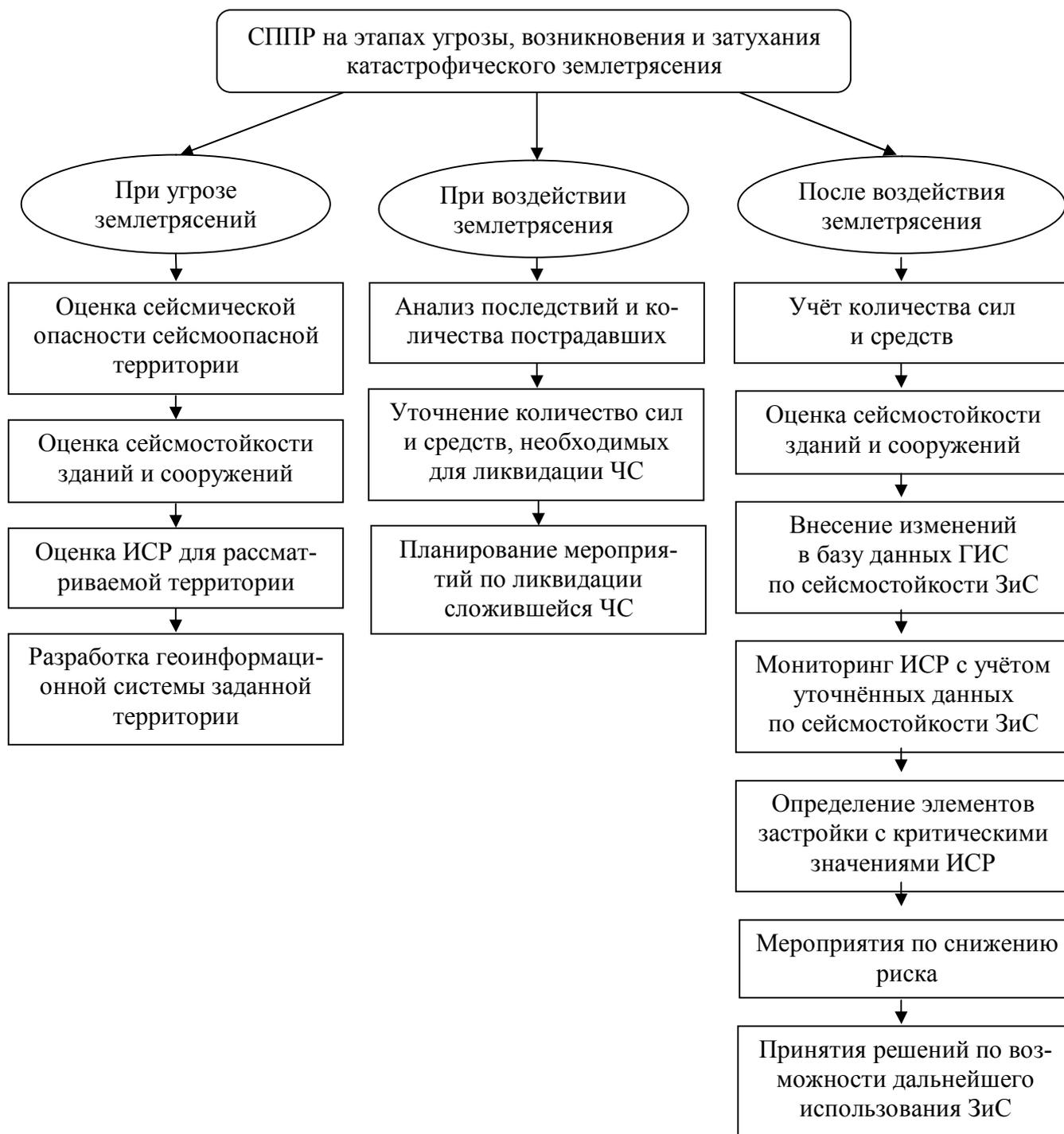
4) выполнять мониторинг *индивидуального сейсмического риска (ИСР)* с учётом прогнозирования ВОЗ и уточненных данных по сейсмостойкости зданий и сооружений;

5) определить элементы застройки с критическими значениями индивидуального сейсмического риска;

6) для элементов застройки с критическими значениями индивидуального сейсмического риска выполнить мероприятия по снижению риска;

7) принимать решения по возможности дальнейшего использования сооружений как в условиях ЧС, так и в дальнейшем восстановительном режиме.

Обобщённая структура разрабатываемой системы поддержки принятия решений на этапах угрозы, возникновения и затухания катастрофического землетрясения представлена на рис. 3.



**Рис. 3.** Обобщённая структура СППР на этапах угрозы, возникновения и затухания катастрофического землетрясения

## Литература

1. **Методика** оценки комплексного индивидуального риска чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2002.
2. **О федеральной** целевой программе "Повышение устойчивости жилых домов, основных объектов и систем жизнеобеспечения в сейсмических районах Российской Федерации на 2009-2018 годы": Постановление Правительства РФ от 23 апреля 2009 г. № 365.
3. **Методика** оценки и сертификации инженерной безопасности зданий и сооружений М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2002.
4. **СНиП II-7-81\***. Строительство в сейсмических районах. М.: Госстрой России, 2000.
5. **Шахраманьян М.А., Нигметов Г.М., Прошляков М.Ю.** Технология оценки устойчивости и сейсмостойкости зданий и сооружений // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2 (4). С. 27-37.
6. **Нигметов Г.М., Чубаков М.Ж.** Проблемы мониторинга зданий и сооружений // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. 2011. № 4. С. 51-55.
7. **Нигметов Г.М.** Некоторые вопросы краткосрочного прогнозирования сейсмической опасности и риска // Catalogue of seismoforecasting research carried out in Azerbaijan territory in 2009. 2009. С. 147-154.
8. **Нигметов Г.М.** Колебания земной коры перед разрушительными землетрясениями. Catalogue of seismoforecasting research carried out in Azerbaijan territory in 2010. 2010. С. 99-104.
9. **Синицин А.П.** Расчёт конструкций на основе теории риска: монография. М.: Стройиздат, 1985. 304 с.
10. **Методика** прогнозирования последствий землетрясения М.: ВНИИ ГОЧС МЧС России, 2000.
11. **Нигметов Г.М., Чубаков М.Ж.** Мониторинг окружающей среды, зданий и сооружений на сейсмоопасных территориях // Природные и техногенные риски. Безопасность сооружений. 2011. № 1. С. 79-86.
12. **Нигметов Г.М.** Проблема мониторинга инженерной безопасности зданий и сооружений // Технологии гражданской безопасности. 2004. № 2. С. 80-85.
13. **Нигметов Г.М.** Проблемы мониторинга зданий и сооружений // Мониторинг. Наука и безопасность. 2011. № 2. С. 36-42.
14. **Снитко Н.К.** Строительная механика: 3-е изд., перераб. М.: Высш. школа, 1980. 431 с.