Слайд 1

Слайд 2

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке модуля системы поддержки принятия решений (СППР) в составе информационной системы RECASP (Reengineering of Computer Analysis of the Seismic Process) для прогнозирования землетрясений. Землетрясения – одни из самых разрушительных природных катаклизмов, способных приводить к огромным жертвам и материальному ущербу. В Байкальской рифтовой зоне ежегодно регистрируется несколько тысяч сейсмических событий, поэтому необходимость надёжного прогноза очень актуальна. В настоящее время точное короткосрочное предсказание землетрясений остаётся нерешённой научной проблемой. Это усиливает роль методов искусственного интеллекта и СППР, способных оперативно обрабатывать разнородные данные и формировать рекомендации для снижения риска природных катастроф. Сочетание ИИ-подходов с возможностями СППР представляется особенно актуальным для снижения последствий сейсмических событий

Слайд 3

Целью работы является проектирование модуля СППР в составе системы RECASP, предназначенного для прогнозирования землетрясений. Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

* Провести анализ существующих СППР и современных методов прогнозирования природных катастроф, выявить их ограничения.
* Исследовать возможности применения нейросетей и методов машинного обучения в сейсмологии и геофизике, обобщить успешные примеры их использования
* Проанализировать архитектуру и функциональные возможности системы RECASP, определить места интеграции модуля прогнозирования в общую систему.
* Сформулировать требования к модулю СППР и разработать концептуальную архитектуру данного модуля.
* Выбрать и адаптировать алгоритмы прогнозирования (такие как KDE и ETAS), а также реализовать интеграцию экспертных правил и систему валидации качества моделей

Слайд 4

Объектом исследования являются процессы прогнозирования сейсмических рисков в геологически активных регионах (на примере Байкальской рифтовой зоны) Предметом исследования выступают ансамблевые модели прогноза на основе ядровой оценки плотности (KDE) и эпидемической модели вторичных толчков (ETAS) в сочетании с правило-ориентированной экспертной системой (библиотека Experta) для комплексного прогноза и поддержки решений. **Научная новизна** проявляется в двухуровневой архитектуре прогноза, представленной справа на схеме:

1. **KDE** формирует базовую карту вероятностей на основе исторического каталога.
2. **ETAS** оперативно корректирует прогноз, моделируя афтершоковую «эпидемию».
3. Итогом становится сводная *near-real-time* карта риска, которая и поступает в модуль поддержки решений.

Слайд 5

Предложенная архитектура модуля вписывается в трёхуровневую структуру системы RECASP. Модуль реализован в виде расширения (плагина) для RECASP, что обеспечивает гибкую интеграцию новых алгоритмов и моделей. В системе реализован клиент-серверный подход. Геопространственные данные о землетрясениях хранятся в СУБД PostgreSQL 15 с расширением PostGIS 3, обеспечивающим эффективные пространственные запросы. На серверной стороне развернуты модули обработки: импорт и предобработка данных, расчёт прогнозных карт (KDE, ETAS) и модуль оценки потерь. Клиентская часть построена на базе WinForms и использует библиотеку GMap.NET для интерактивной визуализации карты с эпицентрами и зонами повышенного риска. Такой набор технологий позволяет быстро обрабатывать большие исторические каталоги и отображать результаты прогноза в *near-real-time* режиме.

Слайд 6

Предложенная методика состоит из двух основных компонентов: долгосрочного прогноза (KDE) и краткосрочной корректировки (ETAS), дополненных экспертными правилами.

* **Долгосрочный прогноз (KDE).** Долгосрочная карта сейсмического риска создаётся методом ядровой оценки плотности (KDE) на основе всех исторических событий за счёт построения непрерывной «тепловой» поверхности вероятностей. Это позволяет выявлять географические зоны повышенного риска, основываясь на статистике прошлых эпицентров. Формально на плоскости строится равномерная сетка, и в каждой ячейке суммируются вклады от всех событий с помощью ядра Гаусса. Благодаря этому карта отражает скопление прошлых землетрясений и задаёт базовую вероятность возникновения новых толчков.

Слайд 7

* **Краткосрочная корректировка (ETAS).** Для учёта текущей сейсмической обстановки применяется модель ETAS (Epidemic-Type Aftershock Sequence), представляющая собой стохастический процесс самовозбуждения. В этой модели каждое случившееся землетрясение «порождает» серию афтершоков, интенсивность которых убывает по закону Омори с течением времени и удалением от эпицентра. В отличие от статичной KDE-карты, ETAS учитывает недавние события как источники дополнительной вероятности, а долгая «тишина» в регионе уменьшает прогнозный вес соответствующих ячеек. При реализации объединяется базовая KDE-карта и краткосрочная ETAS-карта (суммирование вероятностей с последующей нормировкой), что обеспечивает баланс между устойчивостью на исторических данных и чувствительностью к текущему процессу.

Слайд 8

* **Экспертная система.** Для формирования рекомендаций и фильтрации аномалий применяется правило-ориентированный компонент на базе фреймворка **Experta** (Python), описывающий экспертные знания специалистов по сейсмике. Экспертные правила оперируют признаками сейсмической активности (например, количество крупных афтершоков в регионе, превышение порогов ускорения и т.д.) и на их основе выдают качественные заключения и предписания. Экспертная система «фильтрует аномалии и формирует рекомендации», что повышает обоснованность принимаемых решений при прогнозировании и реагировании.

Слайд 9

Качество разработанной прогностической системы оценивалось с помощью ретроспективного анализа по методологии CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability). Для этого были использованы объединённые каталоги землетрясений (ЕГС РАН, EMSC, GEOFON) за период 1960–2024 гг., разбитые на тренировочную и тестовую выборки строго по протоколам CSEP. Метриками валидации служили: доля обнаруженных событий (POD), доля ложных тревог (FAR), выигрыш правдоподобия (LL-gain) и оценка Брайера (Brier score).

Слайд 12

Для строгой количественной проверки прогностической способности модели применён регламент CSEP (Collaboratory for the Study of Earthquake Predictability). Данные каталога 1995 – 2019 гг. были разделены на обучающую и независимую тестовую выборки; затем рассчитаны четыре стандартизированные метрики.

1. Probability of Detection (POD = 0,74). Показатель отражает долю фактически случившихся событий, попавших в область прогноза. Значение 0,74 демонстрирует высокую чувствительность алгоритма при долгосрочном горизонте.

2. False Alarm Ratio (FAR = 0,26). Отношение числа ложных предупреждений к общему количеству предсказаний. Полученное значение свидетельствует о приемлемом уровне избыточных тревог, сопоставимом с практическими порогами международных систем.

3. Log-Likelihood Gain (LL-gain = +1,9 бит). Выигрыш логарифмического правдоподобия по сравнению с однородной пуассоновской моделью (H₀). Положительное значение в 1,9 бит подтверждает статистическую значимость прогноза (p < 0,01) и наличие информативного содержимого.

4. Brier Score (BS = 0,12). Среднеквадратичное отклонение прогнозных вероятностей от бинарного исхода. Чем ниже показатель, тем лучше калибровка; достигнутый уровень 0,12 соответствует хорошо согласованной вероятностной оценке.

Вывод. Совокупный анализ метрик демонстрирует, что предложенная двухуровневая схема KDE + ETAS обеспечивает статистически значимое улучшение выявляемости сильных событий при контролируемой доле ложных тревог и корректной калибровке вероятностей, что делает её пригодной для оперативного применения в модуле СППР RECASP.

Слайд 11

Ретроспективный анализ по данным Байкальского региона (1995–2019 гг.) показал, что применение двухуровневой модели улучшает обнаружение событий. В частности, при увеличении радиуса влияния модели ETAS до 100 км точность прогнозов возросла на 18,5 %, однако при этом доля ложных срабатываний увеличилась до 80. Эти результаты подчёркивают необходимость балансирования чувствительности и специфичности модели при настройке её параметров. Обширная база данных и стандартизированная методология валидации обеспечивают надёжность полученных оценок качества прогноза

Слайд 12

Разработанный модуль обеспечивает внедрение *near-real-time* визуализацию зон повышенного сейсмического риска. Благодаря автоматической обработке данных и выведению рекомендаций сокращено время реакции на сигналы сейсмостанций с нескольких часов до нескольких секунд. Кроме того, уменьшена трудоёмкость экспертных процедур, что повышает скорость принятия решений и эффективность мер по защите населения и инфраструктуры. Эти практические улучшения свидетельствуют о значимости работы: прогнозный модуль расширяет функциональность системы RECASP, добавляя возможность поддержки принятия решений на основе прогноза землетрясений.

Слайд 13

Разработанный модуль СППР успешно протестирован и подтверждает свою эффективность. По итогам ретроспективных экспериментов выявляемость сильных событий в Байкальской зоне выросла до 18,5 % по сравнению с одноуровневой моделью. Модуль готов к дальнейшему расширению и совершенствованию. В числе перспективных направлений – использование вычислений на GPU и адаптивной сетки для ускорения перерасчёта карт прогнозов, а также интеграция новых ИИ-алгоритмов и актуальных данных мониторинга. В целом представленный подход демонстрирует, что комбинация статистических моделей (KDE, ETAS) и экспертных правил в составе СППР позволяет повысить оперативность и надёжность прогноза землетрясений, что важно для повышения сейсмобезопасности региона.