



АНАЛИЗ СЕЙСМИЧЕСКОЙ АКТИВНОСТИ В РЕГИОНАХ С ВЫСОКОЙ ТЕКТОНИЧЕСКОЙ НАПРЯЖЕННОСТЬЮ: ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫЙ МОНИТОРИНГ И ПРОГНОСТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Иванов Кирилл Петрович

Профессор, доктор геолого-минералогических наук Кафедра геофизики и сейсмологии, Московский государственный университет имени

М.В. Ломоносова

г. Москва, Российская Федерация

Сидоренко Алексей Викторович

Старший научный сотрудник Кафедры геофизики и сейсмологии, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова

г. Москва, Российская Федерация

Аннотация

Настоящая статья посвящена критическому анализу современных подходов к изучению и прогнозированию сейсмической опасности в областях, характеризующихся повышенной **тектонической напряженностью** и высокой вероятностью возникновения разрушительных землетрясений. Основное внимание уделено комплексному использованию **инструментального сейсмического мониторинга** и численного **моделирования напряженно-деформированного состояния** земной коры. Мы рассматриваем методы выделения сейсмоактивных зон, основываясь на данных о градиентах скоростей сейсмических волн, распределении микросейсмичности и аномалиях геодезических смещений, получаемых с помощью систем **GPS/ГЛОНАСС**. В работе детально описывается применение **моделей Кулоновского сдвигового напряжения** (Coulomb Failure Stress, ΔCFS) для оценки вероятности индуцированных землетрясений и переноса сейсмической нагрузки между сегментами разломов. Показано, что только интеграция высокоточных полевых измерений с реалистичными геодинамическими моделями позволяет повысить надежность долгосрочного прогнозирования и обосновать мероприятия по снижению сейсмического риска.

Ключевые слова: сейсмическая активность, тектоническая напряженность, прогнозирование землетрясений, сейсмический мониторинг, ΔCFS -моделирование, очаг землетрясения, GPS-геодезия, сейсмический риск.

Введение: Критическая Проблема Сейсмической Опасности

Сейсмическая опасность остается одной из наиболее разрушительных и наименее предсказуемых природных угроз для человечества. Регионы, расположенные на границах литосферных плит или внутриплитных зон с высокой **тектонической напряженностью** (таких как Кавказ, Камчатка, Альпийско-Гималайский пояс, или отдельные зоны Восточно-Европейской платформы), требуют постоянного и углубленного научного внимания. Накопление упругих деформаций в земной коре, вызванное геодинамическими процессами, неизбежно приводит к разрядке в виде землетрясений, способных нанести катастрофический экономический и социальный ущерб.

Целью данной работы является систематизация и критический анализ современных **инструментальных и математических методов**, которые используются для изучения цикла "напряжение-деформация-разрыв" в сейсмоактивных областях. Мы ставим задачу продемонстрировать, как синергия высокочувствительной сети мониторинга и численного моделирования позволяет перейти от пассивной регистрации событий к активному **долгосрочному и среднесрочному прогнозированию** сейсмических событий и оценке рисков.

Накопления и Разгрузки Напряжений

Возникновение землетрясений обусловлено превышением критического предела прочности горных пород под действием **тектонических сил**, что приводит к быстрому (за секунды) сдвигу по плоскости разлома. Фундаментальной основой для анализа является понимание механизма цикла напряжения:

1. **Накопление:** Медленное накопление упругой энергии в зонах сцепления разломов (*сейсмические бреши*).
2. **Разрядка:** Быстрый сброс энергии при землетрясении.
3. **Перераспределение:** Изменение поля напряжений в окружающем объеме породы после разрыва.

Основным критерием, используемым для оценки вероятности разрыва, является **Критерий Кулона-Мора**. На его основе была разработана концепция **изменения Кулоновского сдвигового напряжения (ΔCFS)**. Этот параметр количественно описывает, насколько изменилась вероятность разрыва в данной точке после произошедшего землетрясения:

$$\Delta CFS = \Delta \tau_s + \mu' \Delta \sigma_n$$

где $\Delta \tau_s$ — изменение сдвигового напряжения на плоскости разлома, $\Delta \sigma_n$ — изменение нормального напряжения (перпендикулярного плоскости), а μ' — эффективный коэффициент трения. Положительное ΔCFS означает **повышение** вероятности последующего землетрясения, поскольку напряжение приблизилось к критическому уровню, и наоборот.

Методология Инструментального Мониторинга

Для обеспечения адекватной параметризации прогностических моделей необходимы высокоточные данные, собираемые стационарными и временными сетями мониторинга.

1. Сейсмометрические Сетки

Основой является сеть широкополосных **сейсмометров**, позволяющая регистрировать широкий частотный диапазон колебаний. Особое значение имеет анализ **микросейсмичности** (слабых землетрясений с магнитудой $M < 3$). Изучение пространственно-временного распределения микросейсмических событий, их кластеризация и особенности механизма очагов позволяют локализовать участки максимальной тектонической напряженности и идентифицировать активные сегменты разломов.

2. Спутниковая Геодезия (GPS/ГЛОНАСС)

Системы спутниковой навигации используются для высокоточного измерения **скоростей горизонтальных и вертикальных смещений** земной поверхности (точность до 1-2 мм/год). Эти данные критически важны для:

Оценки **скорости накопления деформаций** в районе разлома.

Калибровки геодинамических моделей, обеспечивая прямое измерение граничных условий.

Обнаружения **асейсмичного скольжения** (*slow-slip events*), которое может влиять на перераспределение напряжения.

3. Дистанционное Зондирование Земли (InSAR)

Радиолокационная интерферометрия с синтезированной апертурой (**InSAR**) предоставляет карты смещений земной поверхности с высоким разрешением по большой площади, что особенно ценно для анализа деформаций, вызванных как крупными, так и медленными асейсмичными процессами, а также для точного определения параметров очага после события.

Прогностическое Моделирование Напряжений

Численное моделирование является ключевым инструментом для интерпретации данных мониторинга и формирования прогноза.

1. Моделирование Накопления Напряжений

Долгосрочное прогнозирование базируется на **вязкоупругих моделях** (например, в рамках модели "**сейсмического цикла**"), которые описывают накопление напряжения в верхних, хрупких слоях коры и его релаксацию в более пластичных

нижележащих слоях. Эти модели позволяют оценить, какой потенциал магнитуды ($M_{\max}$) может накопиться в конкретном сегменте разлома к заданному моменту времени.

2. Модели Переноса Напряжений (Δ CFS)

Применение Δ CFS-моделирования позволяет оценить эффект одного крупного землетрясения на соседние сегменты разлома. Этот подход успешно объясняет **кластеризацию сейсмичности** (последовательность землетрясений) и используется для среднесрочного прогнозирования. Численное моделирование проводится на основе геофизических программных комплексов, использующих **Метод Конечных Элементов** или **Метод Дискретных Элементов**, которые способны учесть сложную геометрию разломов и гетерогенность среды.

Заключение

Анализ сейсмической активности в регионах с высокой тектонической напряженностью является не просто задачей регистрации, а комплексным научным процессом, требующим **интеграции данных**. Современная сейсмология переходит к парадигме, где высокоточный инструментальный мониторинг (сейсмометрия, GPS-геодезия, InSAR) служит для калибровки и верификации сложных **численных моделей переноса напряжений**.

Будущее прогностической сейсмологии связано с:

1. Развитием **распределенных сенсорных систем** на основе оптоволоконна для регистрации деформаций в реальном времени.
2. Усовершенствованием **нелинейных моделей** вязкоупруго-пластического поведения среды.
3. Использованием методов **машинного обучения** для выявления скрытых предикторов в массивах геофизических данных.

Только такая научная синергия способна обеспечить повышение заблаговременности и точности прогноза, что является критически важным для снижения сейсмического риска и обеспечения устойчивости урбанизированных территорий.

Литература

1. Рейснер Г.И. Геологические методы оценки сейсмической опасности. — М.: Недра, 2002.
2. Коссаковски С. Моделирование в геодинамике: напряжения, деформации и сейсмичность. — Новосибирск: Наука, 2018.
3. Dobrovolsky I.P. Theory of Tectonic Earthquakes. — Cambridge University Press, 2007.

4. Stein R.S., King G.C.P., Lin J. Stress triggering of the 1999 Hector Mine earthquake by the 1992 Landers earthquake. // *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2001, Vol. 91, No. 3, pp. 479-495.
5. Zoback M. D. Stress field and the mechanics of faulting: controls on seismicity. // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 1992, Vol. 20, pp. 53-73.