



## Новые способы уточнения оценок сейсмической опасности в Прибайкалье

Ружич В.В 1., Левина Е.А.1, Бержинская Л. П.1,2.

1Институт земной коры, СО РАН, Иркутск, Россия,

2 Иркутский научно-исследовательский технический университет, г. Иркутск, Россия

E-mail: ruzhich@crust.irk.ru



НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ С МЕЖДУНАРОДНЫМ УЧАСТИЕМ  
**'АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИНЖЕНЕРНОЙ СЕЙСМОЛОГИИ, БЕЗОПАСНОСТИ ТЕРРИТОРИЙ И ЗДАНИЙ,  
ЭКСПЕРТИЗА И ОЦЕНКА РИСКОВ'**  
ПАМЯТИ Ю.А. БЕРЖИНСКОГО

## Кратко о методах исследований

- В Институте земной коры СО РАН в течение нескольких десятилетий авторами проводились многолетние междисциплинарные исследования **при сотрудничестве со специалистами России и зарубежья для целей средне- и долгосрочного прогноза опасных землетрясений с  $K \geq 13.0$  ( $M \geq 5.0$ ) на территории Байкальской рифтовой зоны (БРЗ) и в Прибайкалье**. При разработке методологии средне- и долгосрочного прогноза авторами изначально была разработана **экспертная система ГИС «Prediction»**, основанная на методе распознавания образов [Ружич, 1997; Левина, Ружич, 2011 и др.].
- Анализ сейсмического режима при подготовке местных землетрясений осуществлялся посредством оперативного использования каталога землетрясений за период инструментальных наблюдений 1950–2022 гг., представляемого Байкальским филиалом Единой геофизической службы РАН в г. Иркутске. Дополнительно использовался каталог исторических землетрясений в пределах БРЗ, начинающийся с 1725 г. [Новый каталог, 1977].
- Наряду с сейсмологическими данными авторами **широко использовались получаемые при полевых работах геологические сведения об условиях возникновения **глубинных косейсмических разломов** (палеосейсмодислокаций), ставших доступными в эксгумированных сегментах разломов. Также привлекались данные полученные при проведении **натурных физико-механических испытаний и физического моделирования в геологической и ледовой средах****.
- В качестве практической реализации сведений о прогнозе, а также для контроля результатов, полученная информация регулярно отправлялась в отдел мониторинга МЧС Иркутской области в виде сейсмопрогностических сводок с указанием районов ожидаемых очагов землетрясений с указанной энергией в течение 1 года.

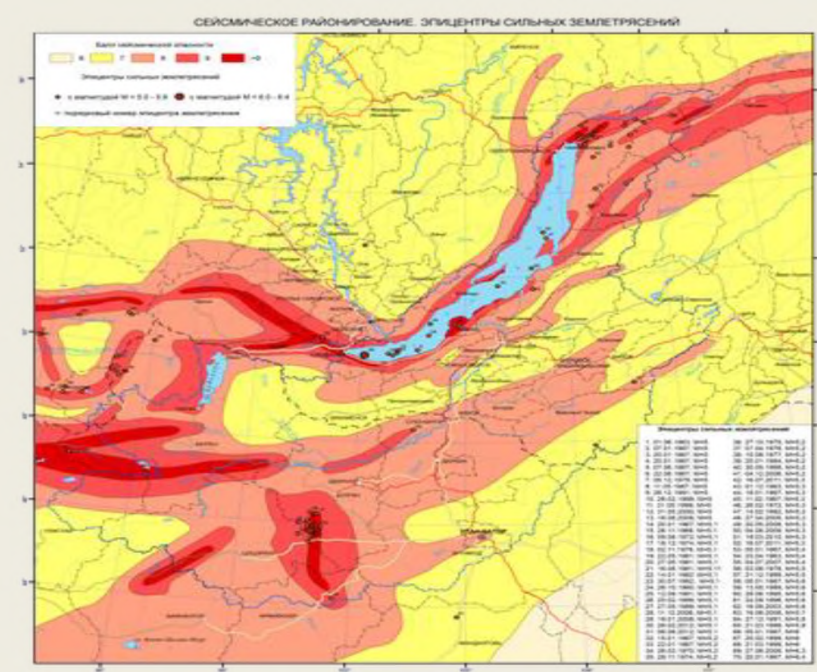


# Об оценках сейсмической опасности в БРЗ средствами общего сейсмического районирования (ОСР)

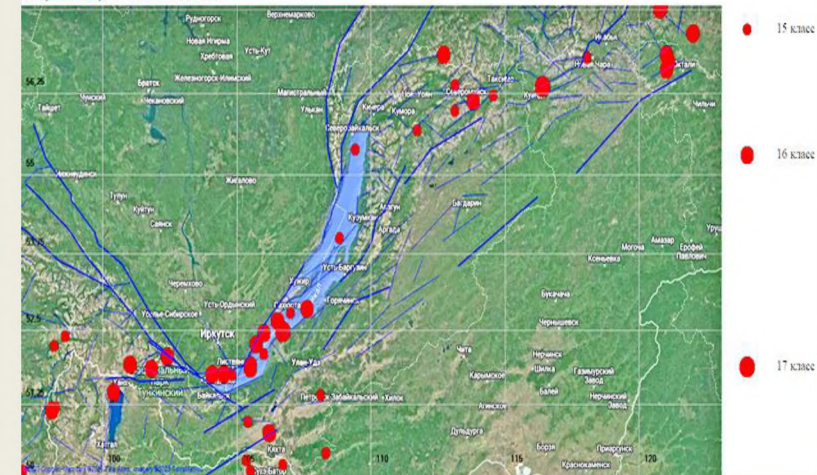
На территории Российской Федерации начиная с 1971 г. применяется методология выявления мест возникновения опасных землетрясений, названных как зоны ВОЗ. До настоящего времени в рамках полномочий Государственного комитета СССР, данный подход, основанный на регулярном составлении карт общего сейсмического районирования (ОСР) [Уломов, Богданов, 2013;], служит основой для рационального землепользования и обеспечения нужд сейсмостойкого строительства. Главной целью выделенных зон ВОЗ является максимально приближенное к реальности отражение проекций будущих очаговых зон землетрясений разных магнитуд ( $M$ ) с определенной повторяемостью.

При построении зон ВОЗ предусматривается экстраполяция возникновения землетрясений, произошедших в известных геолого-геофизических условиях, на морфоструктурно-разломные комплексы со сходными условиями. В ОСР реализуется довод: там, где есть разломные узлы и выявлены признаки палеосейсмодислокаций от землетрясений, возникших сотни-тысячи лет назад, там они снова будут. Однако нет данных о том, сколько лет их стоит ожидать? Периоды повторяемости сильных землетрясений с  $K \geq 16$  составляют сотни-тысячи лет. Внизу показана карта эпицентров землетрясений с  $K \geq 15$ , возникших в БРЗ за период 1753-2023 гг. (270 лет).

Видно, что площади распространения сейсмической опасности по ОСР и распределение реально произошедших землетрясений сильно различаются. Размеры площадей высокой опасности на картах ОСР несоразмерно завышены, т.к. не учитывают наличия многочисленных сейсмических брешей в структуре сейсмического поля. См карты.

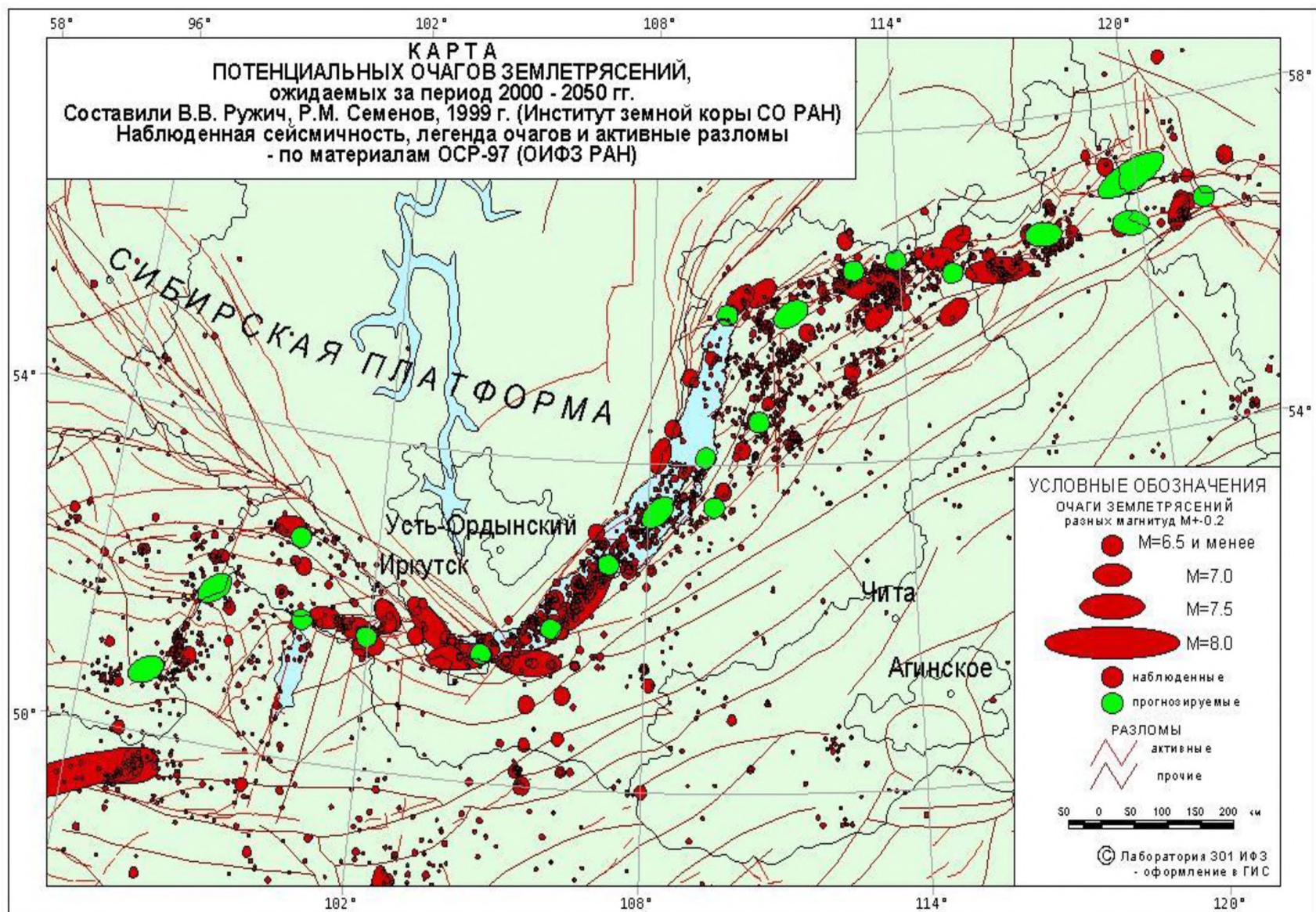


Широта: 57.327 Долгота: 115.708 Масштаб: 1:2445  
Выбранный период времени: от 01.01.1753 до 20.11.2023 Отражено 59 эпицентров  
Выбранные мерцательные классы: 15-17



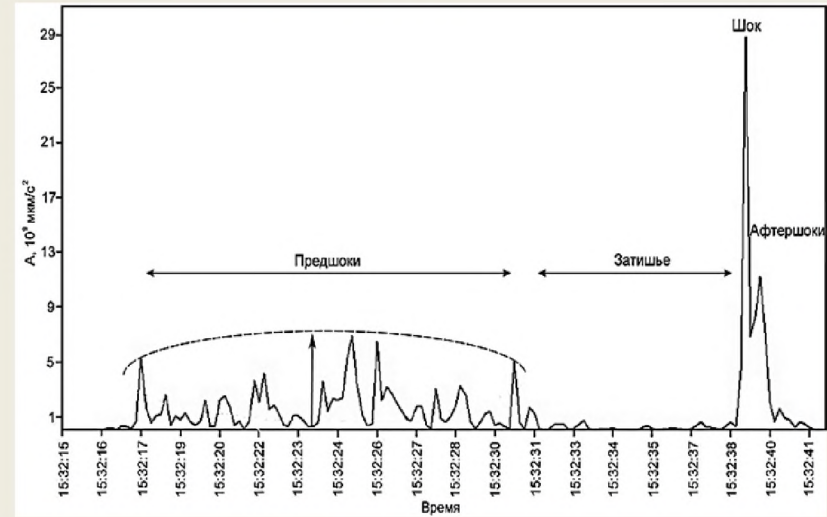


Один из первых вариантов карт **долгосрочного** прогноза в БРЗ (на 50 лет), составленная с **учетом и наличия сейсмических брешей** для всероссийского Проекта (координатор Г.А.Соболев, 1999). Карта обсуждалась и корректировалась с Игорем Валентиновичем Уломовым в 1999 г)

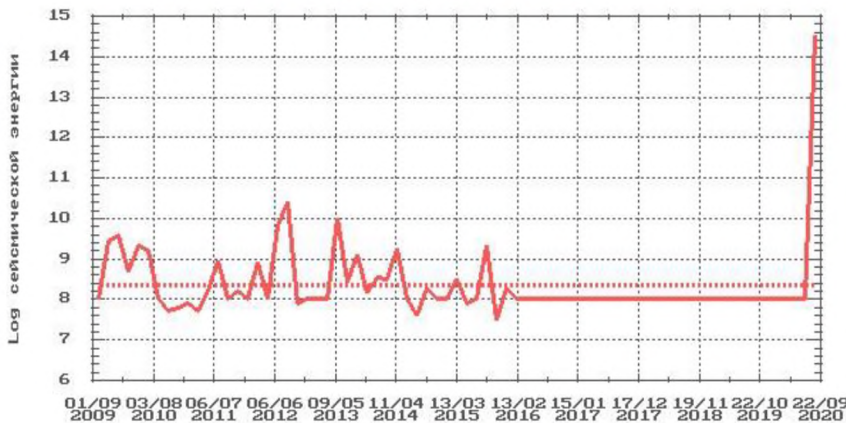




Авторами при участии специалистов ИДГ и ИФПМ, а также Берлинского Технического Университета, проводились **натурные эксперименты на участке Ангарского разлома (полигон в Листвянке, 2013 г.)**. С помощью скользящей по разлому бетонной плиты (вместо аллохтона) по неровностям плоскости разлома фиксировались деформационные и сейсмические сигналы, возникающие при разрушении разномасштабных неровностей. Установлено, что при срезании крупной одиночной неровности возникает характерный сейсмический режим подготовки шокового события: **предшоковая сейсмоактивизация и последующее сейсμοдеформационное затишье**. Этот режим наблюдается при подготовке землетрясений в БРЗ. Данные сведения положены в основу созданной 2-х стадийной феноменологической модели подготовки землетрясений для среднесрочного прогноза.



Координаты : 51.05 - 52.55 с.ш. 102.27 - 104.23 в.д. Площадь 22328 кв.км  
Средний Log энергии = 8.351



LOG СЕЙСМИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

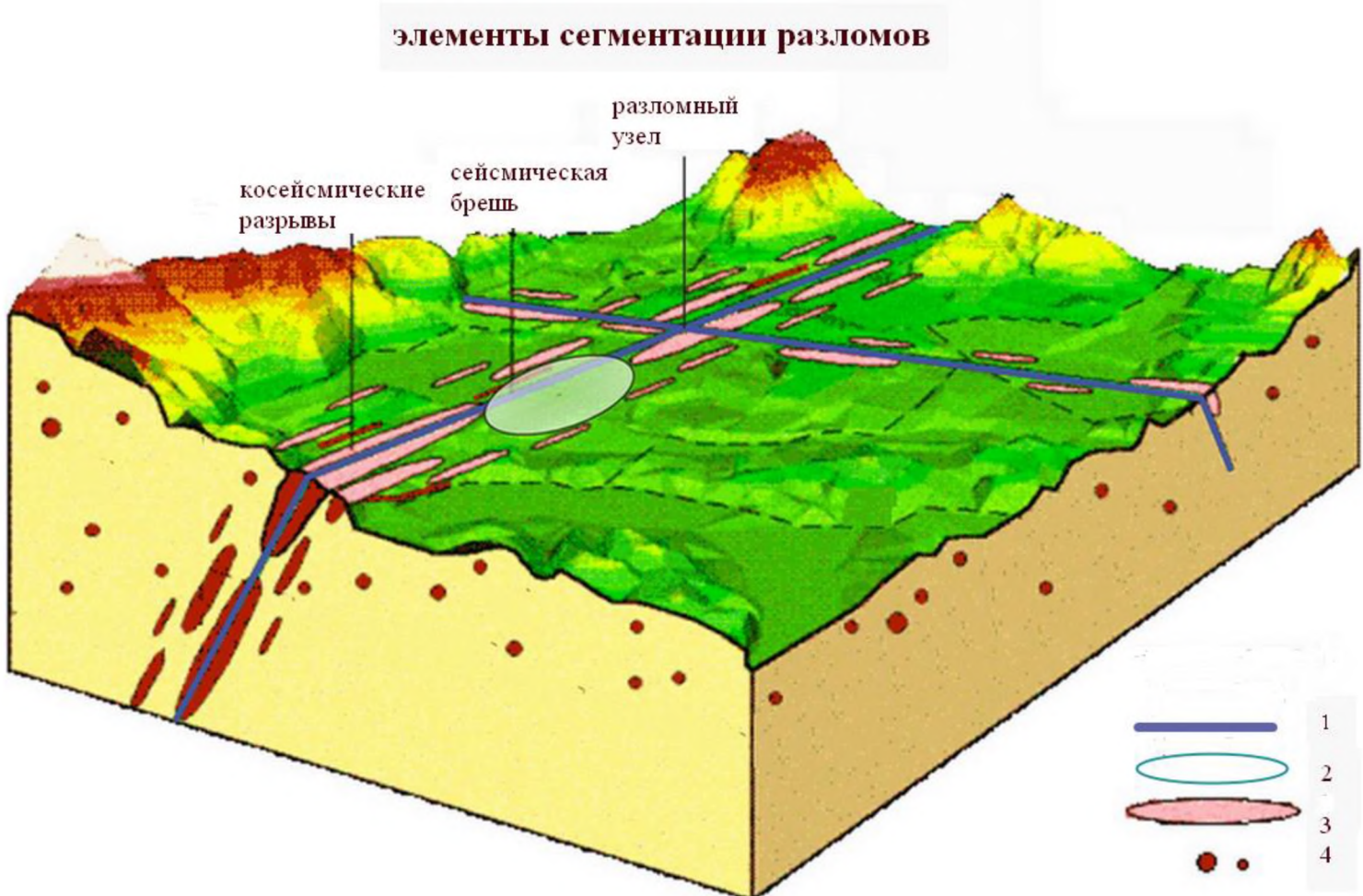
Рис. 1. Предшоковый сейсмический режим подготовки динамического срыва неровности под скользящей по шероховатой плоскости разлома. Путем фиксации параметров сейсмичности перед землетрясениями с  $K \geq 13$  за периоды ожидания 1-11 лет в различных районах Прибайкалья есть возможность получать сведения о прогнозируемых параметрах время (Т) и энергия (Е).

Рис. 2. Реальный режим подготовки Быстринского землетрясения 22.09.2020 г.,  $K=14.5$ . Подобные режимы двухстадийного сейсмического излучения не случайные эпизоды, а реальный природный механизм, широко распространенный в ледовой и геологической средах. Именно он фиксируется при анализе подготовки многих очагов землетрясений в БРЗ.

Сегодня 7/10/2022



При переходе к более детальному уточняющему анализу сейсмической опасности в Прибайкалье **следует рассмотреть современную модель строения сегментированного сейсмоактивного разлома с косейсмическими разрывами и сейсмической брешью (по линеаментно-фокальной модели В.И. Уломова с дополнениями)**

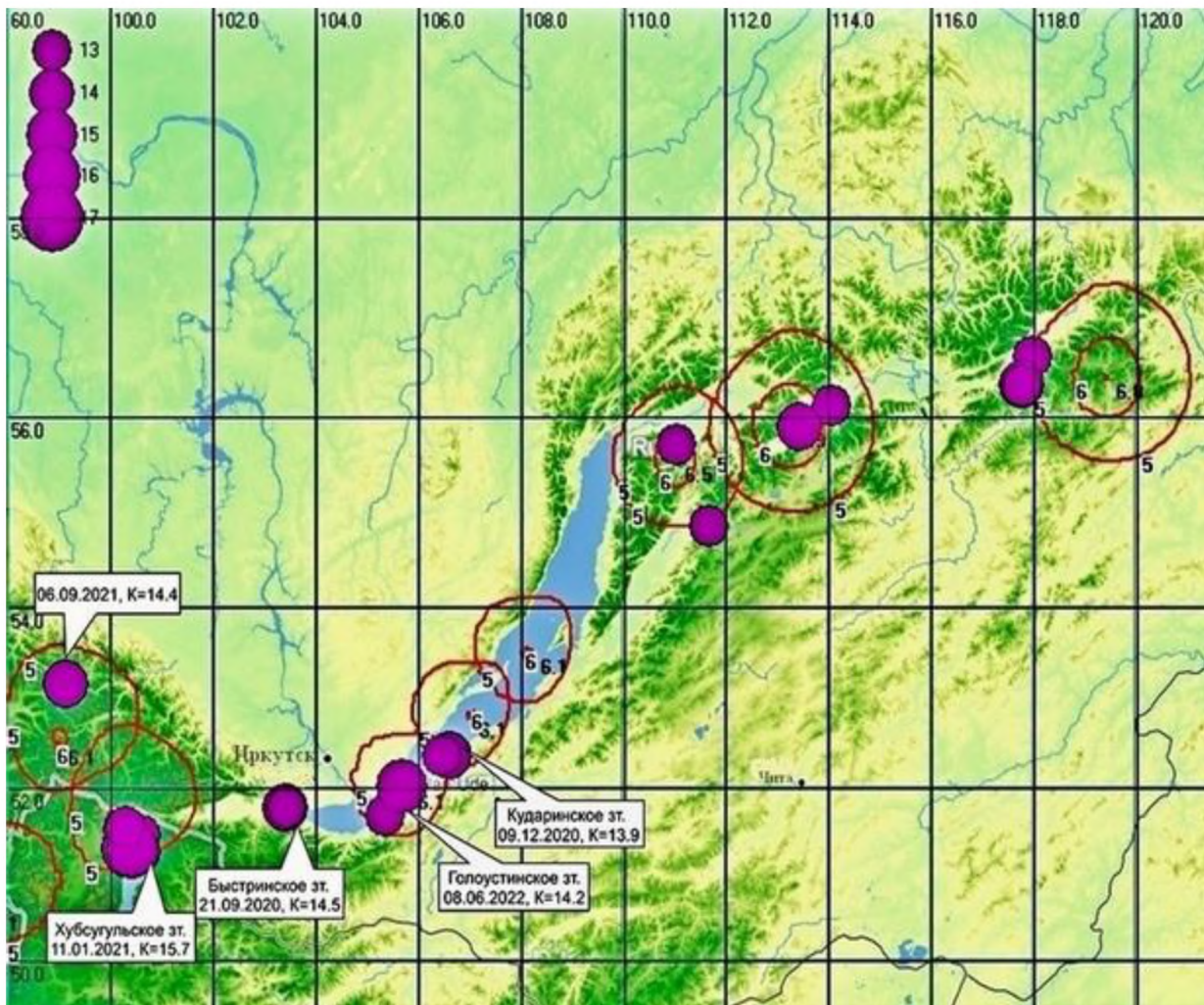




## Улучшенные результаты среднесрочного прогноза, полученные за период 18.10.2019 - 15.10. 2023 гг. в пределах БРЗ с энергий $K \geq 13$

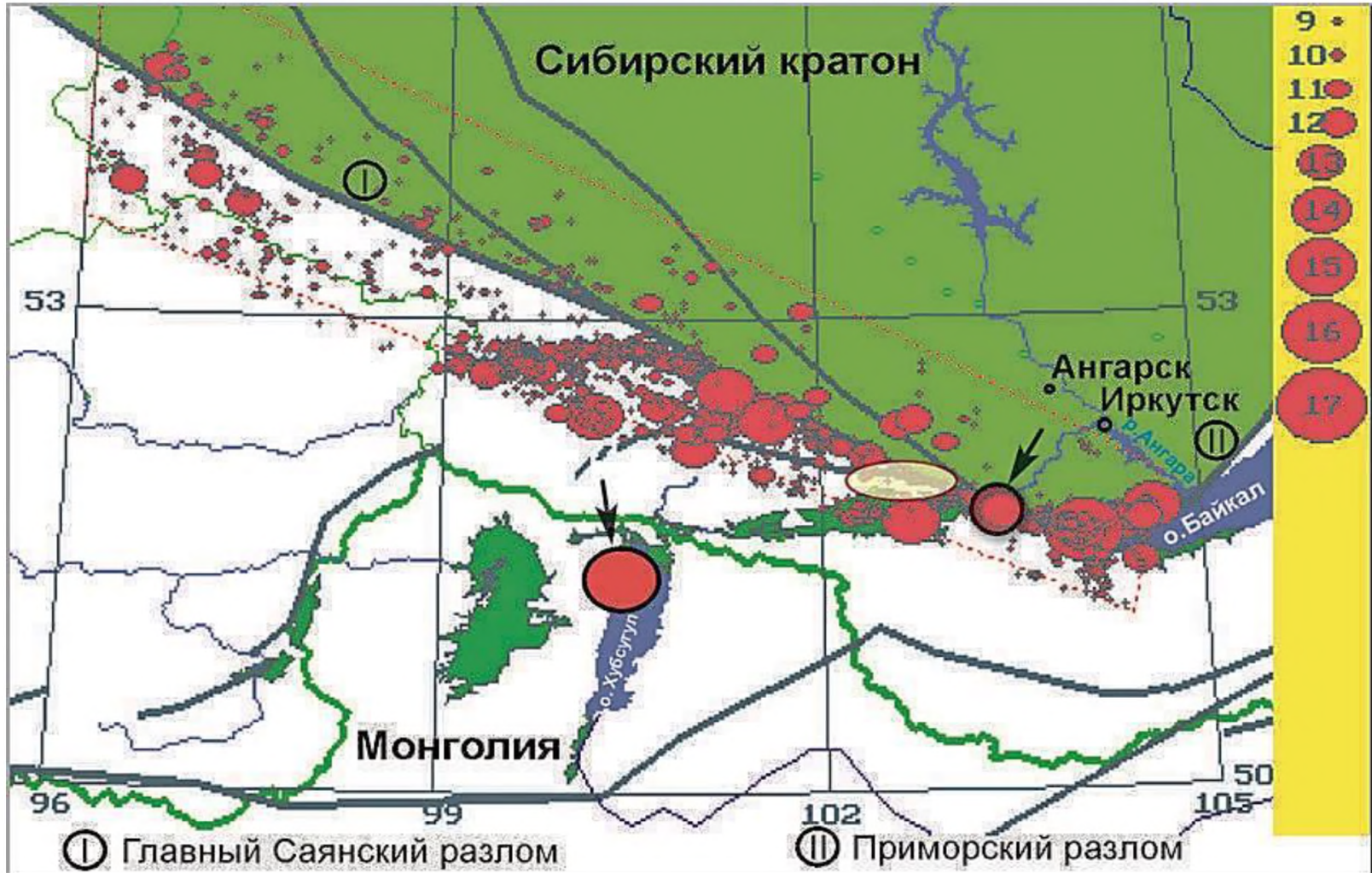
На карте **места прогнозируемых землетрясений с  $K \geq 13$  обозначены изосейстами**, начиная от 5-балльных значений и выше. В представленных в МЧС сводках землетрясения показаны в соответствии с их предполагаемой энергией. Красными кружками указаны эпицентры произошедших землетрясений с  $K \geq 13$  (согласно шкале в левом верхнем углу.

**Результаты прогноза. За 3-х летний период наблюдений в БРЗ произошло 33 события с  $K \geq 13$ . При учете численности самых сильных афтершоков Хубсугульского землетрясения с  $K \geq 13$  в указанные по прогнозу районы попало 76% событий.**



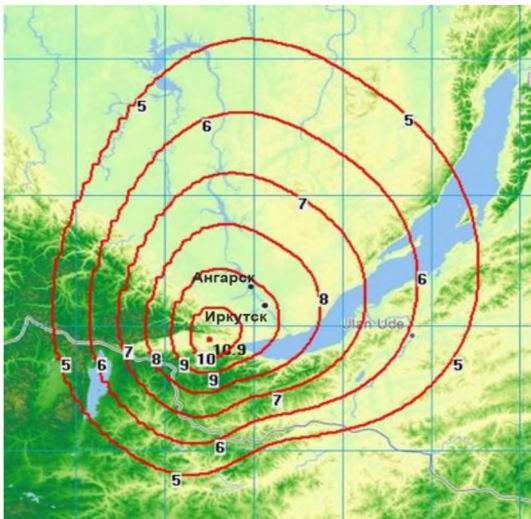


Полученные при прогнозе данные использовались нами для оценок сейсмической опасности в Прибайкалье по отношению к инфраструктуре г. Ангарска по результатам, изложенным в работе [Фролова, Малаева, Ружич, Бержинская, Левина и др., 2022, Москва). Оценивался уровень сейсмической опасности от близко расположенного сегмента Главного Саянского разлома в виде выявленной сейсмической бреши для Ангарска сформировавшийся за период 1950 -2021 гг.) На схеме показана сейсмическая брешь, которая отчетливо оформилась после Быстринского землетрясения 21.09.2020 ( $K=14.5$ ) в зоне Главного Саянского разлома.





## Результаты уточнения оценок сейсмической опасности для г. Ангарска



Полученные результаты среднесрочного прогноза использовались при анализе последствий возможного сценарного землетрясения, возникшего в опасной сейсмической бреше в зоне ГСР. Брешь располагается на удалении порядка 100 км от г. Ангарска. На карте Общего сейсмического районирования (ОСР-2016) зона ГСР на всем тысячекилометровом протяжении представлена как способная генерировать 9-10 балльные землетрясения с  $M$  8.0-8.2 при учете неоднозначных данных палеосейсмогеологии, что требует уточнения. Оценки периодов ожидания подобных сейсмических катастроф отсутствуют, что также приводит к неопределенности оценок сейсмической опасности, если судить по карте ОСР.

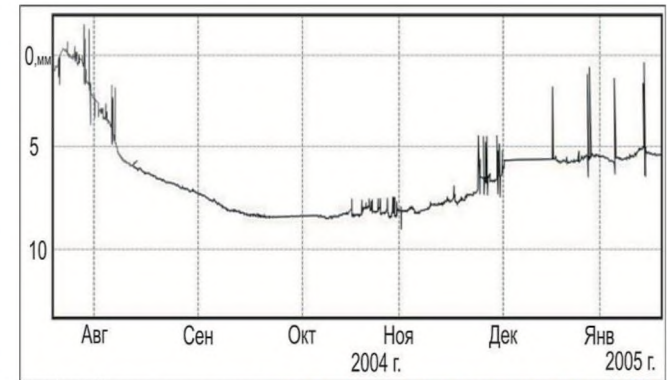
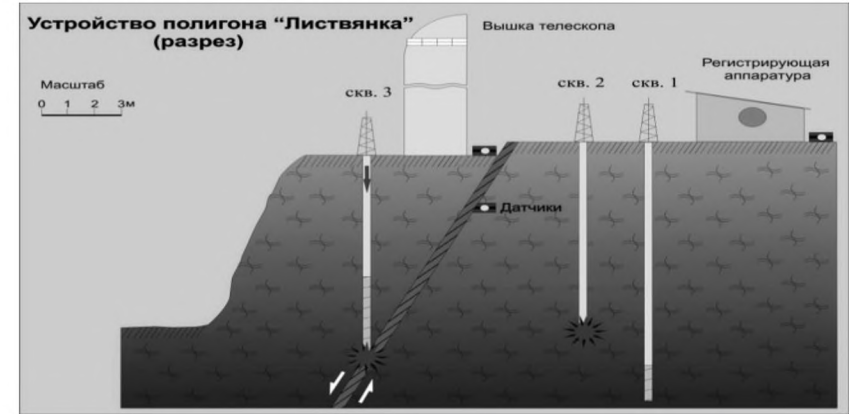
В порядке уточнения рассмотрен пример оценки сейсмической опасности с учетом сейсмической брешки протяженностью порядка 60 км. Согласно известным соотношениям  $L/M$ , взятым у авторов (Leonard, 2010; Ризниченко, 1975), получены следующие расчетные значения  $M(K)$ :  $M=7.1$  ( $K=15.8$ ) и  $M=7.8$ . ( $K=16.6$ ). Но неясно - на какой срок ожидания таких землетрясений следует рассчитывать 10, 50, 300 лет или “на все времена”?

При отсутствии возможности оценок длительности периодов ожидания подобных землетрясений (параметр  $T$ ) их можно восполнить полученными с использованием распределения Пуассона значениями вероятностей возникновения опасных для г. Ангарска землетрясений: при  $M=7.1$  в периоды ожидания 10 и 50 лет вероятности будут иметь соответственно следующие значения:  $P=0.36$  и  $0.89$ . При длительности периода ожидания 300 лет, вероятность возникновения события с  $K=16$  возрастет до  $P=0.89$ , а при более редком сильном землетрясении  $K=17$  - до  $P=0.28$ . На этом примере для г. Ангарска рассматривались возможности уточнения оценок сейсмической опасности и сейсмического риска, дополняя таким образом данные ОСР.

На рис. показаны расчетные изосейсты возможного наиболее опасного события с  $K=17$ . С учетом разработанной авторами динамической модели спадания балльности сотрясений в разных направлениях и на удалениях от эпицентра, на территории г. Ангарска максимальная сейсмическая интенсивность сотрясений может достигать 8 баллов по шкале MSK-64 при средних грунтовых условиях [Фролова, Малаева, Ружич и др. 2022]. В приведенном примере сценарного землетрясения показаны уточненные результаты оценок сейсмической опасности. Встает вопрос о том, что можно предпринять при ожидании подобных опасных событий.



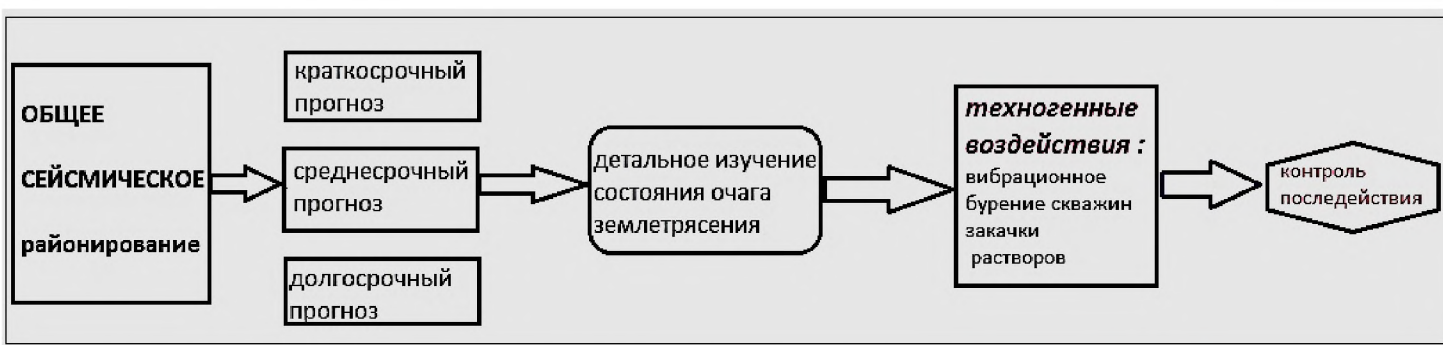
**Обратимся к опыту проведенных ранее натурных испытаний в сегментах разломов путем воздействия на сегмент Ангарского разлома на полигоне в Листвянке с участием ученых международных коллективов ученых ИДГ, ИФПМ, Берлинского технического Университета. На нем проводилось изучение возникающих режимов природных и наведенных микроземлетрясений с контролируруемыми взрывными, вибрационными и гидравлическими воздействиями на сегмент Ангарского разлома. (Южный Байкал, 1995-2022 гг.).**



**Рис.2.График отклика участка разлома на воздействия в виде ударов копра, закачек жидкости в разлом и умеренных взрывов в скважинах. Этими воздействиями за счет инициированного вязко-пластического ускоренного крипа было достигнуто безопасное снижение энергии микросейсмических землетрясений до фонового уровня на многие годы.**

**После того как в 1999 г. впервые были установлены в разломе изготовленные высокоточные датчики для измерения микросмещений в разломах, было обнаружена очень высокая чувствительность разрывов к внешним динамическим воздействиям. Возникла идея о возможности управления режимом генерации сейсмических колебаний путем динамических воздействий. Были осуществлены контролируемые ударные и взрывные, а также виброимпульсные воздействия. Вместе с этим осуществлялись закачки растворов в сегмент Ангарского разлома через пробуренные скважины (Рис.1). В итоге, экспериментально и численным моделированием было доказано, что рассчитанными техногенными воздействиями можно регулировать режимы генерации землетрясений в сторону снижения энергии максимальных сейсмических импульсов и перевода в режимы ускоренной ползучести. (Рис. 2). Этот результат одобрен на заседании Президиума СО РАН и впервые для России запатентован в 2006 г.**





На блок-схеме показано, что после ОСР три вида прогноза землетрясений следует рассматривать как **необходимое звено в стратегии обеспечения сейсмической безопасности. Однако, уточнение прогноза даже в весьма успешном исполнении малоэффективно и не избавляет от разрушений и гибели местного населения.** Прогноз позволяет выявлять места готовящихся в ближайшей перспективе очагов землетрясений и оценивать ущерб от предстоящих разрушительных землетрясений.

**Для снижения параметров сейсмической уязвимости далее в этих местах целесообразно было бы проводить детальное изучение режима подготовки события и уточнения параметров излучения сейсмических колебаний, отчасти это предусмотрено в требованиях ДСР.** При уточнении уровня опасности в случае ее нарастания следует осуществлять выбор средств снижения сейсмического риска (ущерба) или смягчения последствий.

**В ИЗК при многолетнем сотрудничестве с другими коллективами ученых в России и зарубежья разрабатывается наиболее перспективный способ техногенных воздействий на выявленные при прогнозе опасные сегменты разломов: в виде вибраций и прерывистых режимных закачек буровых растворов через глубокие скважины для замедленного расходования избыточной упругой энергии от накопленных деформаций в породных массивах при скольжении в режиме ускоренной ползучести.** Для дальнейшей разработки данного подхода необходимы крупномасштабные и дорогостоящие испытания на безопасных полигонах.

Сотрудниками ИЗК за 2021 -2022 гг. при разработке способов демпфирования разрушительных землетрясений получены 3 патента РФ. Работы по данной теме вызывают большой интерес общественных кругов в зарубежных странах.



***Спасибо за проявленное внимание  
к проблемам среднесрочного  
прогноза землетрясений и  
обеспечения сейсмобезопасности в  
Прибайкалье!***

***Мы готовы быть полезными для  
строителей.***