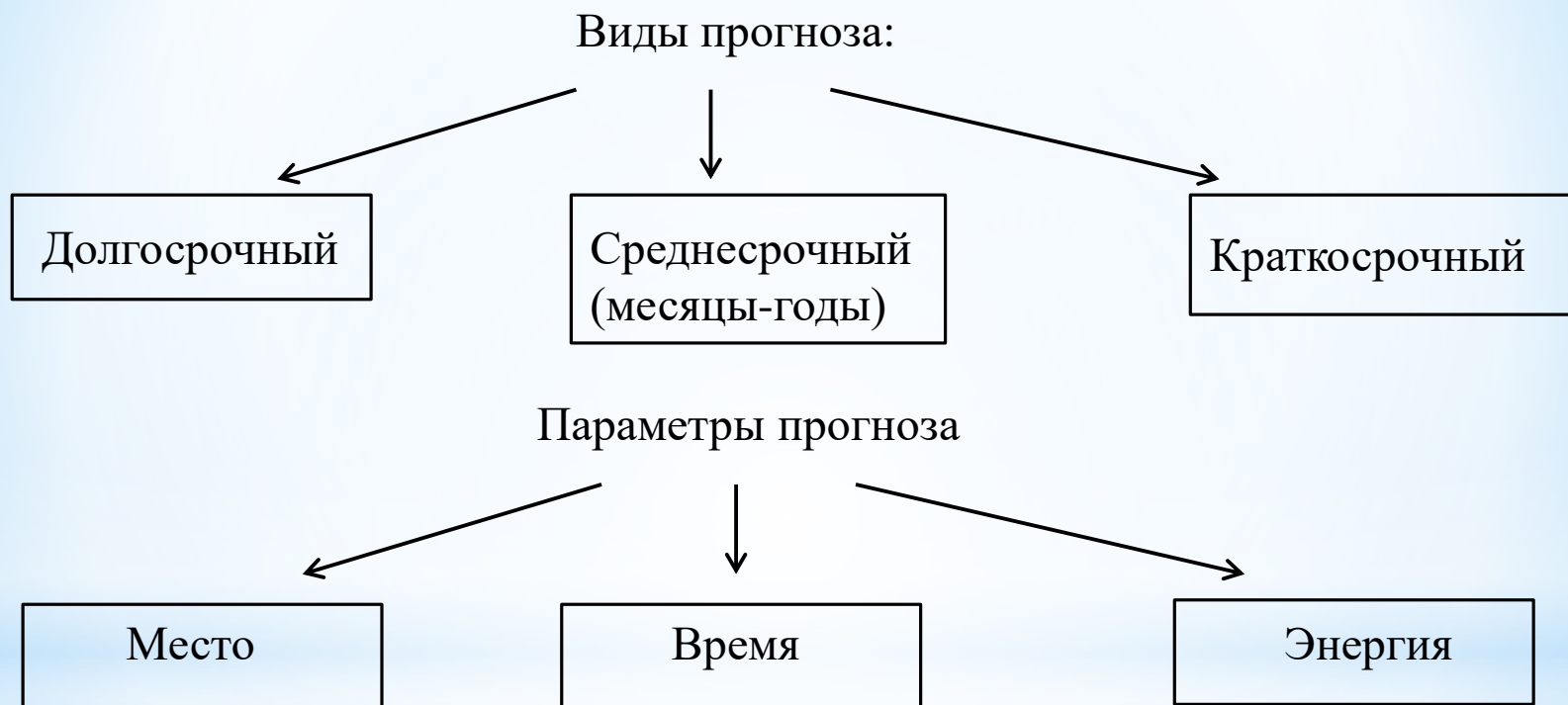


**Формализация определения некоторых
сейсмогеологических признаков подготовки
землетрясения на примере Байкальской
рифтовой зоны**

Е.А. Левина, В.В. Ружич

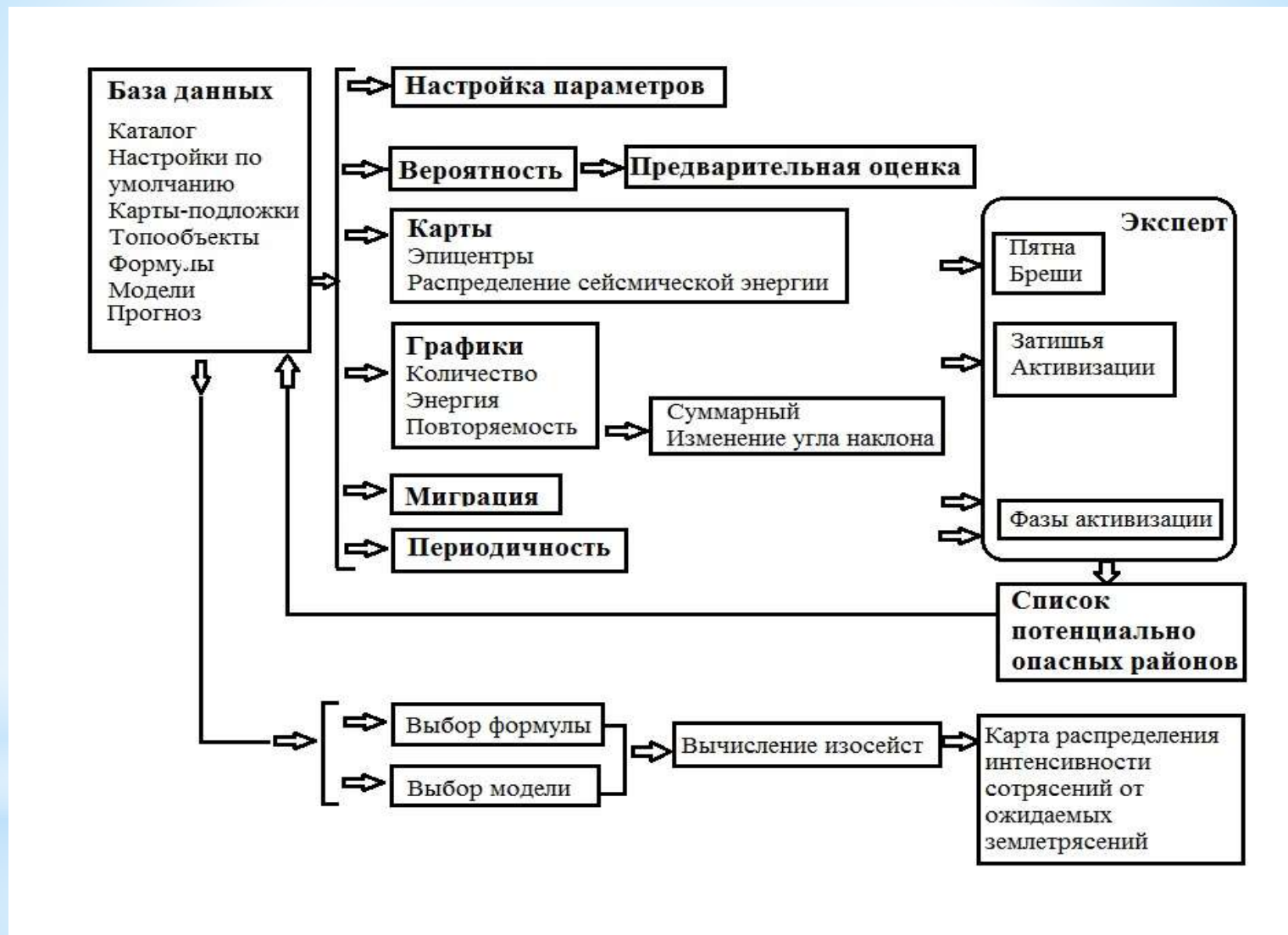
Институт земной коры, СО РАН, Иркутск, Россия

Как известно, прогноз может быть краткосрочным (дни, часы), среднесрочным (месяцы, годы) и долгосрочным (десятилетия). До сих пор некоторые успехи достигнуты в двух последних видах прогноза, но достижение приемлемых результатов в краткосрочном прогнозе представляется маловероятным в обозримом будущем.



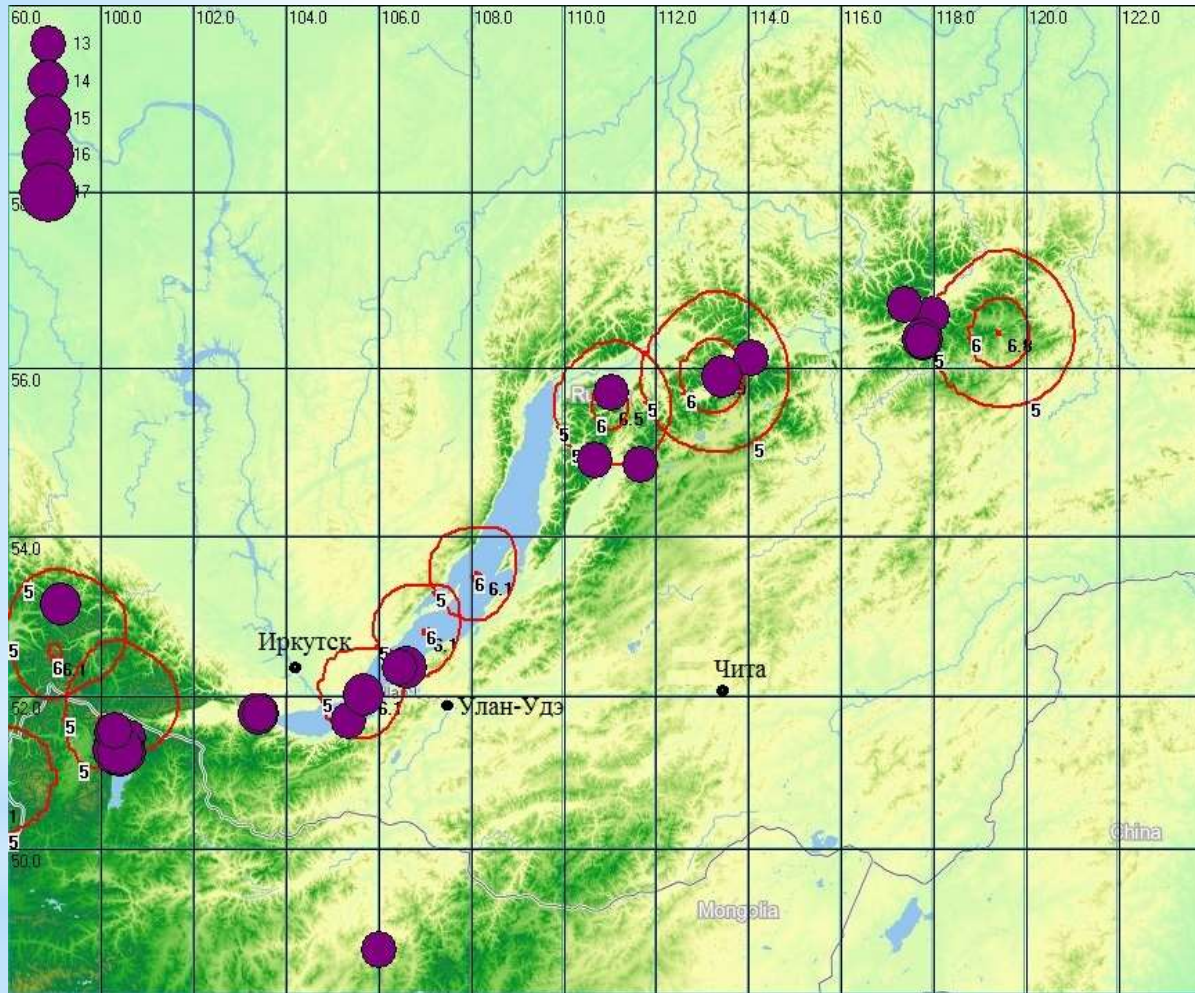
Любой прогноз должен содержать три параметра – указание на место («М»), энергию («Е») и время («Т») ожидаемого землетрясения. Наиболее сложно определяемым является параметр «Время».

Для целей среднесрочного прогноза разработана ГИС «Prediction», схема алгоритма которой представлена на этом слайде.



Рассматриваемая ГИС является экспертной системой, то есть результат ее работы представляется в виде набора карт и графиков, которые анализируются экспертом и им же определяются места возможных землетрясений.

Координаты мест возможных землетрясений заносятся в базу данных ГИС и по ним строится карта, где указаны потенциально опасные районы, ограниченные изосейстами 5 баллов.



Карта потенциально опасных районов, ограниченных изосейстами сейсмических сотрясений 5 баллов (составлена 18.10.2019).

Многолетний опыт среднесрочного прогноза землетрясений с $K \geq 13$ для Байкальской рифтовой зоны (БРЗ), показывает, что средний показатель удачности прогноза по параметру «Место» составляет 70%.

Экспертные системы имеют свои достоинства и недостатки. Главное достоинство: эксперт использует свой опыт, который не всегда удается формализовать. Но это же является и главным недостатком, так как в прогноз вносится элемент субъективности.

Предпринятая в данной работе попытка формализовать процедуру составления прогноза основана на методе распознавания образов. В качестве прогнозных признаков рассматривались:

- 1 - наличие сейсмической брешы,
- 2 - наличие предшоковой активизации,
- 3 - наличие сейсмоактивного разлома или разломного узла.

Использовался каталог землетрясений БРЗ, предоставленный Байкальским филиалом Геофизического центра СО РАН (г. Иркутск).

Геологический признак 3 не связан прямо с каталогом землетрясений и для его учета необходима оцифрованная карта ранжированных по протяженности сейсмоактивных разломов для определения наличия активного разлома в рассматриваемой пространственной ячейке.

Каталог землетрясений фактически является представленной в табличной форме функцией вида

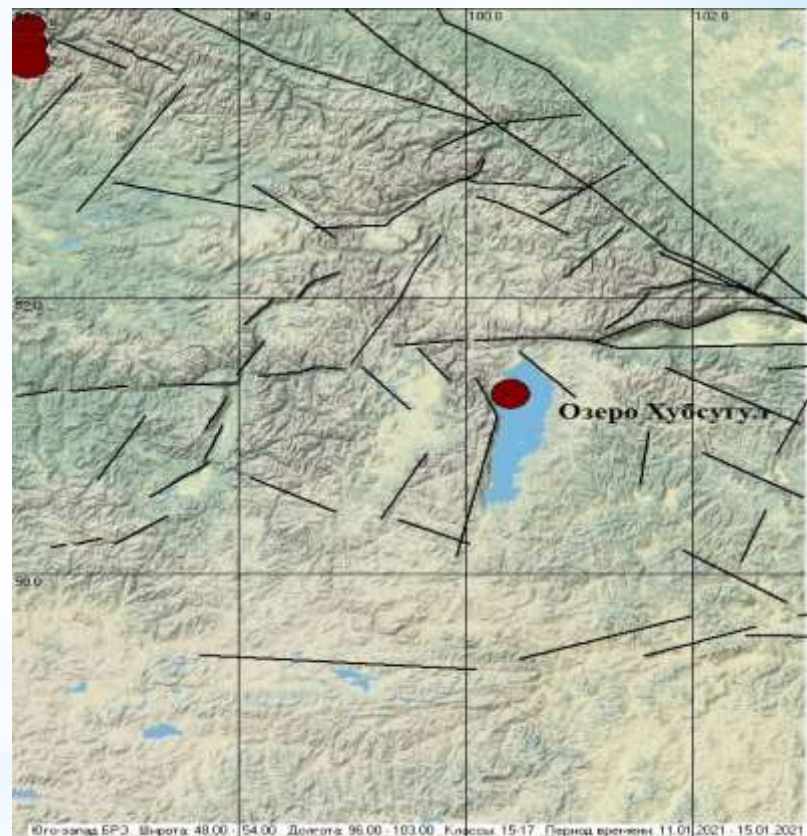
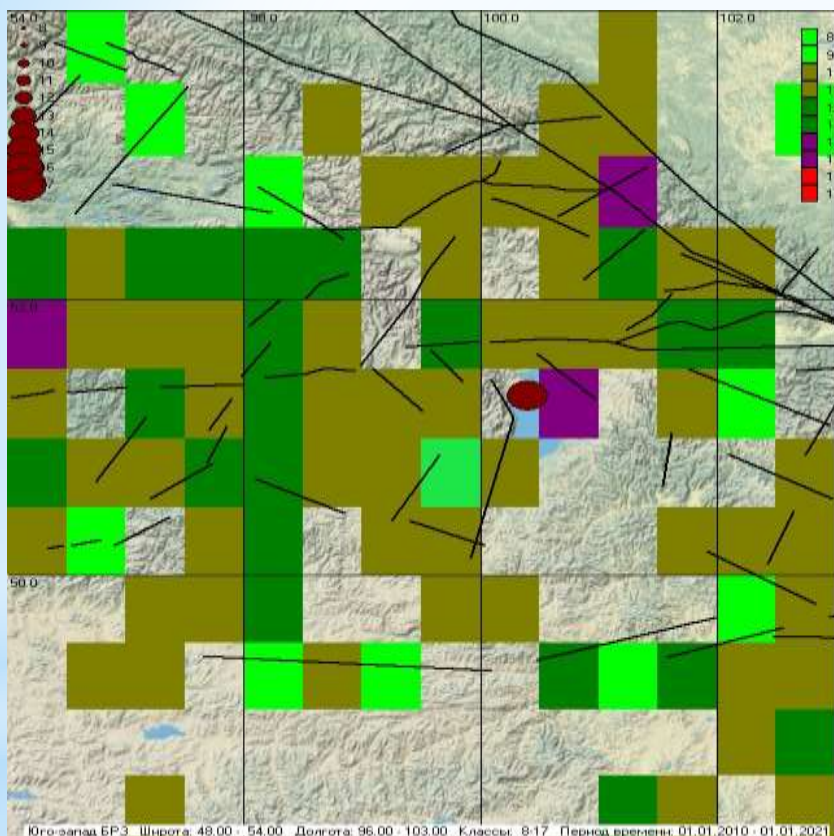
$E=f(\varphi,\lambda,t)$, где E – энергия события, φ , λ – его географические координаты, t – время, когда событие произошло.

Используется метод фиксации одной или двух переменных в определенном диапазоне значений и рассматривается изменение остальных переменных.

В качестве примера рассмотрено

Хубсугульское землетрясение 11.01.2021 года ($K=15.7$).

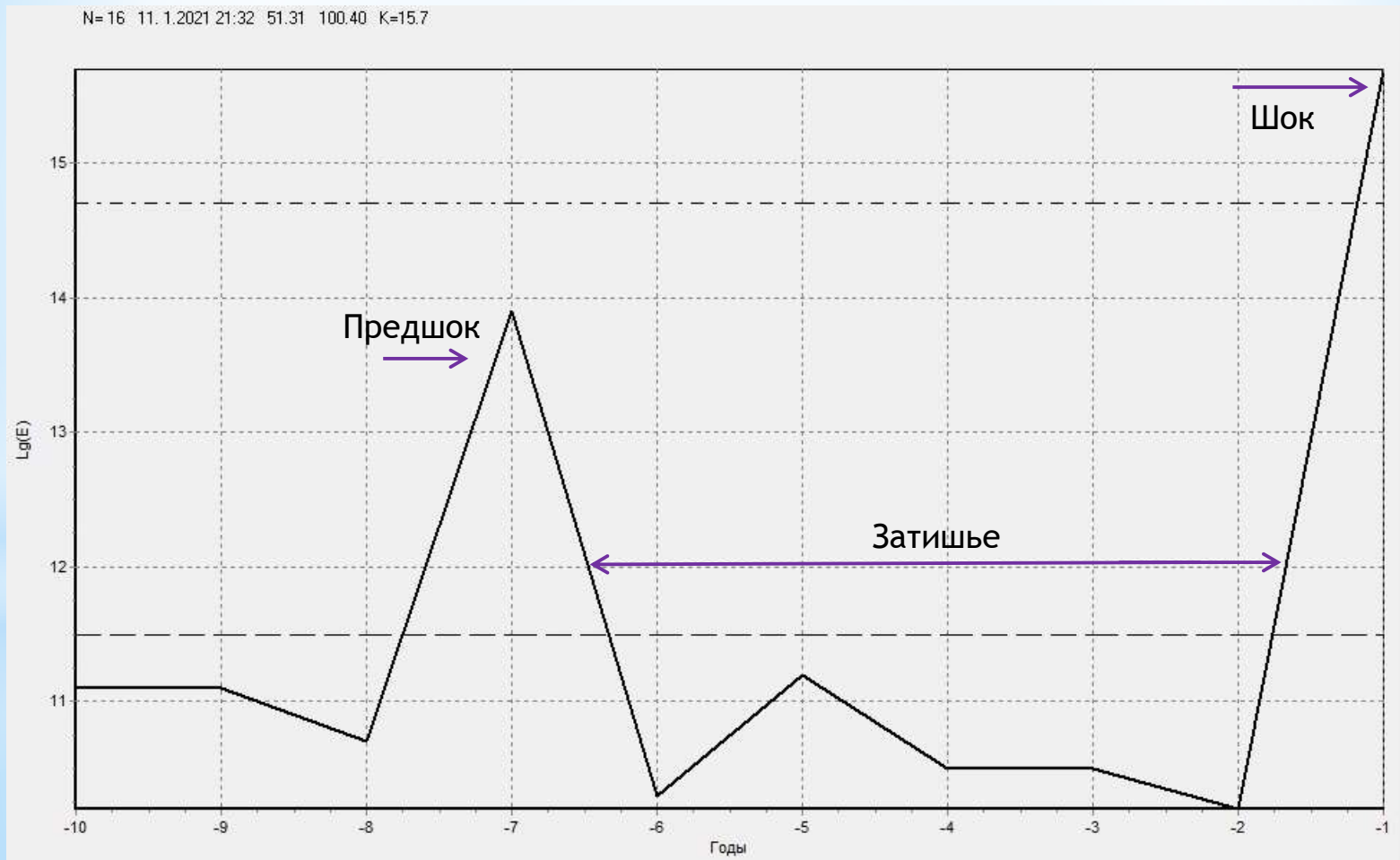
Справа – карта юго-западного фланга БРЗ (район озера Хубсугул). Черными линиями показаны разломы, красным кружком – эпицентр Хубсугульского землетрясения 11.01.2021 года ($K=15.7$). Слева - карта распределения выделившейся сейсмической энергии в том же районе БРЗ за интервал времени 2010-2020 гг., подсчитанного с помощью квадратного окна со стороной 0.5° .



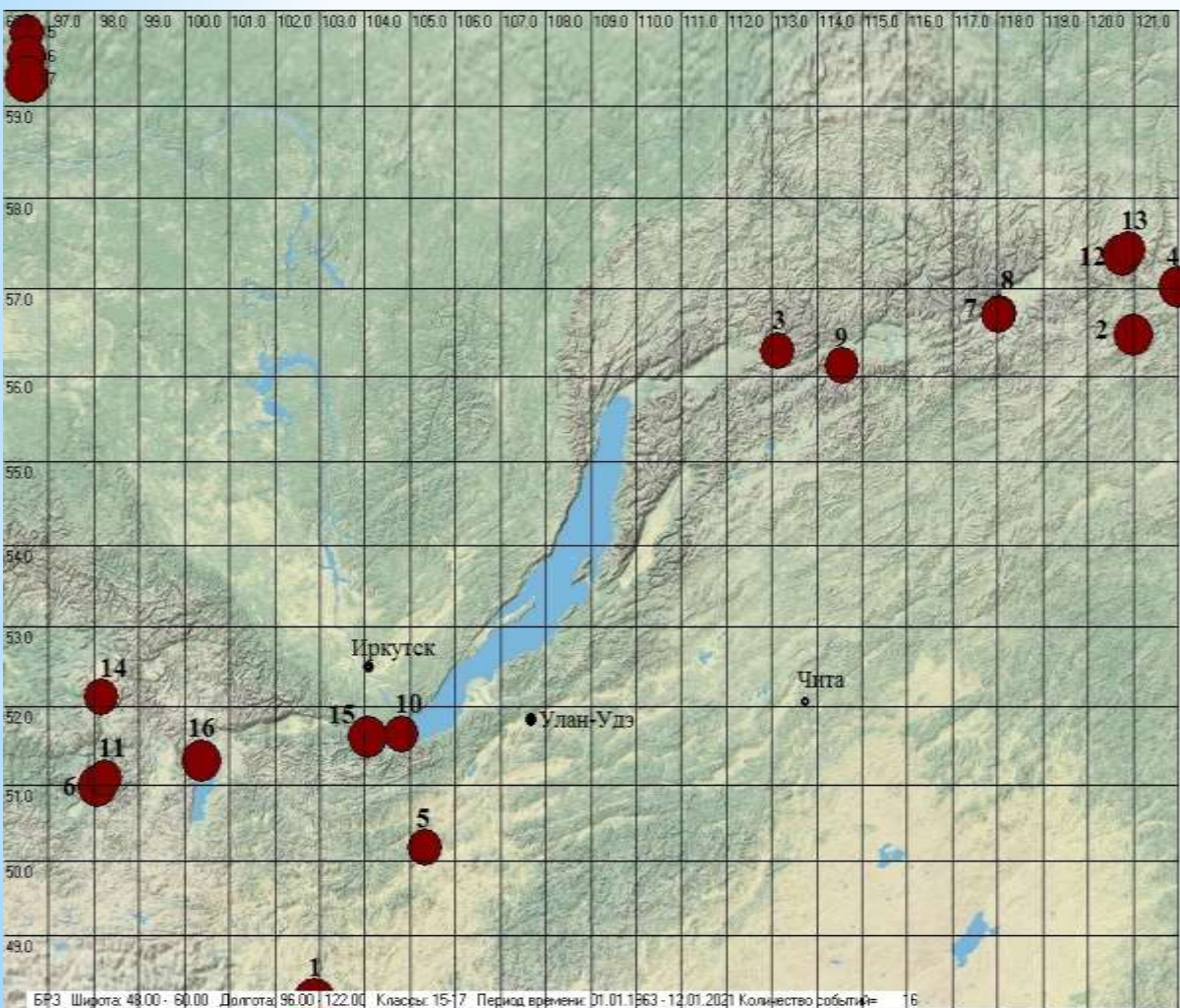
Видно, что землетрясение произошло в районе сейсмической брешы, расположенной на месте пересечения субмеридионального активного Хубсугульского разлома и локального разлома северо-западного направления. Брешь сформировалась как минимум за 11 лет до события.

В соответствии с двухстадийной моделью подготовки землетрясения для этого же события строился график распределения выделившейся сейсмической энергии за 11 лет до него с временным шагом 1 год в квадратной ячейке с центром в эпицентре землетрясения и со стороной 2° .

Предшоковая стадия с $K_{пр}=14$ явно присутствует за 7 лет до основного события, а отношение энергии максимального землетрясения предшоковой стадии $K_{пр}$ и энергии произошедшего землетрясения K_3 составляет $K_3/K_{пр} \approx 1.12$.



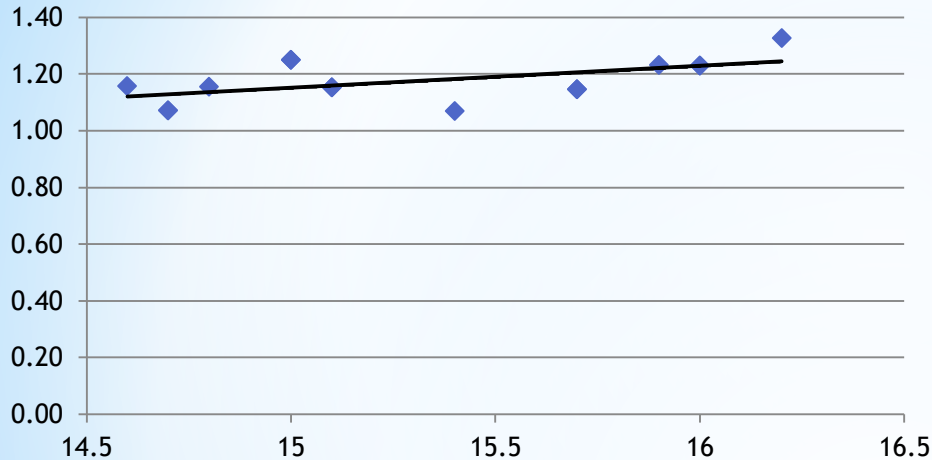
Подобные расчеты, сделанные для всех событий с $K \geq 15$, произошедших в БРЗ с 1963 по 2022 годы, показали, что рассмотренный метод позволяет формализовать поиск мест возможных землетрясений: все они произошли либо в самой брешу, либо в ячейке активизации, соседней с брешью.



№	Время	Координаты	Класс
1	5.01.1967	48.10 102.90	17.0
2	18.01.1967	56.48 121.00	16.0
3	4.01.1989	56.29 113.12	15.0
4	21.04.1989	57.02 122.00	16.0
5	13.05.1989	50.17 105.34	15.0
6	27.12.1991	50.98 98.08	16.2
7	26.04.1994	56.72 118.04	14.7
8	21.08.1994	56.70 118.03	15.4
9	13.11.1995	56.13 114.55	15.1
10	25.02.1999	51.64 104.82	14.6
11	27.04.2005	51.09 98.25	14.7
12	10.11.2005	57.37 120.77	15.7
13	11.12.2005	57.43 120.90	14.8
14	16.08.2008	52.13 98.17	15.1
15	27.08.2008	51.61 104.07	15.9
16	11.01.2021	51.31 100.40	15.7

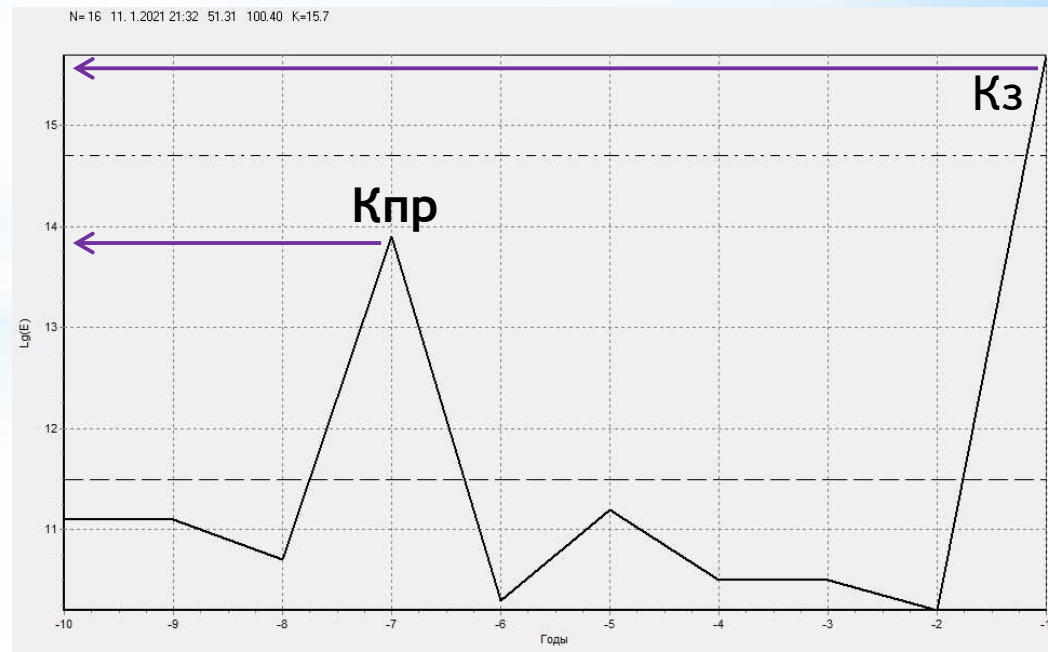
Соотношение энергетических классов предшоковой стадии и последующего землетрясения

$K_3/K_{пр}$



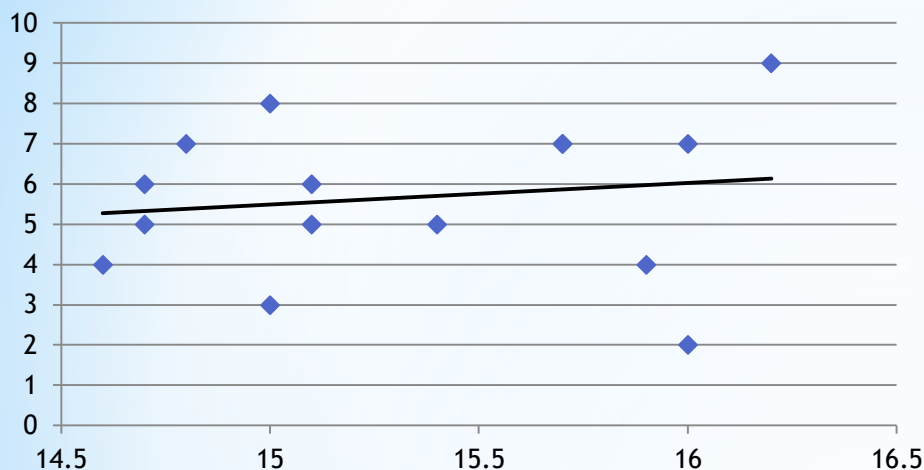
K_3 - энергетический класс произошедшего землетрясения,
 $K_{пр}$ - класс предшоковой стадии,
среднее $K_3 / K_{пр} = 1.18 (0.01)$,
медиана = 1.16.

Таким образом выявленное соотношение пригодно для оценки энергии ожидаемого землетрясения по энергии предшоковой стадии.



Соотношение между временем затишья и энергией последующего землетрясения

Затишье

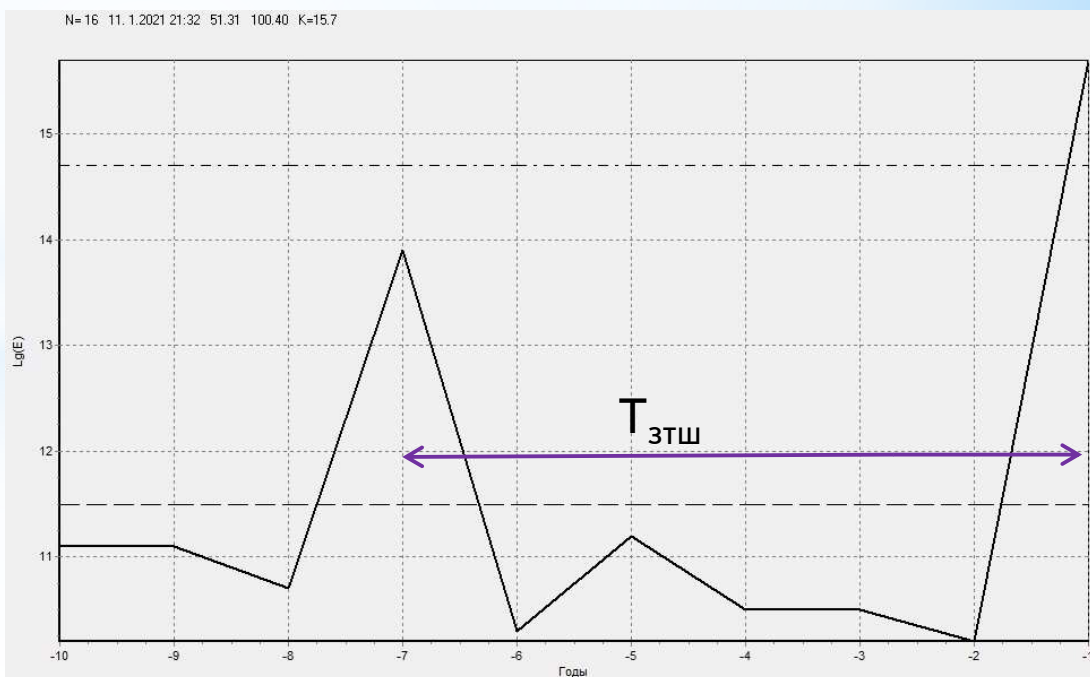


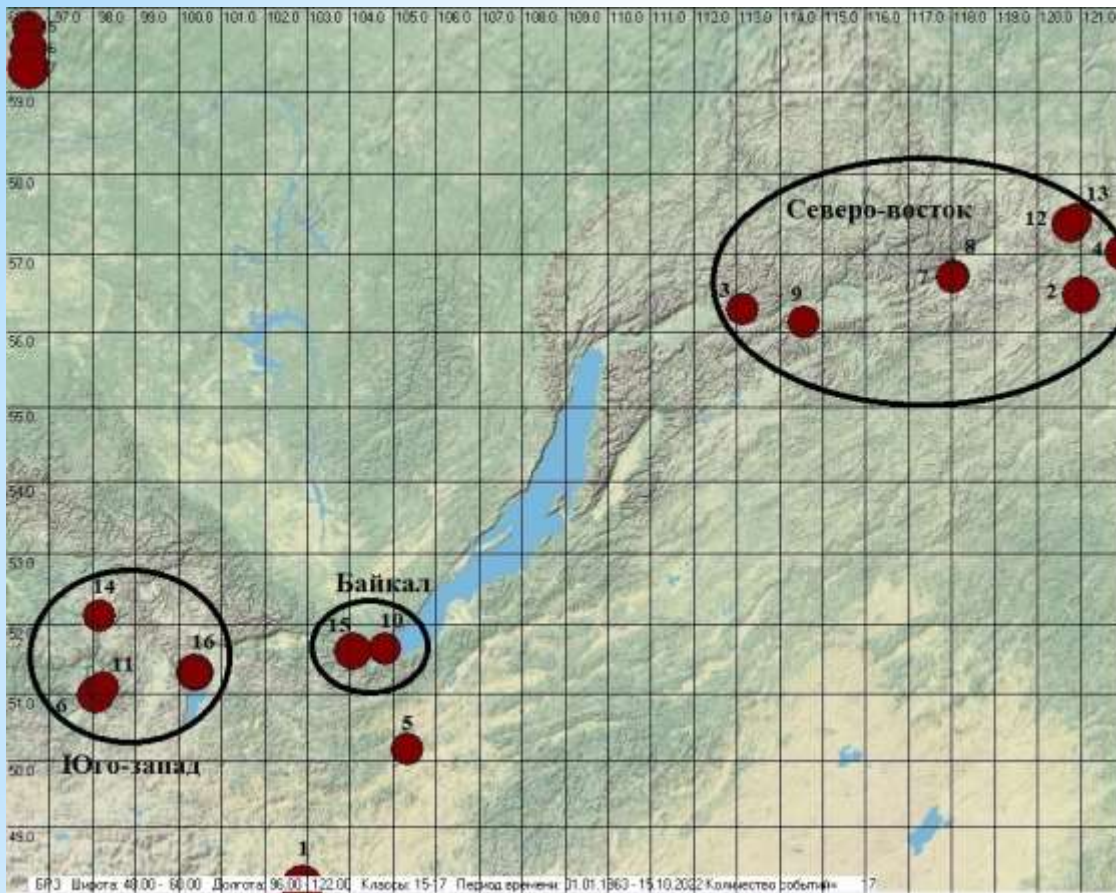
Средняя длительность затишья $T_{зтш} = 5.7$ (3.4) лет,
медиана = 6 годам.

Разброс длительности затишья достаточно большой, поэтому связь длительности затишья с энергией ожидаемого землетрясения, нельзя считать надежной.

Тем не менее разброс времени ожидания от 2 до 9 лет вполне укладывается в рамки среднесрочного прогноза.

Но для уточнения параметра «Т» необходимо привлекать дополнительную информацию.





Юго-запад (4 события):

$K_3 / K_{пр} = 1.17 (0.01)$, медиана = 1.15.

$T_{зтш} = 7 (1.5)$ лет, медиана = 6.5 лет.

Байкал (2 события):

$K_3 / K_{пр} = 1.2 (0)$, медиана = 1.2.

$T_{зтш} = 4 (0)$ года, медиана = 4 года.

Северо-восток (8 событий):

$K_3 / K_{пр} = 1.16 (0.004)$, медиана = 1.15.

$T_{зтш} = 5.75 (3.2)$ лет, медиана = 6 лет.

БРЗ можно разделить на три субрегиона: ЮЗ и СВ фланги и центр – Байкал, различающиеся геодинамической обстановкой.

Видно, что на Байкале среднее время ожидания меньше, а $K_3 / K_{пр}$ больше, чем на флангах.

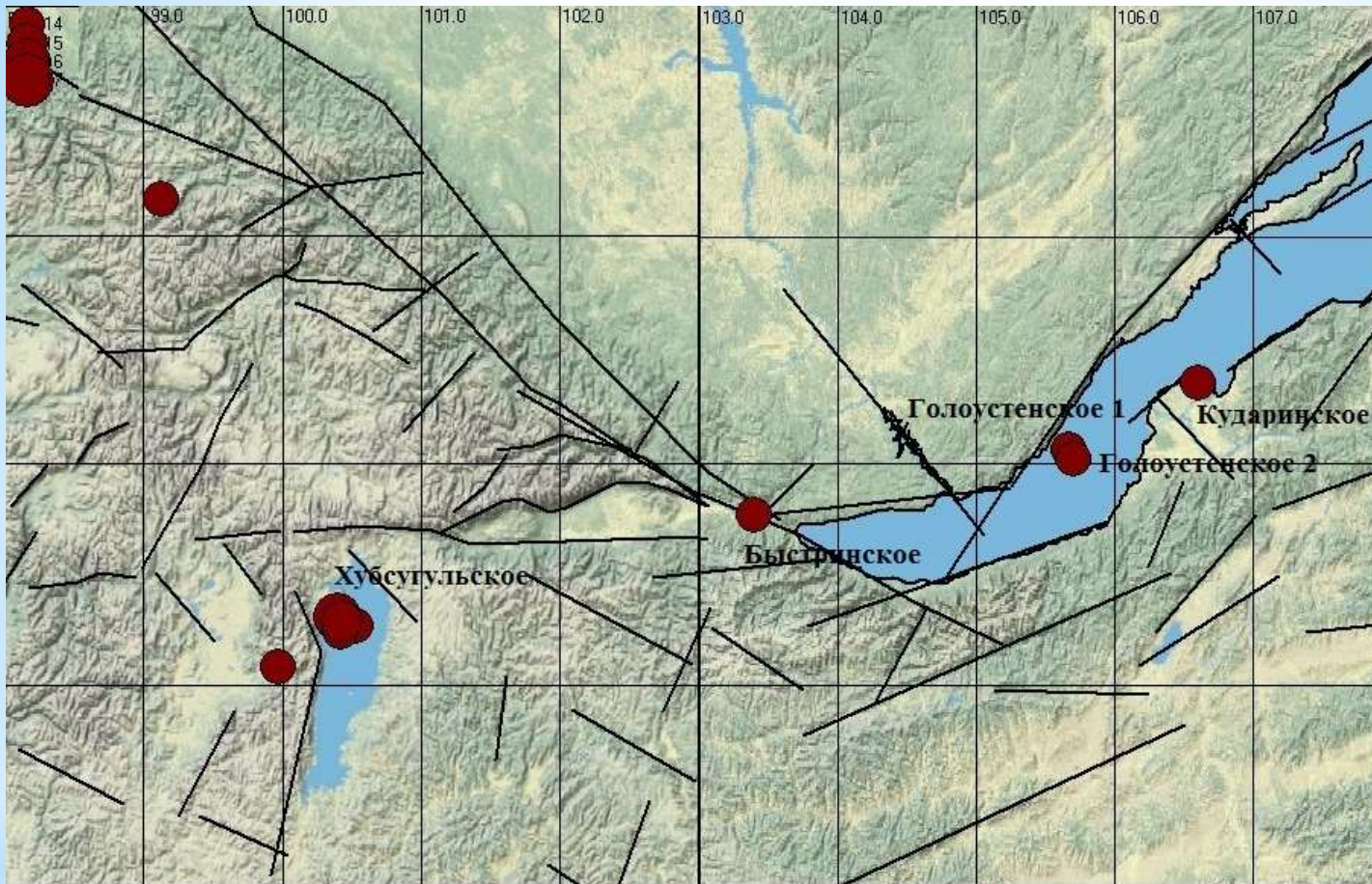
К₃/К_{пр}



Затишье



Землетрясения 2020-2022 годов с $K \geq 14$

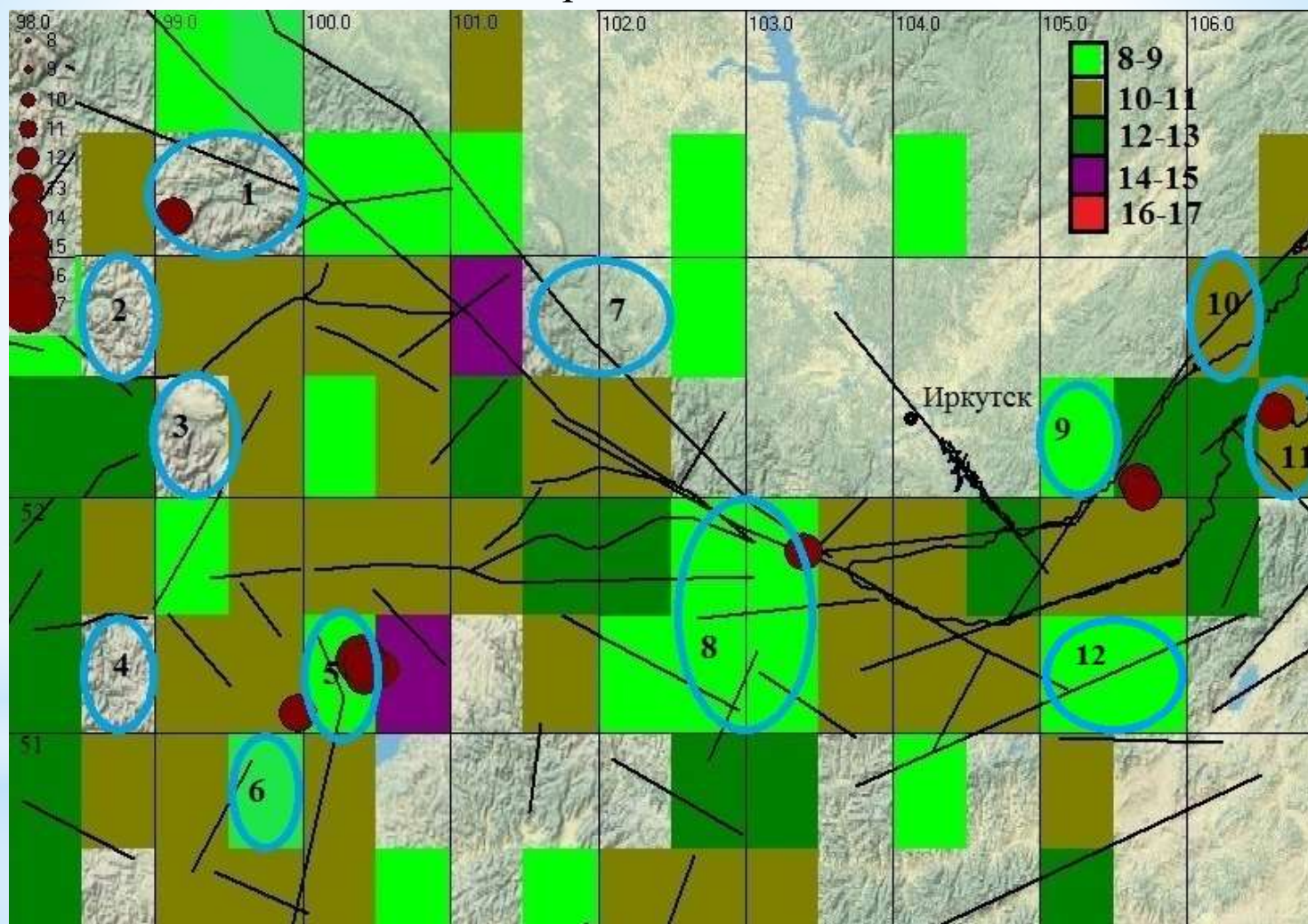


Все выше приведенные расчеты сделаны ретроспективно.

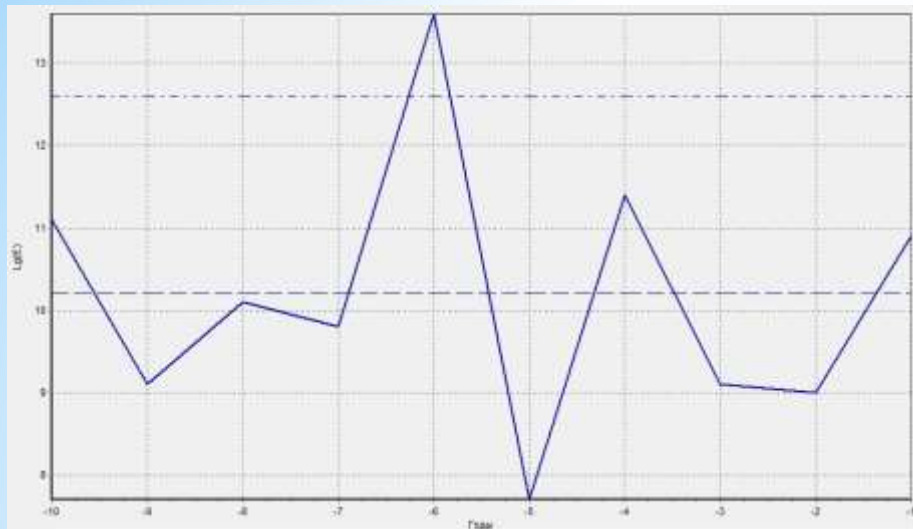
Но 2020-2022 годах в БРЗ произошло 5 сильных землетрясений. Это позволяет произвести имитацию прогноза «вперед».

21.09.2020	51.77	103.40	14.5	Быстринское
9.12.2020	52.36	106.60	13.9	Кударинское
11.01.2021	51.31	100.40	15.7	Хубсугульское
8.06.2022	52.06	105.67	14.3	Голоустиенское1
14.10.2022	52.02	105.70	14.1	Голоустиенское2

Распределение сейсмической энергии за период
01.09.2009 – 01.09.2020 (окно 0.5°), выделенные бреши и произошедшие позже
землетрясения с $K \geq 14$



Из 12 выделенных брешей за прошедшие 3 года землетрясения произошли в 5.



В брешах 2, 3, 4, 6, 7, 10 и 12 землетрясения пока не произошли. Для каждой из них построено распределение сейсмической энергии в ячейке со стороной 2° с центром в выявленной сейсмической бреши.

Представлен график для брешы № 7.

Юго-запад

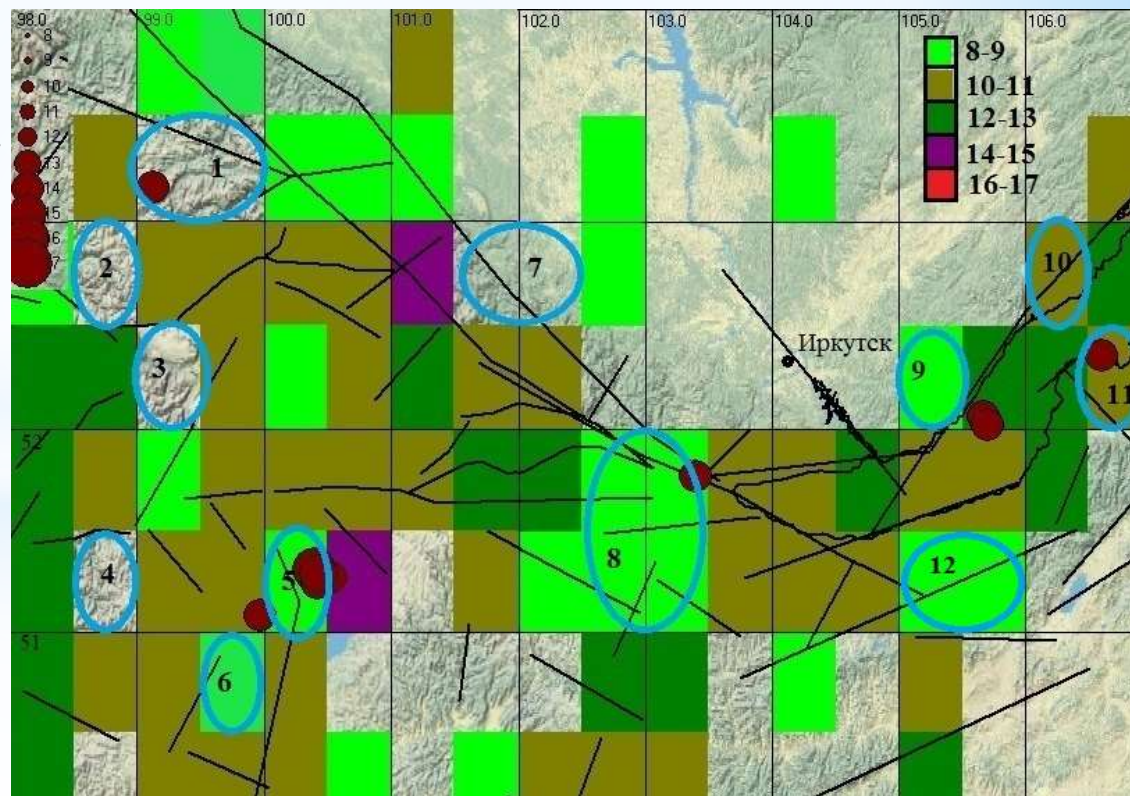
$K_3 / K_{пр} = 1.17 (0.01)$, медиана = 1.15.

$T_{зтш} = 7 (1.5)$ лет, медиана = 6.5 лет.

$K_{пр} \approx 13.5$,

ожидаемый $K_3 \approx 15.5$.

Брешь №7 – наиболее явный кандидат на возможное землетрясение с $K=15$ в ближайшие годы.



Выводы

1. Формализованное выделение сейсмических брешей в сочетании с наличием сейсмоактивного разлома или разломного узла позволило установить, что все события с $K \geq 15$, произошедшие в БРЗ с 1963 по 2022 годы, произошли либо в самой брешии, либо в ячейке активизации, соседней с брешью.
2. В ряде выделенных таким образом мест землетрясения так и не произошли (или еще не произошли): то есть эти признаки являются необходимым, но не достаточным условием для реализации землетрясения.
3. Так же для всех событий с $K \geq 15$ имела место предшоковая активизация. Анализ показал, что соотношение энергии предшоковой стадии и самого шока различается в разных частях БРЗ и его можно использовать для оценки энергии ожидаемого события.
4. Связь длительности сейсмического затишья с энергией последующего землетрясения определяется менее надежно и для уточнения времени ожидания требуется дополнительная информация.

Благодарю за внимание!