



*III Всероссийская научная конференция с международным участием
«Современные методы оценки сейсмической опасности и прогноза
землетрясений», посвященная памяти чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н.
Александра Анатольевича Соловьева*

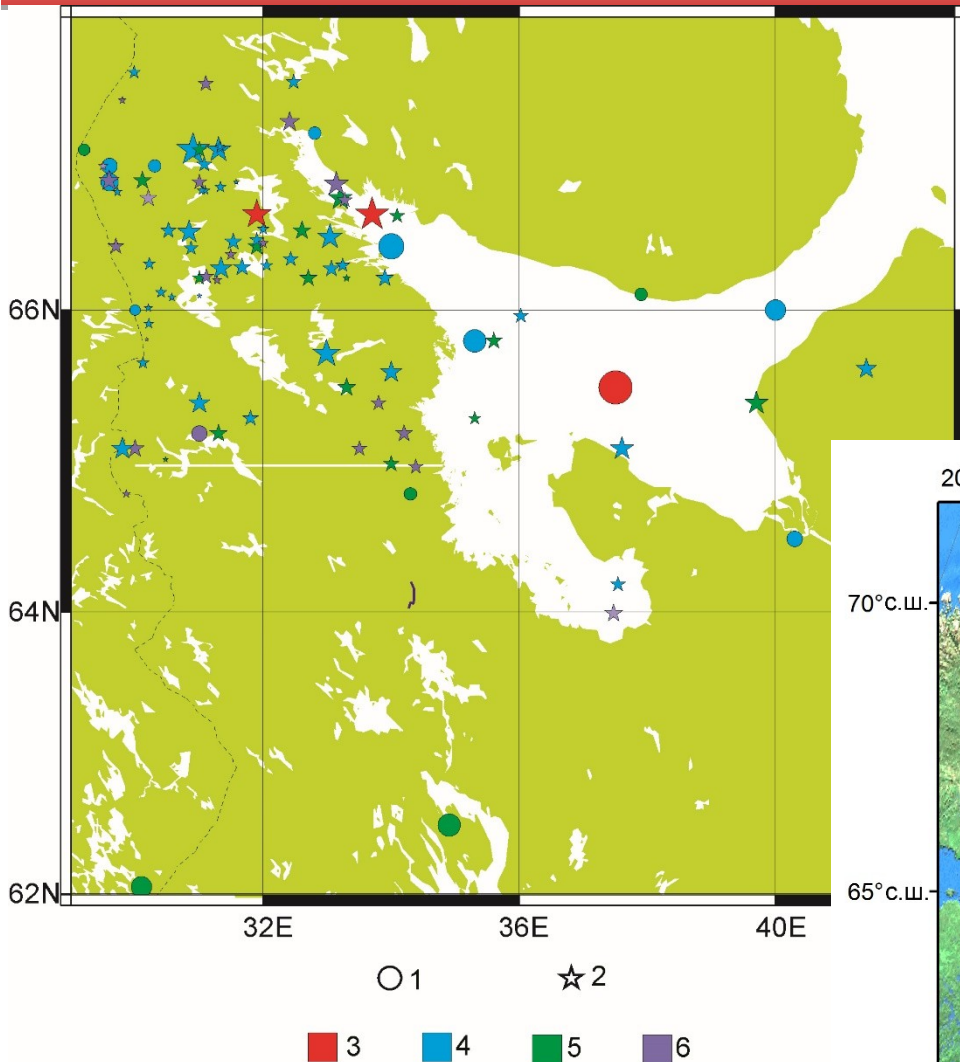
МЕТОД ВЕРОЯТНОСТНОЙ ЛОКАЦИИ РАННЕИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

А.Н. Морозов¹, В.Э. Асминг²

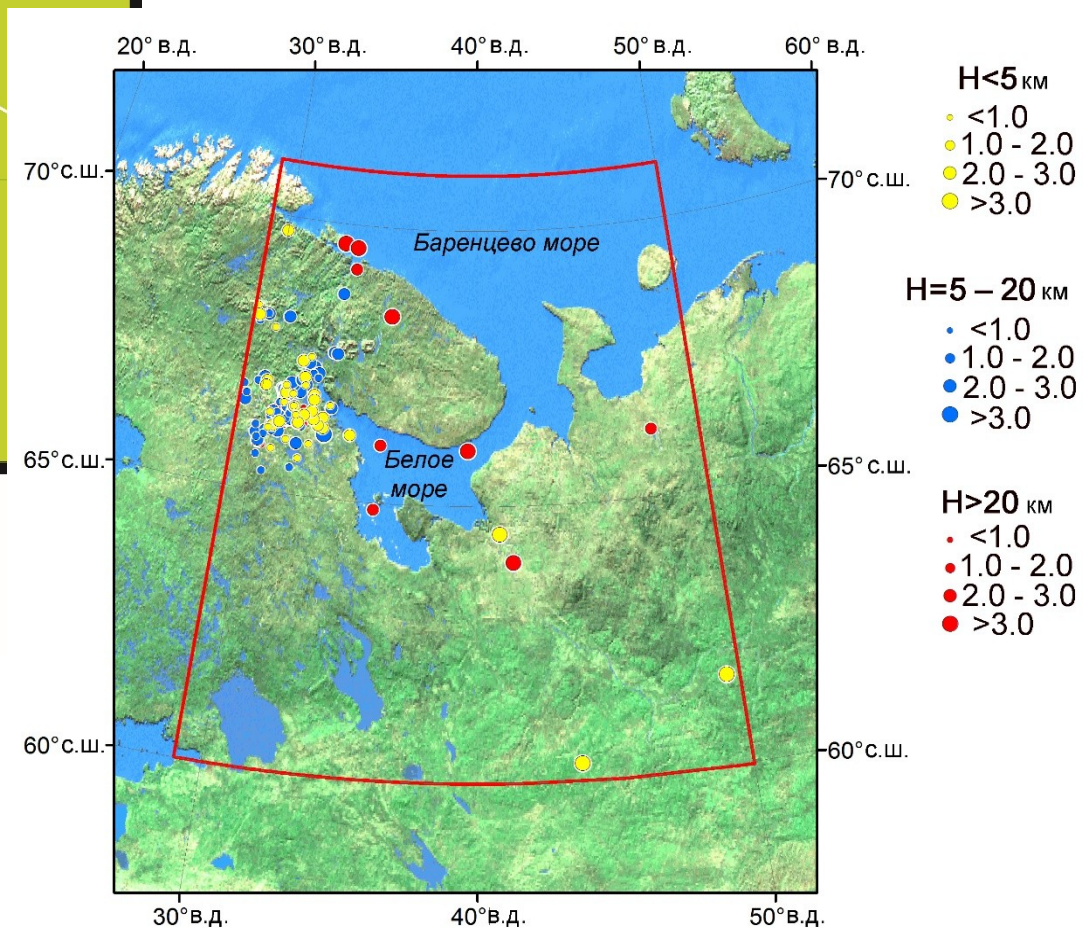
*¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта Российской академии наук,
г. Москва, Россия*

*²Кольский филиал Федерального исследовательского центра
«Единая геофизическая служба Российской академии наук»,
г. Апатиты, Россия*

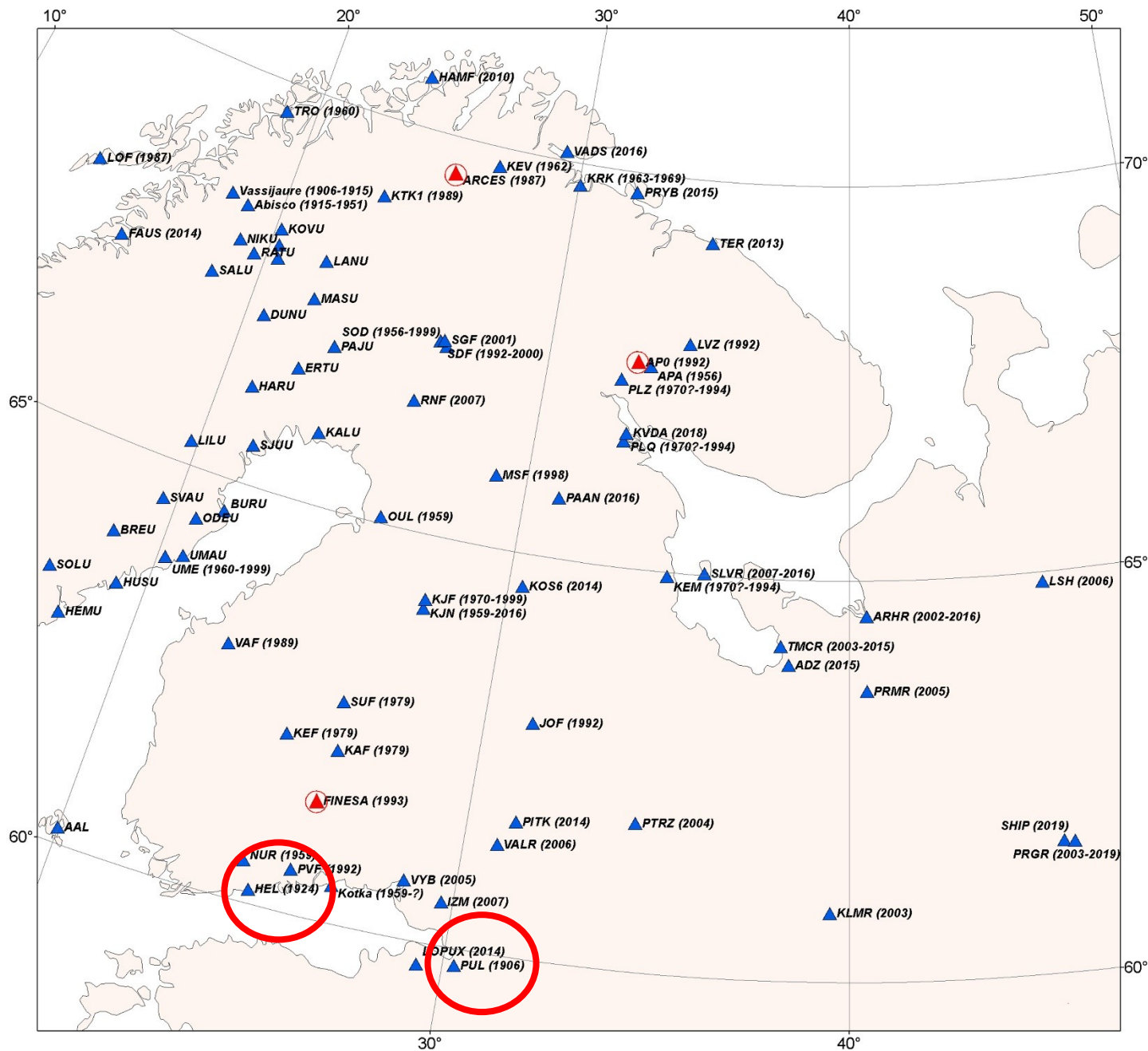
Москва, 2023



Карта эпицентров землетрясений за период с 2005 по 2018 гг. с указанием магнитуды и глубины по [Морозов и др., 2019]. Линия ограничивает район исследования



Карта эпицентров землетрясений Карельского региона (1542–2003 гг.) по [Ассиновская, 2004]: 1 – эпицентры по историческим данным; 2 – то же, по инструментальным данным. Размер знака пропорционален $M/20$; 3–6 – глубина очага: 3 – > 20 км, 4 – 5–20 км, 5 – < 5 км, 6 – не определена



Карта сейсмических станций северо-запада Восточно-Европейской платформы на момент 2020 г.

Теорема Байеса:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \frac{P(C) P(F_1, \dots, F_n|C)}{\dots}$$

C – событие, заключающееся в том, что землетрясение произошло в некоторой области (F_1, \dots, F_n) проявления этого события

Предполагаем: (F_1, \dots, F_n) – независимы; априорные вероятности вариантов события C заранее неизвестны (положим их одинаковыми)

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \prod_i P(F_i|C)$$

$P(F_i|C)$ имеет смысл вероятности проявления F_i при условии, что произошло событие C , т.е., что землетрясение произошло в тестируемой области

Предполагаем: гипоцентр события магнитуды M с вероятностью 1 располагался в некоторой области на поверхности Земли. Разобьем эту область на маленькие элементы c_j и будем оценивать вероятности $P(c_j|F_1, \dots, F_n)$

$$\sum_j P(c_j|F_1, \dots, F_n) = 1$$

Условие нормировки: вероятность того, что землетрясение произошло в большой области, равна 1

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \prod_i P(F_i|C)$$

Нужно оценить $P(F_i|c_j)$ для макросейсмических и инструментальных данных

Макросейсмические данные

Инструментальные данные

Проявление F_i – информация о том, что в некоторой точке с координатами (φ, λ_i) событие ощущалось в диапазоне интенсивностей от I_{i0} до I_{i1} .



Оценка $P(F_i|c_j)$ сводится к оценке вероятности $P([I_{i0}, I_{i1}]|Истинная, j)$, т.е., оценке вероятности того, что свидетель, находившийся в точке i , зафиксировал интенсивности из диапазона $[I_{i0}, I_{i1}]$ при условии, что в реальности имела место интенсивность $Истинная, j$.



Пусть для некоторой сейсмостанции задано N фаз с временами t_i и вероятностями типов фаз P_{ik} , где i – индекс фазы, а k – индекс типа фазы от 1 до 4 (P-волна, S-волна, Lg-волна, ложное вступление). Назовем совместимой парой две фазы i_1 и i_2 , которым приписаны типы волны k_1 и k_2 , такую, что:

$$T_{0,k_2} - T_{1,k_1} < t_{i_1} - t_{i_2} < T_{1,k_2} - T_{0,k_1}$$

где $T_{0,k}$ – минимальное, а $T_{1,k}$ – максимальное время пробега волны типа k от источника до станции с учетом возможных ошибок взятия вступлений и скоростной модели

Окончательной оценкой реализации варианта с данными замера для данной точки и для данной станции, которая и используется в качестве сомножителя:

$$\sum_{\text{по совместимым парам}} P_{i_1, k_1} \cdot P_{i_2, k_2}$$

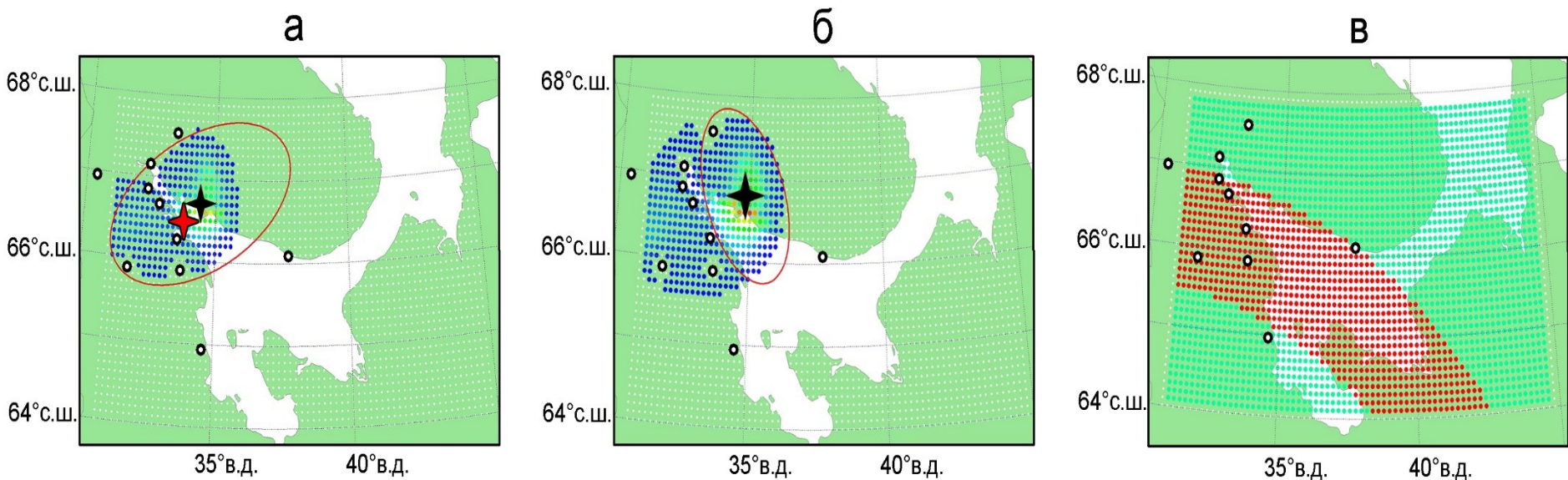
Параметры гипоцентра землетрясения 20 мая 1967 г.

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс.0	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	Эллипс ошибок			M	Источник
		$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	h, км		Az, $^\circ$	S_{minor} км	S_{major} км		
20.05.1967	23:18:11.8	66.46	33.82	10f	72/85	98	5.2	7.2	mb(ISC)=4.6	[International..., 2022]

Макросейсмические данные – по 27 пунктам [Панасенко, 1974; Nikonov, 1991]
 Инструментальные данные – по 72 сейсмическим станциям [International..., 2022]

Модельный бюллетень

Макросейсмические данные – по 10 пунктам
 Инструментальные данные – по 1 сейсмической станции Пулково (PUL)



Результат расчета программы ProLom на основе модельного бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных землетрясения 20 мая 1967 г. с $mb(ISC)=4.6$: а – решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; б – решение на основе макросейсмических данных; в – решение на основе инструментальных данных. Черной звездой указан вычисленный эпицентр. Красной линией – эллипс ошибок. Красной звездой указан эпицентр землетрясения согласно ISC [International..., 2023]. Кружками указаны географические пункты со значениями интенсивности I . Разноцветными точками обозначают ячейки, в которых значение вероятности наличия в этой ячейке эпицентра отлично от нуля. Градация цвета зависит от значения вероятности: от меньшего (синего) до большего (красного).

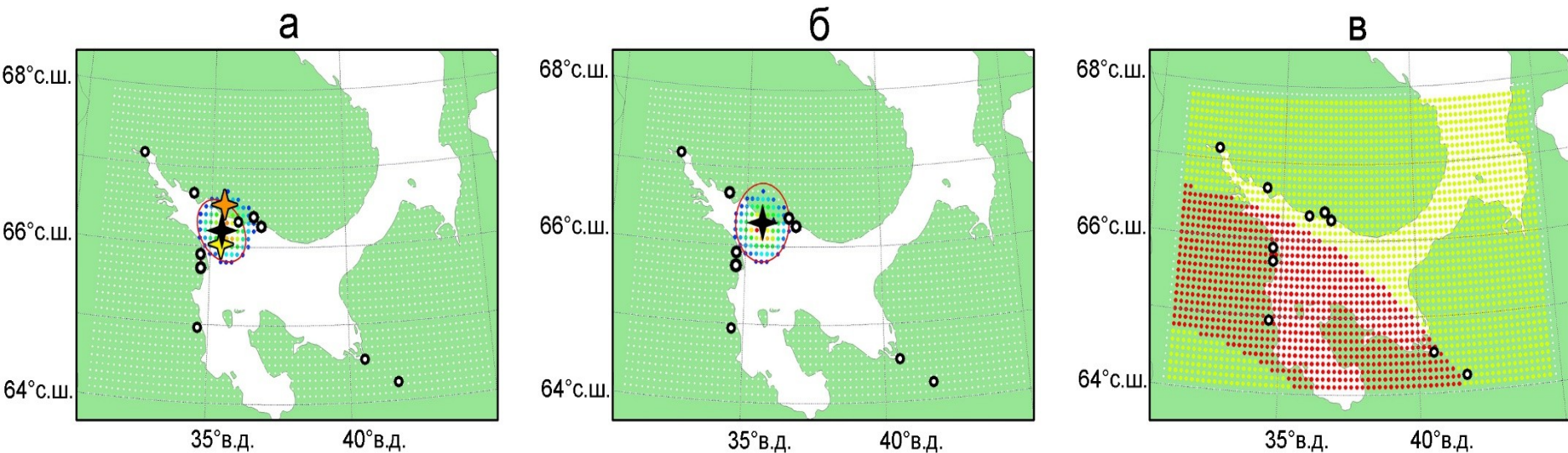
[Di Giacomo et al., 2015]

$$\begin{aligned}
 MS=4.7 \quad Mw &= e^{(-4.664 + 0.859 mb)} + 4.555 & Mw=5.1 \text{ из } mb(ISC)=4.6 \\
 Mw &= e^{(-0.222 + 0.233 MS)} + 2.863 & Mw=5.3 \text{ из } MS=4.7
 \end{aligned}$$

Уравнение Блейка-Шебалина: $a=1.5, b=3.55, c=3.05$ по [Петрова и др., 2020]

Дата дд.мм.гггг	Время	Гипоцентр			M	Источник
		$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	h, км		
30.06.1911	07:11	66.1	35.5	-	~5.0	[Панасенко, 1969]
30.06.1911	07:10:20 ± 20 с	66.5 ± 0.5	35.5 ± 1.0	25 12-50	4.9 ± 1.0	[Новый каталог..., 1977]
30.06.1911	07:09:50 ± 30 с	66.0 ± 0.3	35.4 ± 0.3	30 20-40	5.0 ± 0.5	[Никонов, Пономарёва, 2008]

Макросейсмические данные – по 10 пунктам
Инструментальные данные – по станции Пулково (PUL)

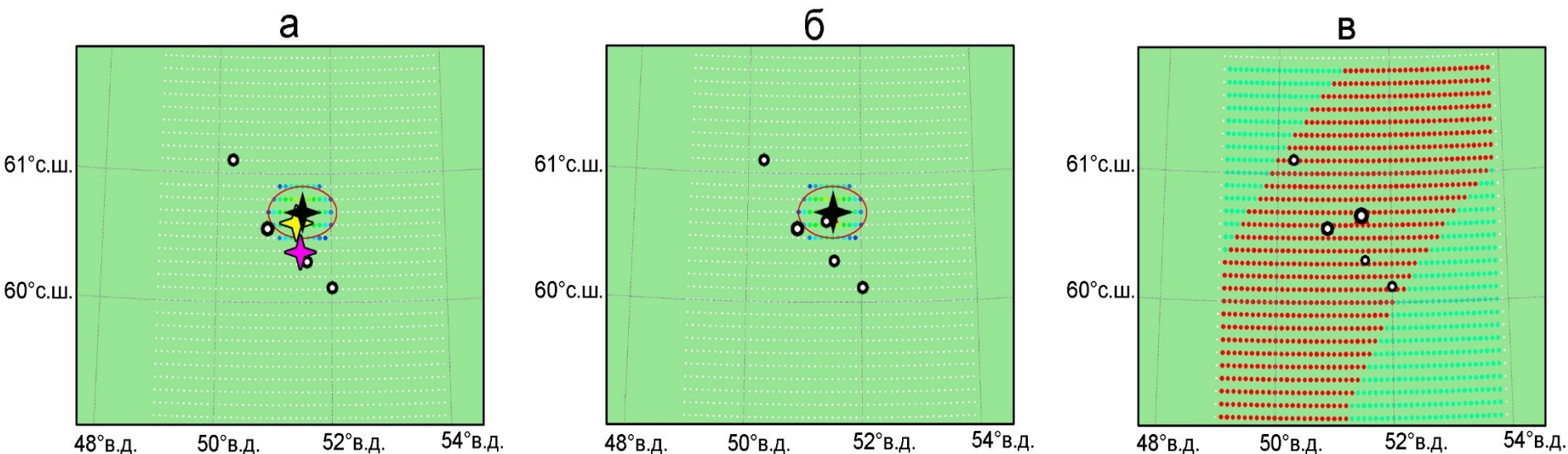


Дата дд.мм.гггг	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	$N_{пунктов}$ с макр.	Эллипс ошибок			MS
	$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	h, км			Az, $^\circ$	$S_{minor},$ км	$S_{major},$ км	
30.06.1911	66.2	35.4	10f	1/2	12	141	28.0	39.9	4.2
30.06.1911	66.2	35.6	20f	1/2	12	359	44.9	55.8	4.3
30.06.1911	66.3	35.6	30f	1/2	12	181	44.8	55.6	4.3

Дата ДД.ММ.ГГГГ	Время ЧЧ:ММ:СС.0	Гипоцентр			MS	Примечание
		$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	h, км		
13.01.1939	16:47:12.4 ± 0.2 с	60.38 ± 0.5	51.47 ± 0.5	10 ± 5.0	4.5 ± 0.2	По инструм. данным
	16:48	60.60 ± 0.4	51.40 ± 0.2	6-10	4.6 ± 0.5	1-й толчок
	16:51	61.00 ± 0.2	50.00 ± 0.2	10	3.5 ± 0.5	2-й толчок

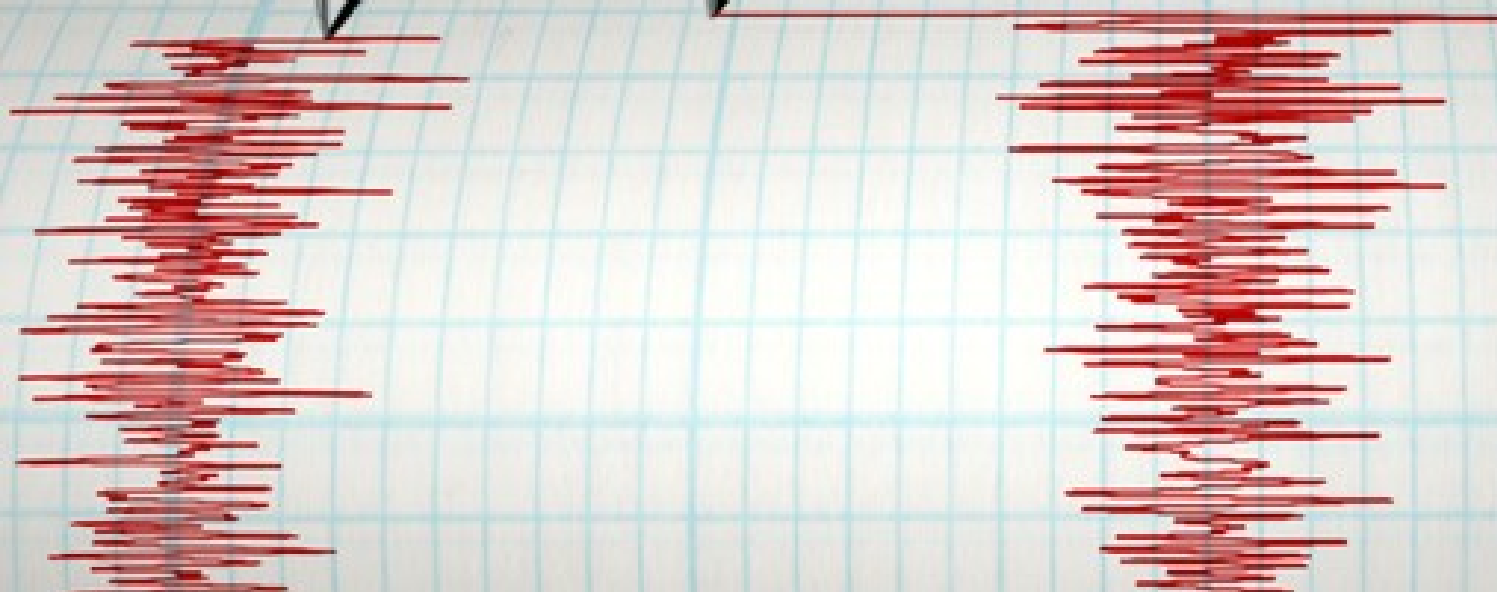
Макросейсмические данные – по 5 пунктам

Инструментальные данные – по 2 станциям Пулково (PUL) и Свердловск (SVE)



Дата ДД.ММ.ГГГГ	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	$N_{пунктов}$ с макр.	Эллипс ошибок			MS
	$\phi, ^\circ$	$\lambda, ^\circ$	h, км			Az, $^\circ$	S_{minor} , км	S_{major} , км	
13.01.1939	60.7	51.5	10f	2/5	5	270	22.3	32.8	4.2

Благодарю за внимание!



– Морозов А.Н., Асминг В.Э., Ваганова Н.В., Евтюгина З.А. Вероятностная локация раннеинструментальных землетрясений на основе макросейсмических и инструментальных данных // Физика Земли – 2024. – № 1 – (в печати).

– Асминг В.Э., Морозов А.Н. ProLom. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617379 от 07 апреля 2023 г.

Таблица 1 – Пример задания эмпирической функции $p(I_{\text{набл}} | I_{\text{истинная}})$.

Истинный балл МСК-64 ($I_{\text{истинная}}$)	Наблюдаемые баллы МСК-64 ($I_{\text{набл}}$)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0.5	1	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0.5	1	0.75	0.5	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0.5	0.75	1	0.75	0.5	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	1	0.5	0.25
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0.25	0.5	1	0.5
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.5	1

Примечание: в таблице для значений истинной интенсивности приведены значения, пропорциональные вероятностям того, что наблюдатель оповестит о событии с данной наблюдаемой интенсивностью. При использовании в программе ProLom данные значения нормируются.