

УДК 550.34

ВЕРОЯТНОСТНАЯ ЛОКАЦИЯ РАННЕИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ НА ОСНОВЕ МАКРОСЕЙСМИЧЕСКИХ И ИНСТРУМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

© 2024 г. А. Н. Морозов^{1, *}, В. Э. Асминг², Н. В. Ваганова³, З. А. Евтюгина²

¹Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, г. Москва, Россия

²Кольский филиал Федерального исследовательского центра
“Единая геофизическая служба РАН”, г. Апатиты, Россия

³Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова
Уральского отделения РАН, г. Архангельск, Россия

*E-mail: morozovaleksey@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.05.2023 г.

После доработки 28.06.2023 г.

Принята к публикации 11.07.2023 г.

Существуют территории, которые с одной стороны характеризуются умеренной сейсмичностью, но с другой — не обладали долгое время плотной сетью сейсмических станций из-за малонаселенности, труднодоступности и невысокого уровня их экономического развития. Для таких территорий характерны землетрясения, по которым имеются небольшое количество макросейсмических сведений и данные лишь по одной или двум сейсмическим станциям. Чаще всего при локации таких землетрясений использовались только макросейсмические сведения. Авторами в данной статье предложена методика вероятностной оценки локации таких землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных данных. Методика реализована в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics). В статье проведена проверка работоспособности метода на тестовом землетрясении 20.05.1967 г. и приведены результаты анализа землетрясений, произошедших на севере Восточно-Европейской платформы 30.06.1911 г. и 13.01.1939 г.

Ключевые слова: метод локации, раннеинструментальные землетрясения, север ВЕП.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0002333724010117>, **EDN:** EEDWMW

ВВЕДЕНИЕ

С начала XX века в мире началось интенсивное развитие инструментальных сейсмических наблюдений. Стали появляться сейсмические станции при обсерваториях и университетах в Италии, Германии и Швеции; первые национальные сети в России и Японии; международные сети Дж. Милна (John Milne) “Milne Seismographic Network” и ордена иезуитов “Jesuit Network” [Schweitzer, 2007; Storchak et al., 2015] (рис. 1). Впоследствии развитие инструментальных наблюдений в мире происходило преимущественно в сейсмоактивных регионах. Именно в таких районах происходило увеличение количества сейсмических станций. При этом оставались регионы, характеризующиеся проявлением умеренной сейсмичности, но в силу географических, исторических, а также экономических

причин развитие инструментальных наблюдений там происходило очень медленно.

Одним из таких регионов был север Восточно-Европейской платформы (ВЕП). Сведения по историческим землетрясениям и современные инструментальные данные указывают на повышенную сейсмическую активность некоторых районов севера платформы, в частности, Беломорского региона. Однако из-за малонаселенности, труднодоступности и невысокого уровня экономического развития региона инструментальные наблюдения практически не развивались в первой половине XX века (рис. 2). В работе [Панасенко, 1977] отмечается, что только с 1962 г. можно выделить начало инструментального этапа в изучении сейсмичности региона. До этого времени землетрясения изучались преимущественно по макросейсмическим

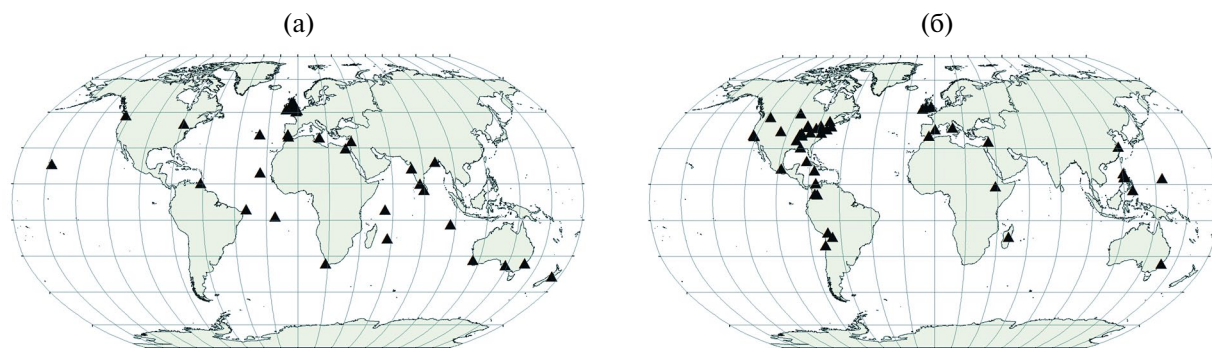


Рис. 1. Международные сейсмические сети с относительно стандартизированными приборами, развернутыми в начале XX века: (а) – сеть Дж. Милна (John Milne) “Milne Seismographic Network”; (б) – сеть ордена иезуитов “Jesuit Network”.

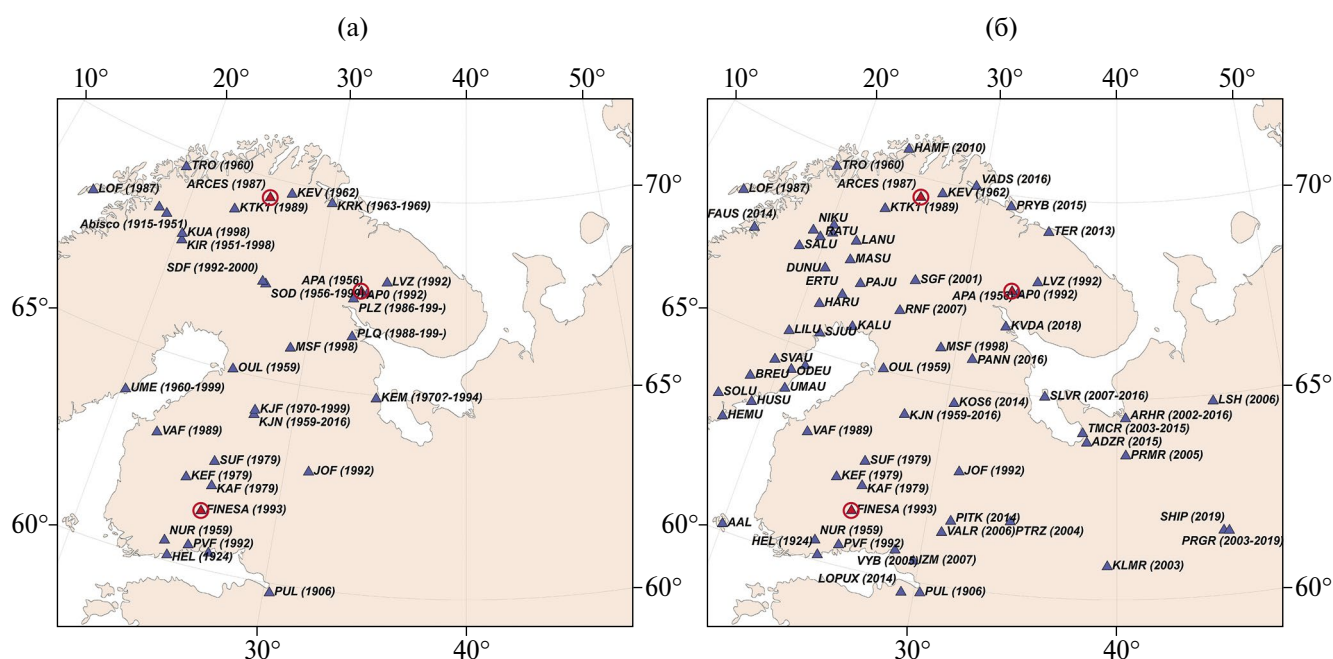


Рис. 2. Карта сейсмических станций и апертурных групп, функционирующих на северо-западе ВЕП в XX (а) и в XXI (б) веках. В скобках указан год начала функционирования станции и год ее закрытия.

данным, которые, в силу малонаселенности региона, характеризуются небольшой выборкой по значениям интенсивности и географическим пунктам. При этом для части таких землетрясений имеются инструментальные данные одной-двух станций, порой с ненадежными определениями времен вступлений сейсмических фаз. Поэтому использовать только инструментальные данные для локации таких землетрясений не представляется возможным.

Авторами в данной статье предложена методика вероятностной оценки локации таких землетрясений на основе совместного анализа их макросейсмических и инструментальных

данных. Методика реализована в программе ProLom (Probabilistic Locator by MacroSeismics) [Асминг, Морозов, 2023]. В статье проведена проверка работоспособности метода на тестовом землетрясении 20.05.1967 г. и приведены результаты анализа землетрясений, произошедших 30.06.1911 г. и 13.01.1939 г. на севере ВЕП.

ОПИСАНИЕ МЕТОДА

Для решения задачи локации землетрясений совместно по макросейсмическим и инструментальным данным был использован подход, основанный на применении так называемого

наивного Байесовского классификатора. Напомним вкратце идею классификатора. Теорема Байеса выражается следующим соотношением:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) = \frac{P(C)P(F_1, \dots, F_n|C)}{P(F_1, \dots, F_n)}. \quad (1)$$

В нашем случае C – событие, заключающееся в том, что землетрясение произошло в некоторой области $(F_1, \dots, F_n)$ проявления этого события как макросейсмические (наблюдались сотрясения некоторой интенсивности в тех или иных пунктах), так и инструментальные (приходы сейсмических волн на станции). Предположение наивности – это предположения о том, что $(F_1, \dots, F_n)$ – независимы. Априорные вероятности вариантов события C заранее неизвестны, положим их одинаковыми. С учетом этого (1) можно переписать в виде:

$$P(C|F_1, \dots, F_n) \sim \prod_i P(F_i|C). \quad (2)$$

Здесь $P(F_i|C)$ имеет смысл вероятности проявления F_i при условии, что произошло событие C , т.е., что землетрясение произошло в тестируемой области. Далее мы предполагаем, что гипоцентр события магнитуды M (магнитуду и глубину фиксируем) с вероятностью 1 располагался в некоторой области на поверхности Земли. Разобьем эту область на маленькие элементы c_j и будем с помощью (2) оценивать вероятности $P(c_j|F_1, \dots, F_n)$, т.е. вероятности того, что событие произошло в данной ячейке при условии, что имели место его проявления F_i . Для нормировки воспользуемся тем, что вероятность того, что землетрясение произошло в большой области, равна 1, т.е.:

$$\sum_j P(c_j|F_1, \dots, F_n) = 1. \quad (3)$$

Чтобы воспользоваться (2) нужно оценивать $P(F_i|c_j)$. Рассмотрим эти оценки для макросейсмических и инструментальных данных.

Макросейсмические данные

Проявление F_i – информация о том, что в некоторой точке с координатами (φ_i, λ_i) событие ощущалось в диапазоне интенсивностей (по шкале МСК-64) от I_{j0} до I_{j1} . Существуют известные формулы, связывающие магнитуду землетрясения и расстояние от эпицентра до точки наблюдения с интенсивностью, например, формула Блэйка–Шебалина (в программе ProLom

может использоваться любая зависимость). В общем виде ее можно записать как:

$$I_{\text{истинная}} = I(M, R)$$

где R – расстояние до гипоцентра землетрясения в км, определяемое через расстояние до эпицентра r и глубину очага h , как $\sqrt{r^2 + h^2}$.

Назовем интенсивность, рассчитанную по этой формуле “истинной” (разумеется, она истинна только в том случае, если в данной точке действительно произошло событие данной магнитуды). Таким образом, оценка $P(F_i|c_j)$ сводится к оценке вероятности $P([I_{j0}, I_{j1}]|I_{\text{истинная},j})$, т.е., оценке вероятности того, что свидетель, находившийся в точке i , зафиксировал интенсивности из диапазона $[I_{j0}, I_{j1}]$ при условии, что в реальности имела место интенсивность $I_{\text{истинная},j}$.

Для этого введем эмпирическую функцию плотности вероятности того, что наблюдатель зафиксировал интенсивность $I_{\text{набл}}$ при условии того, что на самом деле имела место интенсивность $I_{\text{истинная}} - \rho(I_{\text{набл}}|I_{\text{истинная}})$. Эта функция вводится интерпретатором из некоторых рациональных соображений и задается в табличном виде (табл. 1). Таким образом, с точностью до нормировки, мы имеем следующее выражение:

$$P(F_i|c_j) = P([I_{j0}, I_{j1}]|I_{\text{истинная},j}) \sim \max_{I_{\text{набл}} \in [I_{j0}, I_{j1}]} \rho(I_{\text{набл}}|I_{\text{истинная},j}). \quad (4)$$

Инструментальные данные

Инструментальные данные, которые предполагается использовать в данном подходе, это замеры времен приходов сейсмических волн на станции, сделанные по аналоговым сейсмограммам, полученным в конце XIX и в начале XX веков. У таких сейсмограмм есть специфические особенности: а) неточная привязка ко времени; б) невозможность достоверно определить тип пришедшей волны. Это определило то, что в данном подходе совместно используются только времена приходов, взятые для одной и той же станции, и то, что вместо однозначного задания типа фазы используются вероятностные оценки, задаваемые пользователем.

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

Таблица 1. Пример задания эмпирической функции $\rho(I_{\text{набл}}/I_{\text{истинная}})$

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.

фазы i_1 и i_2 , которым приписаны типы волны k_1 и k_2 , такую, что:

$$T_{0,k2} - T_{1,k1} < t_{i_1} - t_{i_2} < T_{1,k2} - T_{0,k1}, \tag{5}$$

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. Также совместимыми будут считаться те пары, у которых одной из фаз приписан тип “ложное вступление”. Окончательной оценкой реализации варианта с данными замерами для данной точки и для данной станции, которая и используется в качестве сомножителя в (2), будет:

$$\sum_{\text{по совместимым парам}} P_{i_1,k_1} \cdot P_{i_2,k_2}. \tag{6}$$

Описанный метод был реализован в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics) [Асминг, Морозов, 2023]. Программа позволяет пользователю задавать макросейсмическую информацию (ощущавшиеся интенсивности по шкале МСК-64 в определенных пунктах), добавлять к ней инструментальную информацию (замеры времен приходов сейсмических волн на станции) и получать вероятностную оценку локации сейсмических событий.

ПРОВЕРКА РАБОТОСПОСОБНОСТИ МЕТОДА

Для проверки работоспособности метода в качестве тестового события было взято землетрясение 20.05.1967 г. Землетрясение произошло в Кандалакшском заливе Белого моря с $mb(ISC) = 4.6$ (табл. 2). По этому землетрясению имеется большое количество инструментальных данных ($N_{\text{станций}} = 72$), представленных в бюллетене Международного сейсмологического Центра (International Seismological Centre, ISC) [International..., 2023]. А также имеются макросейсмические сведения из 27 населенных пунктов, описанные в работах [Панасенко, 1974; Nikonov, 1991].

На основе данных по землетрясению 20 мая 1967 г. был составлен модельный бюллетень из макросейсмических и инструментальных данных, наиболее характерный для землетрясений данного региона в первой половине XX века (Приложение). В тот период в регионе функционировала одна сейсмическая станция PUL (Пулково) и количество макросейсмических сведений поступало значительно меньше, чем для землетрясения 20.05.1967 г. Поэтому, модельный бюллетень включал в себя инструментальные данные только одной станции PUL и макросейсмические сведения по 10 пунктам.

Таблица 2. Параметры гипоцентра землетрясения 20.05.1967 г.

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс.	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	Эллипс ошибок			M	Источник
		φ, град	λ, град	h , км		Az, град	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]

Таблица 3. Параметры гипоцентра, вычисленные в программе ProLom для тестового землетрясения 20.05.1967 г.

Дата дд.мм.гггг	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	$N_{пунктов}$ с макр.	Эллипс ошибок			MS
	φ, град	λ, град	h , км			Az, град	S_{minor} , км	S_{major} , км	
20.05.1967	66.7	34.4	10f	1/2	10	241	91.7	162.5	4.7

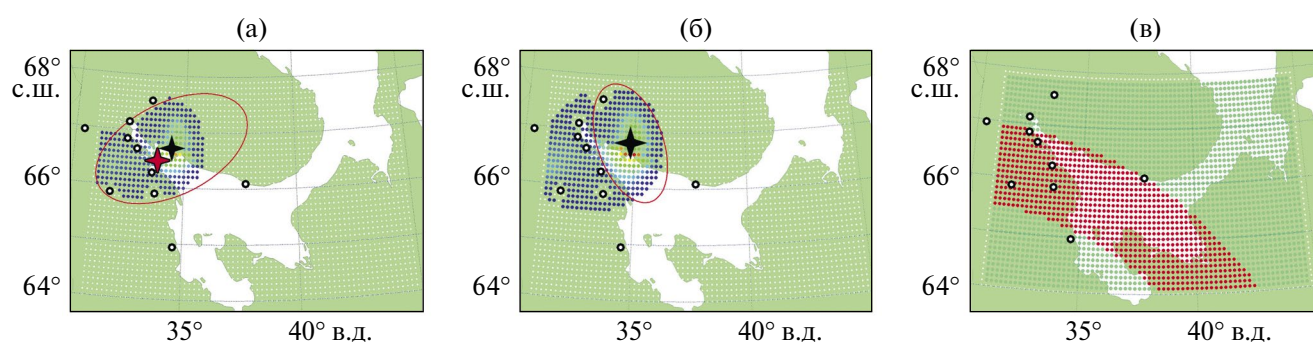


Рис. 3. Результат расчета программы ProLom на основе модельного бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных землетрясения 20.05.1967 г.: (а) — решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; (б) — решение только на основе макросейсмических данных; (в) — область, в которой должен располагаться эпицентр, вычисленная на основе инструментальных данных. Черной звездой указан вычисленный эпицентр. Красной линией — эллипс ошибок. Красной звездой указан эпицентр землетрясения согласно ISC [International..., 2023]. Кругами указаны географические пункты, для которых имеются значения 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).

Решение программы ProLom для данного бюллетеня представлено на рис. 3 и в табл. 3. При локации использовалась региональная модель BARENTS [Kremenetskaya et al., 2001], эффективность которой для данного региона была подтверждена многократно по записям химических и ядерных взрывов [Kremenetskaya et al., 2001; Морозов и др., 2018]. В уравнении Блейка–Шебалина использовались *вычисленные* для данного района [Петрова и др., 2020] следующие коэффициенты макросейсмического поля: $a = 1.5$, $b = 3.55$, $c = 3.05$.

Вычисленные программой ProLom координаты эпицентра (табл. 3) совпадают в пределах эллипса ошибок с координатами по ISC (табл. 2, рис. 3). При ограниченном количестве исходных данных мы получили большие значения полуосей эллипса ошибок. При этом полученное

решение на основе только макросейсмических данных (рис. 3б) отличается от решения на основе макросейсмических и инструментальных данных (рис. 3а). Последнее решение ближе всего к решению по ISC (табл. 2).

Значение магнитуды MS получилось равным 4.7. Чтобы понять, как соотносятся полученная в программе ProLom магнитуда по формуле Блейка–Шебалина с $mb(ISC)$ из табл. 2, был использован следующий подход. Под магнитудой M в формуле Блейка–Шебалина понимают магнитуду $MS(MOS)$. Магнитуда $MS(MOS)$ практически идентична магнитуде $MS(ISC)$ [Petrova, Gabsatarova, 2020]. Существует соотношение между $mb(ISC)$ и $MS(ISC)$, полученное в 1973 г. в работе [Karnik, 1973]:

$$mb(ISC) = 0.46 MS(ISC) + 2.74. \quad (7)$$

Подставляя в данное соотношение вычисленную MS , равную 4.7, мы получаем значение mb , равное 4.9. Данное значение незначительно превышает (+0.3) значение магнитуды mb , вычисленное в ISC для землетрясения 20.05.1967 г. (табл. 2). Однако остается вопрос, насколько выражение (3) актуально в настоящее время.

В работе [Di Giacomo et al., 2015] на большой выборке данных были получены экспоненциальные соотношения между магнитудами M_w и $mb(ISC)/MS(ISC)$:

$$M_w = e^{(-4.664 + 0.859mb)} + 4.555, \tag{8}$$

$$M_w = e^{(-0.222 + 0.233MS)} + 2.863. \tag{9}$$

С помощью этих соотношений были получены следующие значения магнитуд M_w для землетрясения 20.05.1967 г.: $M_w = 5.1$ из $mb(ISC) = 4.6$ и $M_w = 5.3$ из $MS = 4.7$. Мы получили близкие значения магнитуд M_w , что говорит о том, что вычисленное значение магнитуды MS в программе ProLom для тестового землетрясения хорошо согласуется с магнитудой mb по ISC.

Таким образом, данный пример показывает работоспособность метода, реализованного в программе ProLom. Ниже приведены результаты применения метода на конкретных землетрясениях первой половины XX века, произошедшие на севере Восточно-Европейской платформы.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА

Землетрясение 30.06.1911 г.

В Кандалакшском заливе Белого моря 30.06.1911 г. произошло землетрясение, которое нашло свое отражение в разных каталогах по данному региону (табл. 4). В работе [Никонов, Пономарёва, 2008] собраны и проанализированы все доступные сведения о макросейсмических проявлениях от данного землетрясения. Только

по семи населенным пунктам были обнаружены макросейсмические проявления, опубликованные в региональных и центральных газетах. Для девяти населенных пунктов авторами [Никонов, Пономарёва, 2008] указаны значения интенсивности $I \leq 2$ баллов.

Вступления сейсмических фаз от землетрясения 30.06.1911 г. были зарегистрированы только одной сейсмической станцией PUL (Пулково). Однако эпицентральное расстояние, рассчитанное по указанным в бюллетене временам вступлений, не пересекало зону, по которой имеются макросейсмические проявления [Никонов, Пономарёва, 2008]. Поэтому инструментальные данные до настоящего времени не использовались при локации этого землетрясения 1911 г.

Решение программы ProLom по данному землетрясению представлено на рис. 4 и в табл. 5. Были использованы макросейсмические сведения по 12 пунктам, для которых были уверенно определены их координаты, и времена вступлений сейсмических фаз, указанные в бюллетене станции PUL (ПРИЛОЖЕНИЕ). При локации также использовалась региональная модель BARENTS и коэффициенты макросейсмического поля, согласно [Петрова и др., 2020]: $a = 1.5$, $b = 3.55$, $c = 3.05$. Решения были вычислены для значений фиксированных глубин: 10, 20 и 30 км.

Полученные решения для разных глубин (табл. 5) практически идентичны и хорошо согласуются с координатами в пределах области ошибок, указанными у других авторов (табл. 4). Значение магнитуды землетрясения, равное 4.2–4.3, получилось ниже, чем в предыдущих исследованиях. При этом полученное решение на основе только макросейсмических данных (рис. 4б) отличается от решения на основе макросейсмических и инструментальных данных (рис. 4а). То есть при локации землетрясений 30.06.1911 г. нам удалось учесть инструментальные данные сейсмической станции PUL.

Таблица 4. Параметры гипоцентра землетрясения 30.06.1911 г.

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс	Гипоцентр			M	Источник
		φ, град	λ, град	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]

Таблица 5. Параметры гипоцентра, вычисленные в программе ProLom для землетрясения 30.06.1911 г.

Дата дд.мм.гггг	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	$N_{пунктов}$ с макр.	Эллипс ошибок			MS
	φ, град	λ, град	h, км			Az, град	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

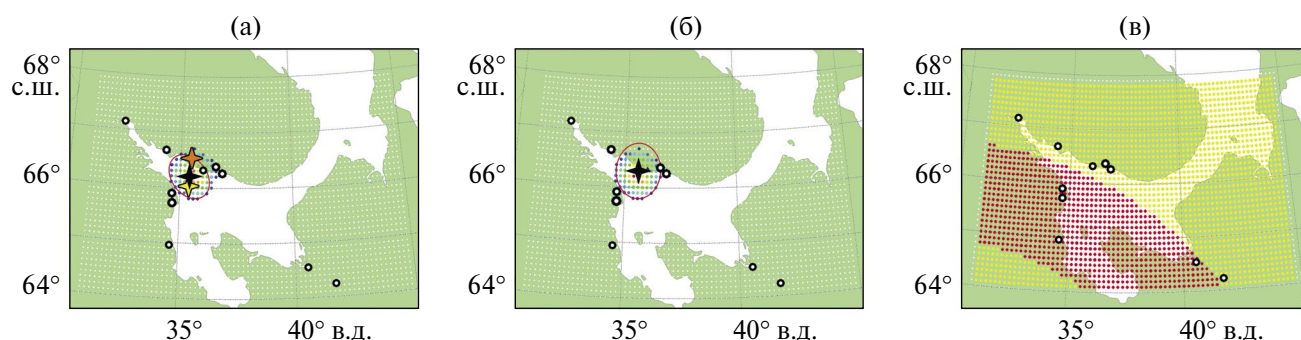


Рис. 4. Результат расчета программы ProLom на основе бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных землетрясения 30.06.1911 г.: (а) — решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; (б) — решение только на основе макросейсмических данных; (в) — область, в которой должен располагаться эпицентр, вычисленная на основе инструментальных данных. Черной звездой указан вычисленный эпицентр. Красной линией — эллипс ошибок. Оранжевой звездой указан эпицентр землетрясения, согласно [Новый каталог..., 1977]. Желтой звездой — эпицентр, согласно [Никонов, Пономарёва, 2008]. Кружками указаны географические пункты, для которых имеются значения 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).

Сысольское землетрясение 13.01.1939 г.

Сысольское землетрясение 13.01.1939 г. является самым сильным из зарегистрированных на Русской плите. В работе [Никонов, Чепкунас, 2009] на основе анализа всех известных макросейсмических и инструментальных сведений по этому землетрясению, авторы выделяют два толчка и определяют их параметры (табл. 6). Основное различие между макросейсмическими и инструментальными данными состоит в том, что инструментально зарегистрирован лишь один (первый, более сильный) толчок, тогда как макросейсмические сведения указывают на два толчка с разницей во времени 3 мин. В работе [Никонов, Чепкунас, 2009] решения для первого толчка по макросейсмическим и инструментальным данным были получены независимо.

Был составлен бюллетень для первого толчка, содержащий макросейсмические сведения по шести пунктам, которые авторы работы [Никонов, Чепкунас, 2009] относят к первому толчку, и времена прихода сейсмических фаз на двух сейсмических станциях PUL (Пулково) и SVE (Свердловск) (Приложение). При локации

использовалась региональная модель BARENTS и коэффициенты макросейсмического поля для данного района, согласно [Петрова и др., 2020]: $a = 1.5$, $b = 2.3$, $c = 1.36$. Решения были вычислены для значения фиксированной глубины 10 км.

Решение программы ProLom по данному землетрясению представлено на рис. 5 и в табл. 7. На итоговое решение практически не повлияли инструментальные данные (рис. 5), т.к. эпицентр и эллипс ошибок полностью покрываются зоной повышенной вероятности нахождения эпицентра по инструментальным данным. Таким образом, итоговое решение полностью основано на макросейсмических сведениях и согласуется в пределах областей ошибок с решениями из работы [Никонов, Чепкунас, 2009].

ВЫВОДЫ

Существуют территории, которые с одной стороны характеризуются умеренной сейсмичностью, но с другой стороны не обладали долгое время плотной сетью сейсмических станций по историческим, географическим и экономическим причинам. Для таких территорий

Таблица 6. Параметры гипоцентра Сысольского землетрясения 13.01.1939 г., согласно работе [Никонов, Чепкунас, 2009]

Дата дд.мм.гггг	Время чч:мм:сс.	Гипоцентр			<i>MS</i>	Примечание
		φ, град	λ, град	<i>h</i> , 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

Таблица 7. Параметры гипоцентра, вычисленные в программе ProLom для Сысольского землетрясения 13.01.1939 г.

Дата дд.мм.гггг	Гипоцентр			$N_{ст}/N_{фаз}$	$N_{пунктов}$ с макр.	Эллипс ошибок			<i>MS</i>
	φ, град	λ, град	<i>h</i> , км			Az, град	S_{minor} , км	S_{major} , км	
13.01.1939	60.7	51.5	10f	2/5	5	270	22.3	32.8	4.2

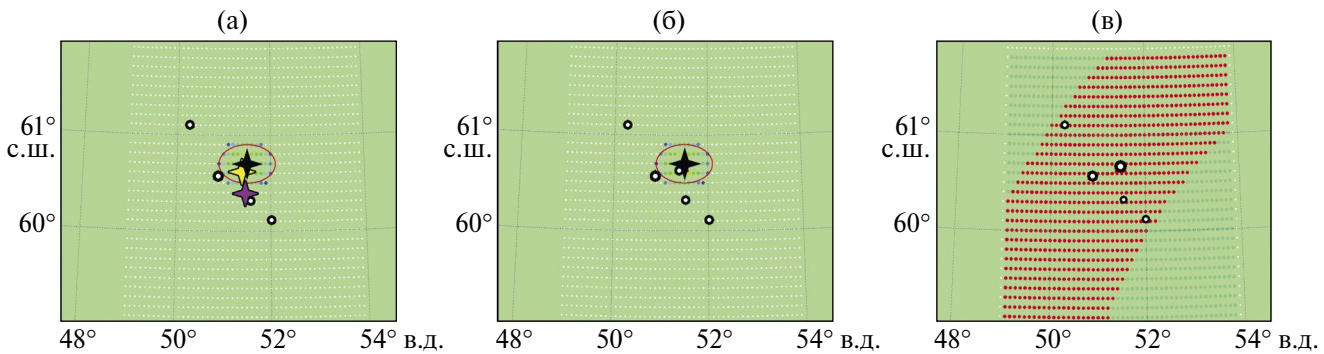


Рис. 5. Результат расчета программы ProLom на основе бюллетеня, составленного из макросейсмических и инструментальных данных Сысольского землетрясения 13.01.1939 г.: (а) — решение на основе макросейсмических и инструментальных данных; (б) — решение только на основе макросейсмических данных; (в) — область, в которой должен располагаться эпицентр, вычисленная на основе инструментальных данных. Черной звездой указан вычисленный эпицентр. Красной линией — эллипс ошибок. Розовой звездой указан эпицентр землетрясения по инструментальным данным, согласно [Никонов, Чепкунас, 2009]. Желтой звездой — эпицентр по макросейсмическим данным, согласно работе [Никонов, Чепкунас, 2009]. Кружками указаны географические пункты, для которых имеются значения 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).

характерны землетрясения с небольшим количеством макросейсмических сведений и данные лишь по одной или двум сейсмическим станциям. Чаще всего при локации таких землетрясений использовались только макросейсмические сведения.

В данной статье был предложен метод вероятностной оценки локации землетрясений на основе совместного анализа макросейсмических и инструментальных данных. Метод был реализован в программе ProLom (Probabilistic Locator by Macroseismics). Программа позволяет

пользователю задавать макросейсмическую информацию в определенных пунктах, добавлять к ней инструментальную информацию, состоящую из времен приходов сейсмических волн на станции и получать вероятностную оценку локации сейсмических событий, а также значение магнитуды.

Работоспособность метода была проверена на тестовом землетрясении 20.05.1967 г., по которому имеется большое количество макросейсмических сведений и инструментальных данных. На основе этих данных был составлен модельный бюллетень,

наиболее характерный для землетрясений данного региона в первой половине XX века. А именно, ограниченное количество макросейсмических сведений и данные по одной сейсмической станции. Полученное решение по модельному бюллетеню совпало в пределах эллипса ошибок с решением, вычисленным в ISC по всей совокупности инструментальных данных.

Положительный результат по тестовому землетрясению позволил приступить к анализу конкретных землетрясений, произошедших в пределах севера ВЕП в 1911 и 1939 гг. По землетрясению 1911 г. имелись времена вступления только на одной станции PUL (Пулково) и которые ранее не использовались в локации. С помощью программы ProLom были получены параметры гипоцентра, которые учитывали как макросейсмические сведения, так и инструментальные данные. Напротив, для Сысольского землетрясения 1939 г. были получены параметры гипоцентра, на которые не оказали влияние инструментальные данные.

Таким образом, был создан дополнительный инструмент вероятностной локации раннеинструментальных землетрясений, который

позволяет использовать все доступные, и порой скудные для удаленных и малоразвитых территорий, данные по макросейсмическим проявлениям и временам вступлений на сейсмических станциях. Данный инструмент в дальнейшем будет применяться при анализе землетрясений на севере Восточно-Европейской платформы и при необходимости совершенствоваться.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследования выполнены при финансовой поддержке тем НИР, включенных в государственное задание ИФЗ РАН и ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН (№ 122011300389-8), а также в рамках государственного задания ФИЦ ЕГС РАН (№ 075-01271-23) и с использованием данных, полученных на уникальной научной установке “Сейсмоинфразвуковой комплекс мониторинга арктической криолитозоны и комплекс непрерывного сейсмического мониторинга Российской Федерации, сопредельных территорий и мира”.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Исходные макросейсмические и инструментальные данные для землетрясений 20.05.1967 г., 30.06.1911 г. и 13.01.1939 г.

Таблица П1. Модельный бюллетень из макросейсмических и инструментальных данных для землетрясения 20.05.1967 г.

Макросейсмические данные				Инструментальные данные					
Название пункта	Координаты пунктов		<i>I</i>	Название станции	Координаты станции		Время вступления сейсмической волны, чч:мм:сс.		
	φ, град	λ, град			φ, град	λ, град	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Lg</i>
Апатиты	67.57	33.41	3	Пулково (PUL)	59.77	30.32	23:19:55.0	23:21:05.0	—
Кандалакша	67.14	32.41	4						
Чаваньга	66.11	37.76	3						
Алакүртти	66.96	30.36	2–3						
Зеленоборский	66.87	32.39	4						
Ковда	66.70	32.86	4						
Кестеньга	65.89	31.82	3						
Кемь	64.95	34.61	2–3						
Амбарный	65.90	33.72	3						
Кереть	66.28	33.56	4						

Таблица П2. Бюллетень из макросейсмических и инструментальных данных для землетрясения 30.06.1911 г.

Макросейсмические данные				Инструментальные данные					
Название пункта	Координаты пунктов		<i>I</i>	Название станции	Координаты станции		Время вступления сейсмической волны, чч:мм:сс.		
	φ, град	λ, град			φ, град	λ, град	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Lg</i>
Калгалакша	65.77	34.68	5–6	Пулково (PUL)	59.77	30.32	07:11:50.0	07:12:53.0	—
Варзуга	66.40	36.60	5						
Кузомень	66.29	36.87	5						
Умба	66.68	34.35	4–5						
Гридино	65.92	34.67	4–5						
Кашкаранцы	66.34	36.01	3–4						
Кандалакша	67.15	32.41	1						
Архангельск	64.54	40.51	1						
Холмогоры	64.22	41.66	1						
Кемь	64.96	34.60	1						
Петрозаводск	61.79	34.38	1						
Космозеро	62.33	35.06	1						

Таблица П3. Модельный бюллетень из макросейсмических и инструментальных данных для землетрясения 13.01.1939 г.

Макросейсмические данные				Инструментальные данные					
Название пункта	Координаты пунктов		<i>I</i>	Название станции	Координаты станции		Время вступления сейсмической волны, чч:мм:сс.		
	φ, град	λ, град			φ, град	λ, град	<i>P</i>	<i>S</i>	<i>Lg</i>
Нючпас	60.68	51.48	7	Пулково (PUL)	59.77	30.32	—	16:51:39.0	16:52:47.0
Грива	60.59	50.88	5–6	Свердловск (SVE)	56.83	60.64	16:48:43.0	16:49:51.0	—
Кажим	60.34	51.54	4						
Октябрьская	60.13	52.02	4–5						
Пустошь	61.12	50.28	4–5						

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Асминг В.Э., Морозов А.Н. ProLom. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023617379 от 07.04.2023 г.

Морозов А.Н., Ваганова Н.В., Асминг В.Э., Михайлова Я.А. Сейсмичность севера Русской плиты: уточнение параметров гипоцентров современных землетрясений // Физика Земли. 2018. № 2. С. 104–123.

Никонов А.А., Пономарёва О.Н. Беломорское землетрясение 30 июня 1911 г. — новое рассмотрение // Вопросы инженерной сейсмологии. 2008. Т. 35. № 2. С. 44–51.

Никонов А.А., Чепкунас Л.С. Сысольское землетрясение 13.01.1939 г. на Русской плите—уточнение параметров // Вопросы инженерной сейсмологии. 2009. Т. 36. № 4. С. 25–41.

Новый каталог сильных землетрясений на территории СССР с древнейших времен до 1975г. / Кондорская Н.В., Шебалин Н.В. (ред.). М.: Наука. 1977. 536 с.

- Панасенко Г.Д. Землетрясения Фенноскандии в 1951–1970. М.: изд-во МГК. 1977. 111 с.
- Панасенко Г.Д. Сейсмические особенности северо-востока Балтийского щита. Л.: Наука. 1969. 184 с.
- Панасенко Г.Д. Сейсмическое событие в Кандалашском заливе Белого моря 20 мая 1967 г. Новейшие и современные движения земной коры восточной части Балтийского щита. Петрозаводск: изд-во Карельского ФАН СССР. 1974.
- Петрова Н.В., Дягилев Р.А., Габсатарова И.П. Особенности затухания сейсмического эффекта землетрясений Русской платформы и Урала // Вопросы инженерной сейсмологии. 2020. Т. 47. № 4. С. 5–25.
- Di Giacomo D., Bondár I., Storchak D.A., Engdahl E.R., Bormann P., Harris J. ISC-GEM: Global Instrumental Earthquake Catalogue (1900–2009), III. Re-computed MS and mb, proxy MW, final magnitude composition and completeness assessment // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2015a. V. 239. P. 33–47.
- International Seismological Centre. [сайт]. URL: <http://www.isc.ac.uk/> (дата обращения 06.05.2023 г.)
- Karnik V. Magnitude differences // Pure Appl Geophys. V. 103. № II. P. 362–369.
- Kremenetskaya E., Asming V., Ringdal F. Seismic location calibration of the European Arctic // Pure Appl. Geophys. 2001. V. 158(1). P. 117–128.
- Nikonov A.A. Felt effects for earthquakes of the 20th century in the Eastern Baltic Shield. University of Helsinki. 1991. 34 p. ISBN 951-45-5777-8.
- Petrova N.V., Gabsatarova I.P. Depth corrections to surface-wave magnitudes for intermediate and deep earthquakes in the regions of North Eurasia // Journal of Seismology. 2020. V. 24. № 1. P. 203–219.
- Schweitzer J. The birth of modern seismology in the nineteenth and twentieth centuries // Earth Sciences History. 2007. V. 26. № 2. P. 263–280.
- Storchak D.A., Di Giacomo D., Engdahl E.R., Harris J., Bondár I., Lee W.H.K., Bormann P., Villaseñor A. The ISC-GEM global instrumental earthquake catalogue (1900–2009): Introduction // Physics of the Earth and Planetary Interiors. 2015. V. 239. P. 48–63.

Probabilistic Location of Early Instrumental Earthquakes Based on Macroseismic and Instrumental Data

A. N. Morozov^{a,*}, V. E. Asming^b, N. V. Vaganova^c, and Z. A. Evtyugina^b

^aSchmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

^bKola Branch, Geophysical Survey, Russian Academy of Sciences, Apatity, 184209 Russia

^cN. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Ural Branch,
Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, 163000 Russia

*e-mail: morozovaleksey@yandex.ru

Received May 10, 2023

revised June 28, 2023

accepted July 11, 2023

Abstract — There are regions of moderate seismicity that have long lacked a dense network of seismic stations due to their sparse population, inaccessibility, and low economic levels. Characterization of earthquakes in such regions is typically limited to the small amount of macroseismic information available and data from only one or two seismic stations. Most often, the location of such earthquakes was based on the use of macroseismic information alone. We propose a method for probabilistic estimation of the location of such earthquakes based on a joint analysis of their macroseismic and instrumental data. The technique is implemented in the ProLoM program (Probabilistic Locator by Macroseismics). In this study, we test the performance of the method on a test earthquake of May 20, 1967 and present the results of the analysis of the earthquakes that occurred in the north of the East European Platform on June 30, 1911 and January 13, 1939.

Keywords: location method, early instrumental earthquakes, north of the East European Platform