

УДК 550.34.094

Уточнённая одномерная скоростная модель земной коры Полярного Урала

© 2026 г. А.С. Зверева¹, И.А. Санина², Н.Н. Носкова¹, О.А. Усольцева²

¹ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия; ²ИДГ РАН, г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 15.12.2025 г.

Аннотация. Приведены результаты сравнительной оценки качества локации сейсмических событий на основе трёх скоростных моделей, используемых в практике сейсмологических наблюдений на Полярном Урале и прилегающих территориях. Показано, что применение одномерной скоростной модели MDL1 обеспечивает наибольшую точность локации сейсмических событий на региональных расстояниях. Использование рассчитанной на основе пакета VELEST новой одномерной модели MDL_{loc} повышает точность локации сейсмических событий на локальных расстояниях до 230 км.

Ключевые слова: скоростная модель земной коры, Полярный Урал, совместная инверсия, точность локации.

Для цитирования: Зверева А.С., Санина И.А., Носкова Н.Н., Усольцева О.А. Уточнённая одномерная скоростная модель земной коры Полярного Урала // Российский сейсмологический журнал. – 2026. – Т. 8, № 1. – С. 47–58. – DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.03>. – EDN: НКҮРҖВ

Введение

Мониторинг сейсмических событий любого генеза предполагает определение координат и глубины источника, а также его природы. Точность вычисления гипоцентра события в значительной степени зависит от сведений о скорости распространения сейсмических волн в исследуемом регионе – скоростной модели. Особенно это важно для лоцирования событий на локальных и региональных расстояниях. Основная сложность заключается в том, что относительно точно известны только координаты сейсмических станций и время вступления различных волн на сейсмограммах. При этом время в очаге события оценивается по заданной скоростной модели, а время вступления отдельных волн известно с некоторой погрешностью, связанной с чёткостью вступления (отношение сигнал/шум) и частотой оцифровки. Современные АЦП обеспечивают возможность определять времена вступлений с точностью от 0.01 до 0.005 сек. Для сейсмически активных регионов большое количество событий, используемых для локации, позволяет оценить параметры гипоцентров землетрясений с ошибкой в несколько километров. При этом разница в положении гипоцентра, как правило, связана с применением раз-

личных скоростных моделей и вычислительных алгоритмов.

Инверсия в общем смысле означает преобразование наблюждённых данных в некую модель. В нашем случае данные о временах пробега сейсмических волн преобразуются в одномерную скоростную модель, при этом, чтобы избежать появления дополнительных ошибок, связанных с ошибками в определении положения гипоцентров используемых событий, проводится совместная инверсия гипоцентра и скоростной модели. Этот подход предусматривает вычисления наилучших параметров гипоцентра и скорости путём одновременной минимизации всех ошибок времени распространения большого числа землетрясений, параметры которых используются при построении модели.

Название «минимальная» обозначает тот факт, что эта одномерная модель и поправки для станций приводят к минимальному среднему (среднеквадратичному) значению для всех землетрясений, используемых в инверсии. Поскольку решение этой задачи неоднозначно, обычно можно найти несколько различных моделей с примерно одинаковой остаточной дисперсией и точностью определения местоположения. В дальнейшем в качестве окончательной минимальной одномерной модели выбирается модель,

которая наилучшим образом соответствует геологическим особенностям исследуемого региона и априорной информации о структуре приповерхностного слоя. Существует большое количество численных методов решения подобных задач в сейсмологии, подробнее они описаны в работе [Kissling, 1988].

Исследования проводились на территории, в административном отношении расположенной на северо-востоке Республики Коми, в геологическом плане — на Полярном Урале и прилегающих зонах (рис. 1). Исследуемый регион характеризуется слабой природной сейсмичностью, но достаточно интенсивной техногенной, связанной с разработкой месторождений полезных ископаемых [Носкова, Верхованцев, 2025]. Контроль за распределением техногенной сейсмичности на территории региона и регистрация возможных откликов геологической среды на это воздействие делает актуальной задачу повышения точности локализации данных событий. Техногенные события, в основном, характеризуются малой магнитудой и поверхностным расположением источников. Малость магнитуды (амплитуды колебаний) делает регистрацию таких событий сложной задачей, т.к. отношение сигнал/шум в среднем не превышает двух, что затрудняет выделение первых вступлений сейсмических фаз.

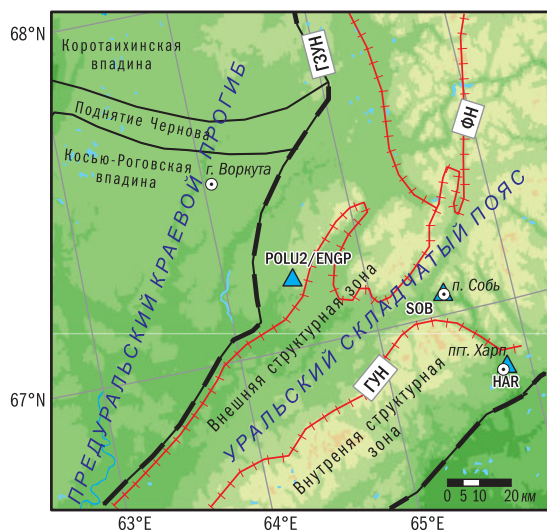


Рис. 1. Фрагмент тектонической карты Полярноуральского района [Юдин, 1988] с изменениями.

Жирная чёрная линия — границы Уральской складчато-надвиговой области; красная линия — главные региональные надвиги: ГУН — Главный Уральской надвиг, ГЗУН — Главный Западноуральский надвиг, ФН — Фронтальный надвиг; тонкая чёрная линия — структуры Предуральского краевого прогиба. Треугольниками обозначены сейсмические станции сети временных наблюдений в 2025 г.

В 2021 г. была открыта сейсмическая станция «Инта» (IN0) (рис. 2) Института геологии Федерального исследовательского центра Коми научного центра Уральского отделения Российской академии наук (ФИЦ Коми НЦ УрО РАН) в г. Инте на северо-востоке Республики Коми. До её открытия действующие стационарные станции техногенные события на севере республики не фиксировали [Носкова и др., 2023]. Благодаря установке станции IN0 появилась возможность регистрировать техногенную сейсмичность на территории Республики Коми. Однако, как оказалось, это лишь малая часть событий, происходящих на севере республики. Большинство сейсмических событий регистрируется только локальными станциями на расстояниях в несколько десятков километров от источника [Носкова, Верхованцев, 2025].

В пределах Полярного Урала и прилегающих территорий отдельный интерес представляет изучение фактического уровня сейсмичности на территории Воркутинского углепромышленного района и протекающих здесь горно-динамических процессов. С этой целью летом 2023 г. были проведены полевые экспедиционные работы временной сетью сейсмических станций [Носкова, Верхованцев, 2025]. В результате проведённых наблюдений было зарегистрировано 107 событий различного генезиса. Их изучение позволило разработать критерии для распознавания волновых форм шахтных событий и промышленных взрывов и построить график повторяемости шахтных событий, которые в основном являются горно-тектоническими ударами (ГТУ) на угольных шахтах.

Особенности строения приповерхностной части геологического разреза могут вносить значительные ошибки при определении координат данных событий. Таким образом, помимо задач, связанных с распознаванием природы сейсмических событий, важной проблемой является повышение качества их локализации и определения времени в очаге. Для этого летом 2025 г. в рамках проекта РФФ № 25-17-00106 были продолжены начатые в 2023 г. временные наблюдения сетью сейсмических станций, расположенной на Полярном Урале: в южной части хр. Енганепэ (ENGP), в 1 км от железнодорожной станции Сось (SOB) и на окраине пгт Харп (HAR) (рис. 1).

Целью настоящего исследования является анализ точности определения координат сейсмических событий на исследуемой территории с использованием различных скоростных моделей и расчёт параметров новой модели, учитывающей особенности скоростного строения в верхней части земной коры.

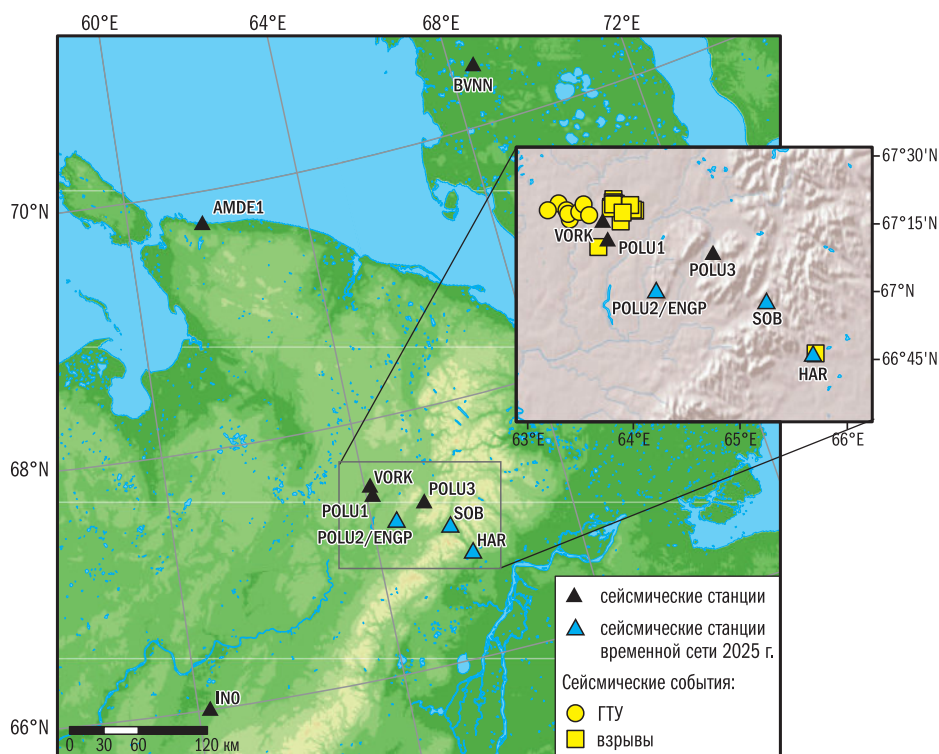


Рис. 2. Карта района исследования с местоположением сейсмических станций и положение эпицентров изучаемых сейсмических событий.

ГТУ – горно-тектонические удары

Район исследования

Территория настоящих исследований охватывает северные сегменты Уральской складчато-надвиговой области и Предуральского краевого прогиба (рис. 1). Предуральский краевой прогиб представляет собой линейно вытянутую вдоль западного склона Урала систему крупных опусканий, сформировавшихся в зоне сочленения Печорской плиты и Уральского складчатого пояса. Граница Предуральского краевого прогиба и Урала проводится по высокоамплитудному Главному Западноуральскому надвигу [Юдин, 1994].

Уральская складчато-надвиговая область представлена палеоконтинентальным и палеоокеаническим секторами, границей которых является Главный Уральский надвиг (ГУН). Внешняя (западная) структурная зона Урала представляет собой бывшую пассивную окраину Восточно-Европейской платформы. В результате коллизии и интенсивных деформаций она стала частью Уральской складчато-надвиговой области [Тимонин, 1998]. Породы континентального сектора образуют протяжённый надвиговой пояс, пере-

крывающий восточный край платформы. Внутренняя (осевая) структурная зона Урала протягивается в виде выходов фундамента. Её западной границей является ГУН, представляющий главную сутурную зону Урала [Юдин, 1994]. Наиболее важные данные о глубинном строении Полярного Урала предоставляют геолого-геофизические профили [Рыбалка и др., 2011], а также дальнейшие переинтерпретации этих материалов [Юдин, Ремизов, 2014].

Исходные данные

В качестве исходных данных были отобраны события, произошедшие в регионе с 2012 по 2025 г.: ГТУ на угольных шахтах «Воркутинская» и «Комсомольская» Воркутского месторождения, «Воргашорская» Воргашорского месторождения Печорского угольного бассейна, а также промышленные взрывы на угольном разрезе «Юньягинский», на карьере по добыче щебня и бутового камня «Юнь-Ягинский» и на одном из карьеров по добыче кварцевого диорита Подгорненского месторождения (рис. 2, табл. 1).

Изучаемые события зарегистрированы:

– региональными сейсмическими станциями – «Воркута» (VORK) [Носкова, Асминг, 2025], «Инта» (IN0) Института геологии Коми НЦ УрО РАН им. Н.П. Юшкина (<https://geo.komisc.ru/>), «Амдерма» (AMDE1) ФИЦКИА-УрО РАН им. Н.П. Лавёрова (<https://www.fdsn.org/networks/detail/AH>), «Бованенково» (BVNN) ФИЦ ЕГС РАН;

– станциями временных наблюдений на Полярном Урале в 2023 г. – POLU1 на карьере по добыче щебня и бутового камня «Юнь-Ягинский», POLU2 в южной периклинали части хр. Енганепэ, POLU3 в южной части хр. Нияхой [Носкова, Верхованцев, 2025; Асминг и др., 2025];

– временными станциями, установленными в рамках настоящего проекта в 2025 г.: ENGP, SOB и HAR, которые образовали сейсмический профиль с расстановкой сейсмоприёмников на расстояниях 30, 70 и 100 км.

Метод

В силу ограниченности данных, зарегистрированных в период работы временной сети сейсмических станций, для расчёта одномерной скоростной модели была использована программа VELEST [Kissling, 1995], входящая в пакет программ SEISAN [Havskov et al., 2020]. Данная программа достаточно давно используется в мировой сейсмологической практике для построения так называемой оптимальной одномерной скоростной модели [Sanina et al., 2005]. Особенностью этой программы является одновременная инверсия гипоцентров событий и скоростной модели, что позволяет избежать систематических ошибок, связанных с неточным знанием скоростной модели и погрешностями в координатах станций. Инверсия ограничена первыми фазами сейсмических волн P и S . Полученная модель может быть использована в качестве уточнённой скоростной модели для локации событий или в качестве начальной модели для 3D-инверсии.

Оптимальной эта модель называется потому, что среднеквадратичная невязка времён пробега волн минимальна для всех событий, используемых для построения новой скоростной модели. Станционная невязка отражает основные особенности геологического строения приповерхностных слоёв, влияющих на величину времён пробега сейсмических волн.

Входными параметрами для расчётов по программе VELES являются:

– бюллетень сейсмических событий, которые будут использованы для процедуры инверсии;

– файл с управляющими параметрами для расчёта, в котором задаётся количество событий и центр декартовой системы координат, совпадающий с центром исследуемого региона;

– список сейсмических станций, используемых для расчёта, и начальная скоростная модель.

Анализ и обсуждение результатов

Выбор начальной скоростной модели. Выбор начальной скоростной модели был основан на данных, полученных в результате двух различных проектов: КВАРЦ в 1984 г. НПО «Нефтегеофизика» [Егоркин, 1991] и EUROBRIDGE 1999 [EUROBRIDGE ..., 1999], где проводились исследования по методике глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ). Таким образом, для проведения расчётов в программе VELEST были отобраны три скоростные модели: для Восточно-Европейской платформы (ВЕП) (MDL1) [EUROBRIDGE ..., 1999], для восточной части Печорской плиты (MDL2) и Предуральского краевого прогиба (MDL3) [Егоркин, 1991] (табл. 2).

Проведён анализ точности локации сейсмических событий на основании описанных выше трёх скоростных моделей (табл. 2) и выбору оптимальной из них. Для этого необходимо наличие событий с параметрами эпицентра, определёнными с высокой точностью. Такие события, согласно классификации в работе [Bondar et al., 2004], называются «эталонными событиями» (GT – «ground truth») с точно установленным местоположением источника и временем в очаге. Чаще всего ими являются взрывы или ГТУ.

В настоящий момент существует единая база таких событий GT IASPEI, размещённая на сайте Международного сейсмологического центра (ISC) [International ..., 2025]. Список эталонных событий контролируется рабочей группой «Комиссия по сейсмологическим наблюдениям и интерпретации» (CoSOI). Однако в общей базе эталонные события кодируются категориями GT0, GT1, GT2 или GT5, где эпицентр события GTX известен с точностью до X км с уровнем достоверности 95%. Для района исследования в единой базе нет таких событий, и в целом в настоящий момент точность определения параметров гипоцентров событий невысокая [Носкова, Асминг, 2018].

Однако выбранный нами метод построения одномерной скоростной модели допускает использование достаточно ограниченного

Таблица 1. Параметры гипоцентров изучаемых сейсмических событий за период 2023–2025 гг.

№	Дата дд.мм.гггг	t_0 , чч:мм:сс	φ , °N	λ , °E	h , км	Тип события	Станции
1	21.02.2023	15:04:51	67.529	63.800	0	ГТУ	IN0, AMDE1, BVNN
2	20.03.2023	22:14:17	67.597	63.723	0	ГТУ	IN0, AMDE1, BVNN
3	28.03.2023	15:17:45	67.566	63.787	0	ГТУ	IN0, AMDE1, BVNN
4	22.05.2023	22:58:31	67.580	63.602	0	ГТУ	IN0, AMDE1, BVNN
5	22.06.2023	21:40:11	67.551	63.794	0	ГТУ	IN0, AMDE1, BVNN
6	22.07.2023	11:00:12	67.481	64.289	0	Взрыв	POLU1, IN0
7*	25.07.2023	11:19:41	67.515	64.431	0	Взрыв	POLU2, IN0, AMDE1
8*	27.07.2023	10:39:40	67.534	64.415	0	Взрыв	POLU2, IN0, AMDE1
9*	01.08.2023	18:39:07	67.529	63.995	0	ГТУ	POLU2, IN0, AMDE1, BVNN
10*	02.08.2023	10:14:57	67.512	64.327	0	Взрыв	POLU2, IN0, AMDE1
11	05.08.2023	23:08:06	67.549	63.906	0	ГТУ	POLU2, IN0, AMDE1
12	07.08.2023	23:23:41	67.574	63.965	0	ГТУ	POLU3, IN0, AMDE1
13	12.08.2023	10:59:59	67.509	64.451	0	Взрыв	POLU3, IN0, AMDE1
14	21.06.2024	10:00:08	67.557	64.257	0	Взрыв	VORK, IN0
15	25.06.2024	11:15:12	67.570	64.265	0	Взрыв	VORK, IN0
16	02.07.2024	11:00:12	67.556	64.261	0	Взрыв	VORK, IN0
17	05.07.2024	10:30:16	67.558	64.252	0	Взрыв	VORK, IN0
18	16.07.2024	10:00:42	67.542	64.227	0	Взрыв	VORK, IN0
19	18.07.2024	10:40:15	67.550	64.263	0	Взрыв	VORK, IN0
20	22.07.2024	10:20:13	67.542	64.226	0	Взрыв	VORK, IN0
21	24.07.2024	10:20:26	67.538	64.220	0	Взрыв	VORK, IN0
22	27.07.2024	10:10:17	67.551	64.279	0	Взрыв	VORK, IN0
23	29.07.2024	10:10:28	67.550	64.251	0	Взрыв	VORK, IN0
24	14.07.2025	12:31:21	66.824	65.859	0	Взрыв	SOB, HAR
25	10.09.2025	10:21:49	67.404	64.018	0	Взрыв	VORK, ENGP

Примечание: t_0 – время в очаге; * – эталонные сейсмические события.

Таблица 2. Одномерные скоростные модели региона исследования по данным профилей ГСЗ [Егоркин, 1991; EUROBRIDGE ..., 1999]

MDL1			MDL2			MDL3		
h , км	V_p , км/с	V_s , км/с	h , км	V_p , км/с	V_s , км/с	h , км	V_p , км/с	V_s , км/с
0	5.7	2.7	0	5.2	3.0	0	5.7	3.2
2	6.3	3.7	3	6.0	3.6	3	6.0	3.4
13	6.5	3.8	18	6.1	3.8	10	6.9	4.0
30	7.3	4.0	25	6.8	4.0	25	7.1	4.2
50	8.3	4.9	32	6.9	4.0	35	7.2	4.2
–	–	–	40	7.2	4.3	–	–	–

количества исходных данных при условии, что их координаты известны с высокой точностью – карьерные взрывы, ГТУ. Таким образом, для работы из общего набора исходных данных отобраны четыре события, условно названные «эталонные события» (номера 7–10 в табл. 1) с известной природой источников и высокой точностью определения параметров эпицент-

тра, зарегистрированные тремя и более сейсмическими станциями. В качестве таких событий были выбраны один ГТУ, произошедший на шахте «Воркутинская» 1 августа 2023 г. [Носкова и др., 2024], и три взрыва на угольном разрезе «Юньягинский» (рис. 2, табл. 1). Кроме этого, о взрывных работах на угольном разрезе всегда предупреждает МКУ «Управление

по делам ГО и ЧС» муниципального округа «Воркута». Поэтому время и место проведения взрывов известно достоверно.

Для проверки исходных скоростных моделей и оценки ошибок локации для каждой из них была проведена процедура релокации событий. Вступления фаз P - и S -волн были определены по записям волновых форм исходных сейсмограмм и оставались без изменений при каждой последующей процедуре релокации. Также оставались фиксированными координаты эпицентров событий. Это допущение возможно, исходя из предположения о точности и надёжности определения параметров источников. Локация проводилась в программном комплексе SEISAN [Havskov et al., 2020]. Результаты локации при использовании скоростных моделей MDL1 и MDL3 близки между собой (табл. 3, рис. 3), однако более стабильный результат и меньшая средняя ошибка наблюдается при использовании модели MDL1. Таким образом, MDL1 для ВЕП [EUROBRIDGE ..., 1999] в дальнейшем будет использована в качестве исходной для процедуры инверсии и расчёта итоговой одномерной модели по программе VELEST. Результаты расчёта эллипсов ошибок приведены в табл. 3 и на рис. 3, из которых видно, что наибольшая погрешность наблюдается в направлении север–юг, что связано со взаимным расположением сейсмических событий и станций, использованных при анализе.

Таблица 3. Результаты проверки точности начальной скоростной модели при локации событий

Дата, дд.мм.гггг	Модель	$\delta\varphi$, км	$\delta\lambda$, км	δt_0 , с
Шахта «Воркутинская» (67.526°N, 64.016°E)				
01.08.2023	MDL1	9.8	2.7	0.45
	MDL2	19.0	4.7	1.09
	MDL3	10.3	2.0	0.40
Угольный разрез «Юньягинский» (67.514°N, 64.381°E)				
25.07.2023	MDL1	39.1	4.6	0.37
	MDL2	66.9	8.2	1.24
	MDL3	42.1	5.2	0.72
27.07.2023	MDL1	39.6	4.7	0.31
	MDL2	95.9	11.8	1.63
	MDL3	32.3	3.9	0.44
02.08.2023	MDL1	12.4	3.6	0.28
	MDL2	40.4	12.3	1.50
	MDL3	18.2	5.5	0.67

Расчёт поправок к начальной скоростной модели. Для уточнения исходной скоростной

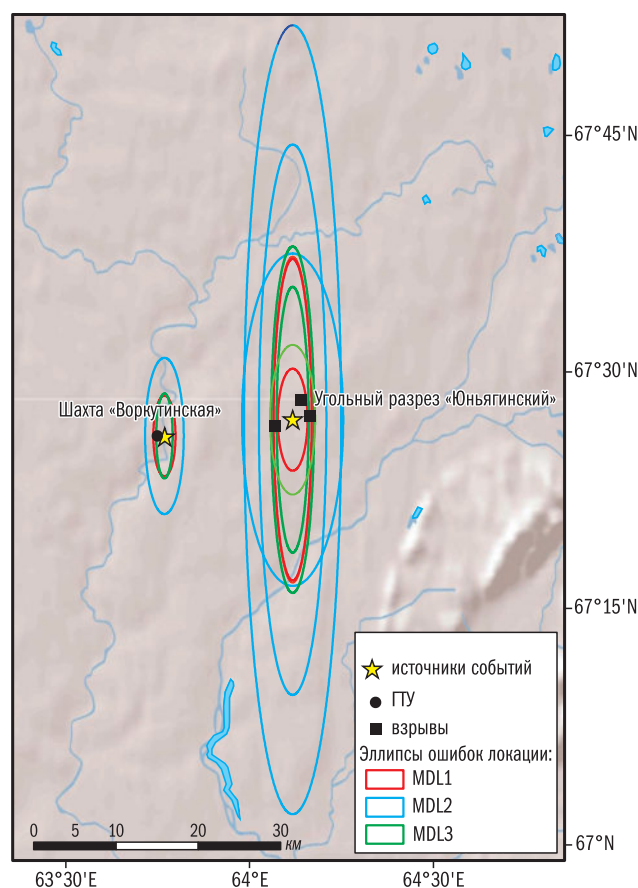


Рис. 3. Эллипсы ошибок локации эталонных сейсмических событий при использовании различных скоростных моделей из табл. 2.

ГТУ – горно-тектонические удары

модели была использована программа VELEST и все 25 событий из исходного набора (табл. 1), включая данные сети временных наблюдений 2025 г. (рис. 2). Параметры их эпицентров были определены с использованием скоростной одномерной модели MDL1. Для работы программы VELEST (см. раздел «Метод») был подготовлен файл исходных данных, включающий бюллетень со вступлениями P - и S -волн, начальную скоростную модель MDL1 и координаты сейсмических станций.

Далее была проведена процедура инверсии, состоявшая из пяти итераций. Расчёты проведены для 122 лучей, из которых P -волнам соответствует 59 лучей, S -волнам – 63 луча. В табл. 4 представлены наименьшие значения среднеквадратичной невязки (СКН) между реальными измерениями и моделью после введения стационарных поправок, релокации событий и корректировки скоростной модели на каждой итерации, а также относительная оценка улучшения СКН в %.

Из табл. 4 видно, что пяти итераций вполне достаточно для нахождения оптимальных параметров. Уменьшение СКН почти не происходит на четвертой и пятой итерации, основные улучшения и подбор оптимальных значений скоростной модели, стационарных поправок и параметров гипоцентров осуществлены за первые три шага. Уточнённая скоростная модель P - и S -волн $MDL1_{\text{юс}}$ представлена в табл. 5.

Помимо уточнения скоростной модели, программа VELEST также рассчитывает средние стационарные поправки δt_p и δt_s к временам прихода P - и S -волн соответственно для каждой сеймостанции (табл. 6).

Отрицательные поправки наблюдаются на сейсмических станциях, расположенных во внешней структурной зоне Полярного Урала и в Предуральском краевом прогибе, что гово-

рит о более высоких скоростях P -волн и S -волн в среде. Положительные поправки к скоростям объёмных волн в пределах внутренней структурной зоны Уральского складчатого пояса – около пос. Сось (SOB) и в пгт Харп (HAR).

Для оценки точности локации с использованием уточнённой скоростной модели $MDL1_{\text{юс}}$ из общего набора данных были отобраны 12 событий. Основным критерий отбора – параметры эпицентра определены тремя и более сейсмическими станциями. Полученные результаты расчёта (табл. 7) эллипса ошибок локации (ϕ , $\delta\lambda$) и времени в очаге δt_0 сравнивались с предыдущими по исходной модели. На основании этих расчётов были построены графики ошибок определения координат эпицентров по широте и долготе, а также определения времени в очаге (рис. 4).

Таблица 4. Среднеквадратичная невязка (СКН) имеющихся данных при расчёте по VELEST после каждой итерации для всех лучей и отдельно – для прямых и преломлённых лучей

Тип лучей	Номер итерации				
	1, СКН, с	2, СКН, с	3, СКН, с	4, СКН, с	5, СКН, с
Прямые	0.22	0.14	0.06	0.04	0.03
Преломлённые	0.55	0.35	0.25	0.24	0.24
Все лучи	0.46 (40%)	0.29 (37%)	0.20 (30%)	0.19 (7%)	0.18 (3%)

Примечание: в нижней строке в скобках показано, на сколько уменьшилась СКН в процентах после предыдущего шага.

Таблица 5. Уточнённая скоростная модель P - и S -волн $MDL1_{\text{уточн}}$

V_p , км/с	δV_p , км/с	V_s , км/с	δV_s , км/с	h , км
5.906	0.046	2.756	-0.126	0
6.396	0.020	3.774	0.004	2
6.407	0.006	3.775	0.000	13
7.172	0.007	3.949	-0.074	30
8.404	-0.022	5.000	0.063	50

Примечание: δ – разница в скоростях P - и S -волн между исходной и уточнённой моделями.

Таблица 6. Средние стационарные поправки ко временам прихода P - и S -волн

Код станции	δt_p , с	δt_s , с
AMDE1	0.536	0.769
BVNN	1.035	0.757
VORK	-0.326	-0.237
POLU1	-0.850	-1.015
POLU2/ENGP	-0.333	-0.106
POLU3	-1.032	-0.703
IN0	1.061	0.628
SOB	0.105	0.182
HAR	0	-0.020

Таблица 7. Ошибки расчёта параметров гипоцентров при использовании исходной MDL1 и уточнённой MDL1_{уточн} скоростной модели изучаемых событий

Δ , км	$\delta\varphi$, км		$\delta\lambda$, км		δt_0 , с	
	MDL1	MDL1 _{loc}	MDL1	MDL1 _{loc}	MDL1	MDL1 _{loc}
$\Delta > 230$	30.00	30.06	5.10	5.34	0.39	0.48
$\Delta < 230$	19.64	18.44	4.14	4.23	0.32	0.31
Среднее	23.96	23.28	4.54	4.69	0.35	0.39

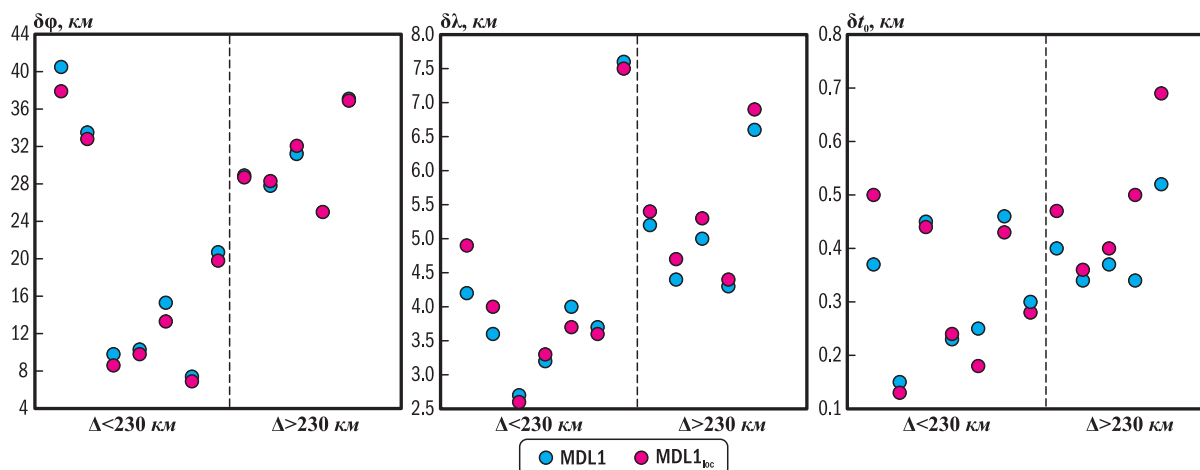


Рис. 4. Оценка ошибок при определении параметров гипоцентров сейсмических событий при использовании исходной скоростной модели MDL1 и уточнённой модели MDL1_{loc}: а – ошибка определения координат эпицентра по широте $\delta\varphi$; б – ошибка определения координат эпицентра по долготе $\delta\lambda$; в – ошибка времени в очаге δt_0 .

Δ – минимальные эпицентральные расстояния

Из рис. 4 и табл. 7 видно, что наблюдаются различия при определении параметров гипоцентров сейсмических событий в зависимости от эпицентрального расстояния Δ . События, зарегистрированные станциями на расстояниях более 230 км, имеют меньшие значения эллипса ошибок и времени в очаге при использовании исходной скоростной модели MDL1. При этом события на $\Delta < 230$ км в целом имеют меньшие значения ошибок при использовании уточнённой скоростной модели MDL1_{loc}. В целом ошибка локализации сейсмических событий в данном регионе большая и значительно превышает разницу в локализации при использовании исходной и уточнённой моделей, что может быть связано с малым количеством сейсмических станций в районе исследования и низким соотношением сигнал/шум.

Средние значения ошибок по широте $\delta\varphi$ для всех событий меньше при использовании уточнённой скоростной модели MDL1_{loc} на 0.68 км, однако по долготе $\delta\lambda$ незначительно выше на 0.15 км, так же как и по времени в очаге δt_0 на 0.03 с.

Дополнительно был проведён анализ времени вступления первых продольных волн вдоль профиля временной сети сейсмических станций ENGP, SOB, HAR, который также показывает преимущества модели MDL1_{loc} на эпицентральных расстояниях до 130 км. Таким образом, для дальнейших исследований предпочтительно использовать уточнённую скоростную модель MDL1_{loc} в качестве основной для локализации локальных событий, а для региональных – использовать общую модель MDL1.

Заключение

В проведённом исследовании представлены результаты оценки влияния различных скоростных моделей на точность локализации сейсмических событий в районе Полярного Урала. Также приведены результаты построения «оптимальной» скоростной модели, учитывающей особенности верхней части геологического разреза. Редкая сейсмическая сеть и малое количество событий не позволили существенно уточнить

исходную модель MDL1. На данном уровне развития сейсмологических наблюдений в регионе предлагается использовать для региональных расстояний $\Delta > 230$ км модель MDL1, а на локальных $\Delta < 230$ км – уточнённую модель MDL1_{loc}, что дополнительно подтверждено наблюдениями вдоль сейсмического профиля временной сети сейсмических станций. Дальнейшее развитие сети наблюдений, планируемая установка в рамках выполнения проекта малоапертурной сейсмической группы позволят увеличить количество и точность локаций сейсмических событий и уточнить существующие скоростные модели.

Работа выполнена при поддержке гранта РНФ. Проект № 25-17-00106.

Литература

- Асминг В.Э., Асминг С.В., Баранов С.В., Верхованцев Ф.Г., Габсатарова И.П., Гоев А.Г., Дягилев Р.А., Ефременко М.А., Карпинский В.В., Коломиец Ю.Н., Конечная Я.В., Надёжка Л.И., Нестеренко М.Ю., Носкова Н.Н., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А. I. Результаты сейсмического мониторинга различных регионов России. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2023 году. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 33–41. – EDN: YFAJGG
- Егоркин А.В. Строение земной коры по сейсмическим геотраверсам. Глубинное строение территории СССР / Ред. В.П. Белоусова, Н.И. Павленкова, Г.Н. Кветковская. – М.: Наука, 1991. – С. 118–135.
- Носкова Н.Н., Асминг В.Э. Сейсмологические наблюдения на севере Республики Коми // Современные методы обработки и интерпретации сейсмологических данных. Тезисы XIX Международной сейсмологической школы / Отв. ред. А.А. Маловичко. – Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2025. – С. 66. – EDN: FXNMCQ
- Носкова Н.Н., Асминг В.Э. Уточнение параметров ряда сейсмических событий, произошедших в Воркутинском районе Республики Коми в 1971–2016 гг. // Геофизические исследования. – 2018. – Т. 19, № 4. – С. 46–63. – DOI: 10.21455/gr2018.4-4. – EDN: VOENRQ
- Носкова Н.Н., Верхованцев Ф.Г. Временные сейсмические наблюдения на севере Республики Коми (Полярный Урал) в 2023 году // Вестник геонаук. – 2025. – № 2 (362). – С. 34–43. – DOI: 10.19110/geov.2025.2.4. – EDN: RYJXVW
- Носкова Н.Н., Верхованцев Ф.Г., Асминг В.Э., Ваганова Н.В., Попов И.В. Сейсмические события в Воркутинском углепромышленном районе в 2023 году // Вестник геонаук. – 2024. – № 1 (349). – С. 34–42. – DOI: 10.19110/geov.2024.1.4. – EDN: GLOIMG
- Носкова Н.Н., Попов И.В., Машин Д.О. Новый пункт сейсмических наблюдений на территории Республики Коми // Геофизические исследования. – 2023. – Т. 24, № 3. – С. 52–68. – DOI: 10.21455/gr2023.3-3. – EDN: VCSWZS
- Рыбалка А.В., Петров Г.А., Кашубина Т.В., Куликов В.А., Егоркин А.В., Душин В.А., Кашубин С.Н. Глубинное строение Урала по данным Полярно-Уральского трансекта // Региональная геология и металлогения. – 2011. – № 48. – С. 25–36. – EDN: OWDDIJ
- Тимонин Н.И. Печорская плита: история геологического развития в фанерозое. – Екатеринбург: УрО РАН, 1998. – 240 с.
- Юдин В.В. (отв. исп.). Структурно-тектоническая карта Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции. Масштаб 1:1000000 / Редколлегия: В.И. Богацкий, А.С. Головань, В.И. Громека, Д.М. Данилевская, В.А. Дедеев, Н.И. Лисин, В.Б. Ростовщиков, А.К. Цехмейстрюк, А.Н. Шарданов, Г.В. Чернявский, В.В. Юдин, Б.А. Яралов. – М.: «Центргеология» Мингео СССР, 1988.
- Юдин В.В. Орогенез севера Урала и Пай-Хоя. – Екатеринбург: УИФ «Наука», 1994. – 286 с.
- Юдин В.В., Ремизов Д.Н. Сбалансированная геодинамическая модель по профилю «Полярноуральский трансект» // Геология и минеральные ресурсы Европейского северо-востока России. Материалы XVI Геологического съезда Республики Коми. Т. II. – Сыктывкар: ИГ Коми НЦ УрО РАН, 2014. – С. 77–79. – EDN: YHWDPX
- Bondár I., Myers S.C., Engdahl E.R., Bergman E.A. Epicenter accuracy based on seismic network criteria // Geophysical Journal International. – 2004. – V. 156, N 3. – P. 483–496. – DOI: 10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x
- EUROBRIDGE Seismic Working Group. Seismic velocity structure across the Fennoscandia–Sarmatia suture of the East European Craton beneath the EUROBRIDGE profile through Lithuania and Belarus // Tectonophysics. – 1999. – V. 314, Iss. 1-3. – P. 193–217. – DOI: 10.1016/S0040-1951(99)00244-9
- Havskov J., Voss P.H., Ottemöller L. Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN // Seismological Research Letters. – 2020. – V. 91, N 3. – P. 1846–1852. – DOI: 10.1785/0220190313
- International Seismological Centre (ISC). On-line Bulletin [Site]. – United Kingdom, Thatcham: Internat. Seismol. Centre, 2025. – URL: <http://www.isc.ac.uk/isc-bulletin>. – DOI: 10.31905/D808B830
- Kissling E. Geotomography with local earthquake data // Reviews of Geophysics. – 1988. – V. 26, N 4. – P. 659–698. – DOI: 10.1029/RG026i004p00659

Kissling E. Program VELEST user's guide - Short Introduction / Technical report. — Zurich, Switzerland: Institute of Geophysics, ETH Zurich, 1995. — 25 p.

the results of seismic tomography // *Doklady Earth Sciences.* — 2005. — V. 405, N 8. — P. 1193–1198. — EDN: LIYBUP

Sanina I.A., Nizkous I.V., Gontovaya L.I., Kissling E. Structure of the Kamchatka subduction zone based on

Сведения об авторах

Зверева Анастасия Сергеевна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федерального исследовательского центра «Единая геофизическая служба Российской академии наук» (ФИЦ ЕГС РАН), г. Обнинск, Россия. E-mail: zvereva.as59@gmail.com

Санина Ирина Альфатовна, д-р физ.-мат. наук, гл. науч. сотр. Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН), г. Москва, Россия. E-mail: iasanina51@gmail.com

Носкова Наталия Николаевна, канд. геол.-мин. наук, ст. науч. сотр. ФИЦ ЕГС РАН, г. Обнинск, Россия, E-mail: nataliyageo@mail.ru

Усольцева Ольга Алексеевна, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ИДГ РАН, г. Москва, Россия, E-mail: kriukova@mail.ru

A refined one-dimensional velocity model of the Earth's crust of the Polar Urals

© 2026 A.S. Zvereva¹, I.A. Sanina², N.N. Noskova¹, O.A. Usoltseva²

¹GS RAS, Obninsk, Russia; ²IDG RAS, Moscow, Russia

Received December 15, 2025

Abstract Results of a comparative assessment of the quality of seismic event locations based on three velocity models used in seismological observations in the Subpolar Urals are presented. It is shown that the use of the one-dimensional velocity model MDL1 provides the highest accuracy of seismic event location at regional distances. The use of a new one-dimensional model, MDL1, calculated using the VELEST package, improves the accuracy of seismic event location at local distances of up to 230 km.

Keywords Crustal velocity model, Polar Urals, joint inversion, location accuracy.

For citation Zvereva, A.S., Sanina, I.A., Noskova, N.N., & Usoltseva, O.A. (2026). [A refined one-dimensional velocity model of the Earth's crust of the Polar Urals]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 8(1), 47-58. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2026.1.03>. EDN: HKYPJB

References

- Asming, V.E., Asming, S.V., Baranov, S.V., Verkholtantsev, F.G. et al. (2025). [I. Results of seismic monitoring of various regions of Russia. East European Platform, Urals and Western Siberia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2023 godu* [Earthquakes of Russia in 2023] (pp. 33-41). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: YFAJJG
- Bondár, I., Myers, S.C., Engdahl, E.R., & Bergman, E.A. (2004). Epicenter accuracy based on seismic network criteria. *Geophysical Journal International*, 156(3), 483-496. DOI: [10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2004.02070.x)
- Egorkin, A.V. (1991). *Stroenie zemnoi kory po seismicheskim geotransversam. Glubinnoe stroenie territo-rii SSSR. Red. V.P. Belousova, N.I. Pavlenkova, G.N. Kvetkovskaia* [Structure of the Earth's Crust Based on Seismic Geotransverses. Deep Structure of the USSR. Eds. V.P. Belousov, N.I. Pavlenkova, G.N. Kvetkovskaya] (pp. 118-135). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- EUROBRIDGE Seismic Working Group. (1999). Seismic velocity structure across the Fennoscandia–Sarmatia suture of the East European Craton beneath the EUROBRIDGE profile through Lithuania and Belarus. *Tectonophysics*, 314(1-3), 193-217. DOI: [10.1016/S0040-1951\(99\)00244-9](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00244-9)
- Havskov, J., Voss, P.H., & Ottemöller, L. (2020). Seismological observatory software: 30 Yr of SEISAN. *Seismological Research Letters*, 91(3), 1846-1852. DOI: [10.1785/0220190313](https://doi.org/10.1785/0220190313)
- International Seismological Centre. (2025). On-line Bulletin. DOI: [10.31905/D808B830](https://doi.org/10.31905/D808B830)
- Kissling, E. (1988). Geotomography with local earthquake data. *Reviews of Geophysics*, 26(4), 659-698. DOI: [10.1029/RG026i004p00659](https://doi.org/10.1029/RG026i004p00659)
- Kissling, E. (1995). *Program VELEST user's guide - Short Introduction. Technical report*. Zurich, Switzerland: Institute of Geophysics, ETH Zurich, 25 p.
- Noskova, N.N., & Asming, V.E. (2018). [Update of parameters of some seismic events in the Vorkuta area within 1971-2016]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 19(4), 46-63. (In Russ.). DOI: [10.21455/gr2018.4-4](https://doi.org/10.21455/gr2018.4-4). EDN: VOEHRQ
- Noskova, N.N., & Asming, V.E. (2025). [Seismological observations in the north of the Komi Republic]. In *Sovremennye metody obrabotki i interpretatsii seismologicheskikh dannykh. Tezisy XIX Mezhdunarodnoi seismologicheskoi shkoly. Otv. red. A.A. Malovichko* [Modern methods of processing and interpretation of seismological data. Abstracts of the XIX International Seismological Workshop. Resp. ed. A.A. Malovichko] (pp. 66-66). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.). EDN: FXNMCG
- Noskova, N.N., & Verkholtantsev, F.G. (2025). [Temporary seismic observations in the north of the Komi Republic (Polar Urals) in 2023]. *Vestnik geonauk* [Geosciences Bulletin], (2(362)), 34-43. (In Russ.). DOI: [10.19110/geov.2025.2.4](https://doi.org/10.19110/geov.2025.2.4). EDN: RYJXVW
- Noskova, N.N., Popov, I.V., & Mashin, D.O. (2023). [New seismic observation point on the territory of the Komi Republic]. *Geofizicheskie issledovaniia* [Geophysical Research], 24(3), 52-68. (In Russ.). DOI: [10.21455/gr2023.3-3](https://doi.org/10.21455/gr2023.3-3). — EDN: VCSWZS

- Noskova, N.N., Verkholtantsev, F.G., Asming, V.E., Vaganova, N.V., & Popov, I.V. (2024). [Seismic events in the Vorkuta coal mining region in 2023]. *Vestnik geonauk* [Geosciences Bulletin], (1(349)), 34-42. (In Russ.). DOI: 10.19110/geov.2024.1.4. EDN: GLOIMG
- Rybalka, A.V., Petrov, G.A., Kashubina, T.V., Kuli_kov, V.A., Egorkin, A.V., Dushin, V.A., & Kashubin, S.N. (2011). [Deep structure of the Urals according to the data of the Polar-Ural transect]. *Regional'naya geologiya i metallogeniya* [Regional Geology and Metallogeny], (48), 25-36 (In Russ.). EDN: OWDDIJ
- Sanina, I.A., Nizkous, I.V., Gontovaya, L.I., & Kissling, E. (2005). Structure of the Kamchatka subduction zone based on the results of seismic tomography. *Doklady Earth Sciences*, 405(8), 1193-1198. EDN: LIYBUP
- Timonin, N.I. (1998). *Pechorskaia plita: istoriya geologicheskogo razvitiia v fanerozoie* [Pechora plate: History of geological development in the Phanerozoic]. Ekaterinburg, Russia: UB RAS Publ., 240 p. (In Russ.).
- Yudin, V.V. (1994). *Orogenez severa Urala i Pai-Khoia* [Orogenesis of North Urals and Pay-Khoy]. Ekaterinburg, Russia: UIF Nauka Publ., 286 p. (In Russ.).
- Yudin, V.V. (Resp. ex.). Bogatsky, V.I., Golovan, A.S., Gromeka, V.I., Danilevskaya, D.M., et al. (Ed. Board). (1988). *Strukturno-tektonicheskaya karta Timano-Pechorskoi neftegazonosnoi provintsii. Masshtab 1:1000000* [Structural and tectonic map of the Timan-Pechora oil and gas province. Scale 1:1,000,000]. Moscow, Russia: USSR Ministry of Geology Publ. (In Russ.).
- Yudin, V.V., & Remizov, D.N. (2014). [Balanced geodynamic model along the Polar Ural transect profile]. In *Geologiya i mineral'nye resursy Evropeiskogo severovostoka Rossii. Materialy XVI Geologicheskogo s'ezda Respubliki Komi. T. II* [Geology and mineral resources of the European northeast of Russia. Proceedings of the XVI Geological Congress of the Komi Republic, Vol. II] (pp. 77-79). Syktyvkar, Russia: IG FRC Komi SC UB RAS Publ. (In Russ.). EDN: YHWDPX

Information about authors

Zvereva Anastasia Sergeevna, PhD, Senior Researcher of the Geophysical Survey of the Russian Academy of Sciences (GS RAS), Obninsk, Russia. E-mail: zvereva.as59@gmail.com

Sanina Irina Alfatovna, Dr., Chief Researcher of the Sadovsky Institute of Geosphere Dynamics, Russian Academy of Sciences (IDG RAS), Moscow, Russia. E-mail: iasanina51@gmail.com

Noskova Natalia Nikolaevna, PhD, Senior Researcher of the GS RAS, Obninsk, Russia, E-mail: nataliyageo@mail.ru

Usoltseva Olga Alekseevna, PhD, Senior Researcher of the IDG RAS, Moscow, Russia, E-mail: kriukova@mail.ru