

XXVI Уральская молодежная научная школа по геофизике

Г. Пермь, 2025

[Сайт конференции](#)

**Изучение строения Земной коры и верхней мантии в районе
Воронежского кристаллического массива по
сейсмологическим данным**

Шаповалов А.В., Гоев А.Г.

Институт динамики геосфер имени академика М. А. Садовского

РАН, Москва, Россия

E-mail: andrewsh20@mail.ru

Обрамление и строение Восточно-Европейской платформы

Тезисы

1. Впервые на основе метода функций приемника построены глубинные скоростные модели литосферы Хоперского блока и Лосевской шовной зоны Воронежского кристаллического массива протократона Сарматия.
 2. Кора определена четырехслойной структурой с наличием волновода в нижней части разреза.
 3. Впервые для Хоперского блока Сарматии выявлено наличие и определены характеристики зоны пониженных скоростей в верхней мантии на глубинах 110-150 км, маркирующей средне литосферную неоднородность (mid-lithospheric discontinuity, MLD).
 4. Выявлено сложное, возможно градиентное, строение коро-мантийного перехода.
- В центре ВЕП образуется коллизонная зона, частично перекрытая осадками, границы которой, при этом, хорошо прослеживаются по авлакогенам
 - Мегаблоки различаются по возрасту, имеют различный генезис и тектоническую структуру.

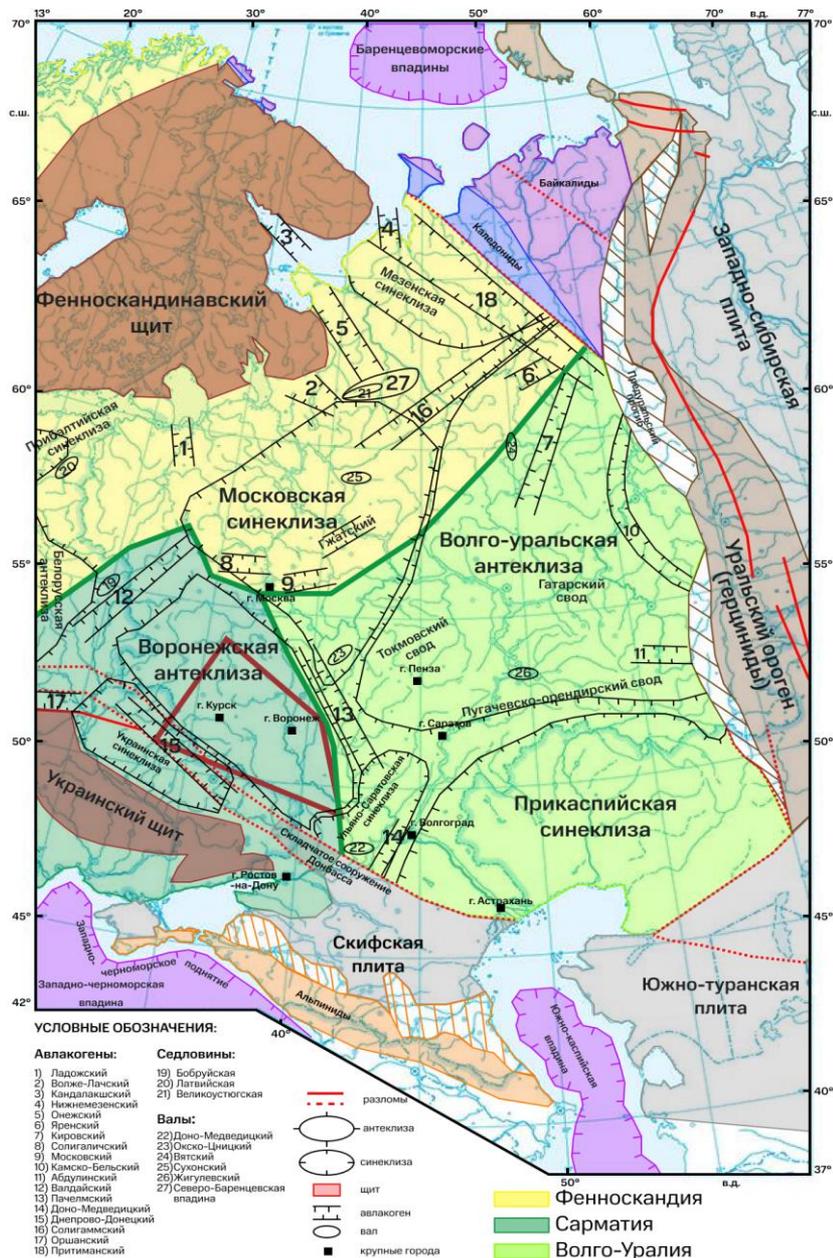
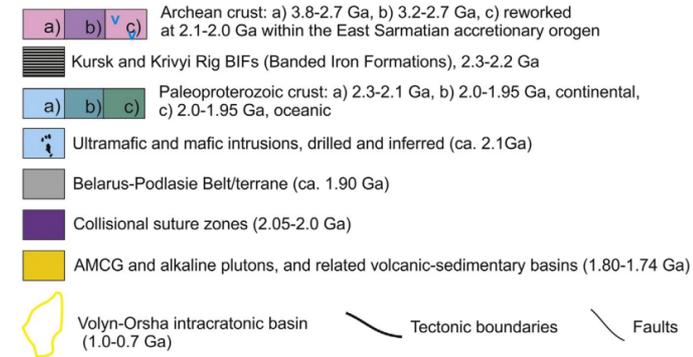
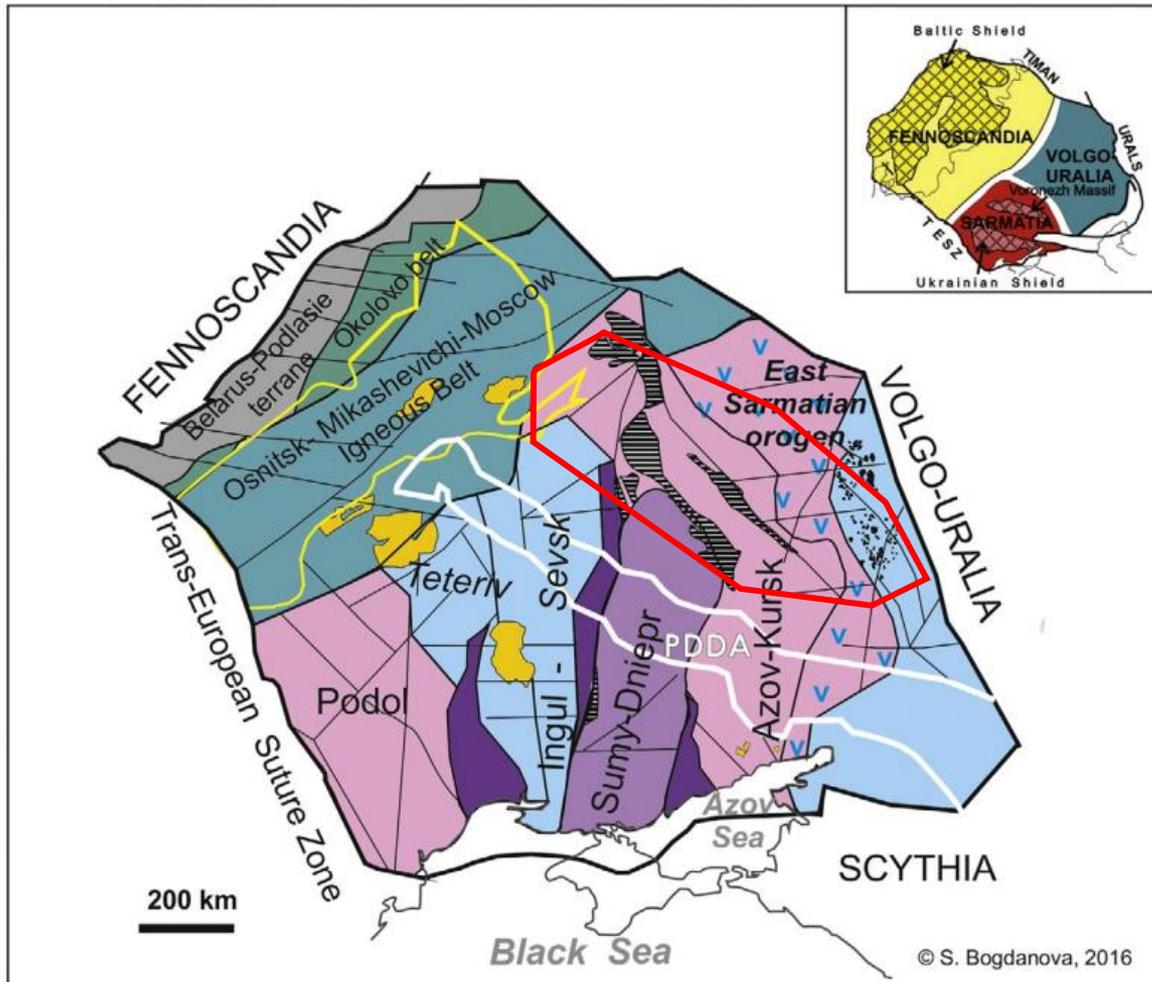


Рисунок - Обрамление и строение ВЕП (зеленым цветом показаны границы разделения по [Bogdanova et al., 2016])

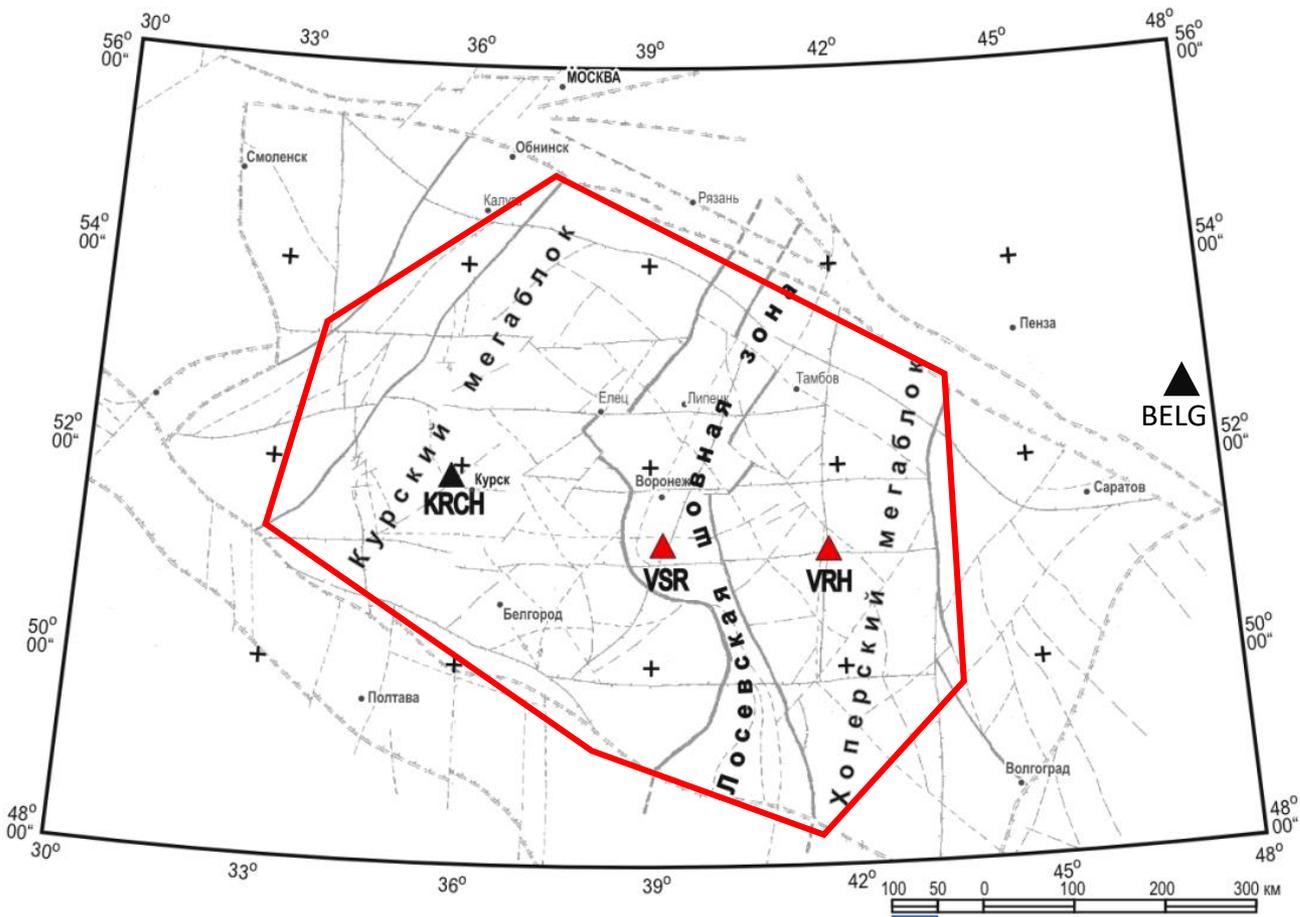
Тектоническое строение протократона Сарматия



- Мегаблок Сарматия можно разделить на несколько архейских провинций по нескольким признакам: по возрасту, по тектонической структуре, по генезису
- В девонское время, в результате рифтинга и формирования авлакогенов, Сарматия была разделена на две части
- В юго-западной части находится Украинский щит, а в северо-восточной – Воронежский кристаллический массив (ВКМ)
- **Расхождение**

Рисунок - Тектоническое строение протократона Сарматия по [Bogdanova et al., 2016, 2019]). Красным полигоном показаны границы Воронежского Кристаллического Массива (ВКМ)

Воронежский кристаллический массив



Воронежский кристаллический массив (ВКМ) в докембрии разделяют на три главных тектонических элемента – мегаблоки КМА и Хоперский, разделенные Лосевской шовной зоной (рисунок), представляющей собой активную континентальную окраину, надвинутую на аккреционный комплекс Воронцовского прогиба. [член корр. РАН Чернышов и др., 2012]

Отличительные черты:

Курский мегаблок (КМА):

- гранито-гнейсовые блоки архейской консолидации, с явно выраженными компонентами поднятий и сдвигов

Хоперский мегаблок:

- сложен в большей степени породами Воронцовской серии, осложненными магматогенными образованиями

Лосевская шовная зона:

- надвиговая структура;
- осложнена интрузиями;
- высокая степень метаморфизма.

Рисунок - Тектоническая схема эрозионного среза докембрия ВКМ [Лосицкий, Молотков, 1999]. Выделены основные тектонические элементы. Треугольниками показаны широкополосные сейсмические станции на территории ВКМ (полигон).

Красным цветом подсвечены станции, данные которых анализируются в представленной работе

Используемое оборудование



Б)



В)



Рисунок – А) Место установки сейсмической станции **KRCH**; Б) Регистратор RefTek 130; В) Сейсмическая станция с датчиком Guralp 3T.

На территории ВКМ, начиная с октября 2017 года открыты и действуют две широкополосные сейсмические станции Единой геофизической службы РАН (ФИЦ ЕГС РАН) – “Сторожевое” (VSR) и “Новохоперск” (VRH). В 2023 году, ИДГ, совместно с ИФЗ РАН, открыта станция “Курчатов” (KRCH)

VSR, VRH укомплектованы:

- широкополосными сейсмическими датчиками СМЗ-ОС с частотным диапазоном 0.02 – 50 Гц;
- регистраторами Ugra.

KRCH укомплектована (показаны на рисунке справа):

- сейсмическим датчиком Guralp 3T с частотным диапазоном 0.008 – 50 Гц;
- регистратором RefTek 130.

[Башилов и др., 2016]

Рядом с районом проведения исследований расположена опорная станция **BELG** «Белогорное» 52.4 с.ш. 47.6 в.д.

Метод приемных функций (RF)

Для восстановления скоростного строения литосферы был использован метод функций приемника (RF), основанный на анализе данных обменных волн, сформировавшихся на контрастных сейсмических границах в районах мест установки сейсмических станций.

В процессе применения метода RF использовались:

- телесеismicкие события, магнитуды более 5.5;
- телесеismicкие события, находящиеся на эпицентральных расстояниях 40 – 100 градусов (для PRF); и 65-100 градусов (для SRF);
- записи с отношением сигнал/шум более 3;
- каталог GCMT (для получения параметров анализируемых событий: (времени в очаге, глубины и координат).

Граф обработки:

- Переход в лучевую систему координат;
- Деконволюция на функцию p или s -волны;
- Частотная фильтрация;
- Суммирование.

В результате:

- для станции VSR были отобраны 186 PRF и 91 SRF;
- для станции VRH – 166 PRF и 102 SRF.

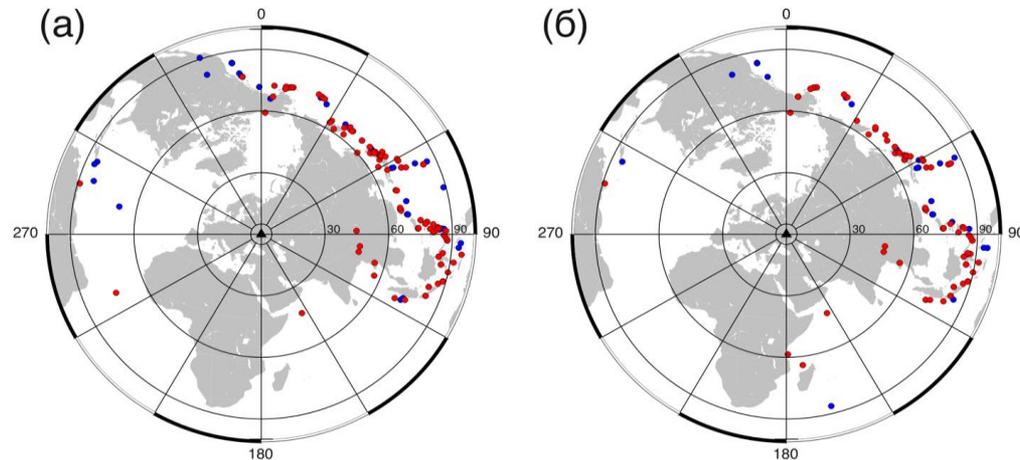


Рисунок - Эпицентры отобранных для анализа событий по данным станции VSR (а) и VRH (б). Красными точками показаны эпицентры событий для PRF, синими – для SRF

Инверсия и решение обратной задачи

Инверсия:

- Для восстановления скоростных разрезов использовалась совместная инверсия PRF и SRF в предположении латеральной однородности и изотропности Земли непосредственно под станцией.
- Модель состояла из тринадцати слоев, свободными параметрами являлись: скорости поперечных волн, отношение скоростей продольной и поперечных волн, а также мощность каждого слоя (V_s , V_p/V_s , h). Для стабилизации инверсии, скорости на глубине 300 км фиксировались на значениях согласно модели IASP91.

Решение обратной задачи:

- Метод Монте-Карло (100000 случайных начальных моделей в заданных пределах) с дальнейшей оптимизацией по алгоритму Левенберга-Марквардта.
- Сравнение с наблюдаемыми SRF&PRF по методу наименьших квадратов и отбор 1% лучших моделей. Медиана – искомое решение.
- Построение модели $V_s=f(h)$, на которой показана плотность вероятностей.

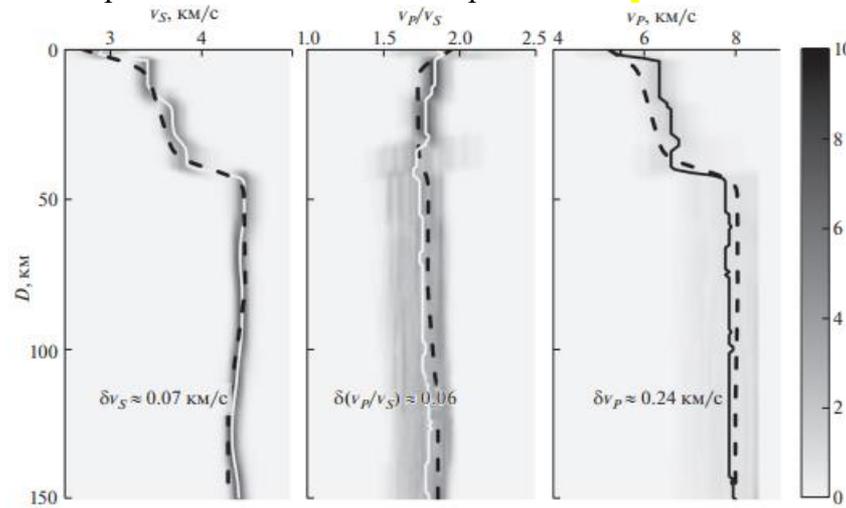
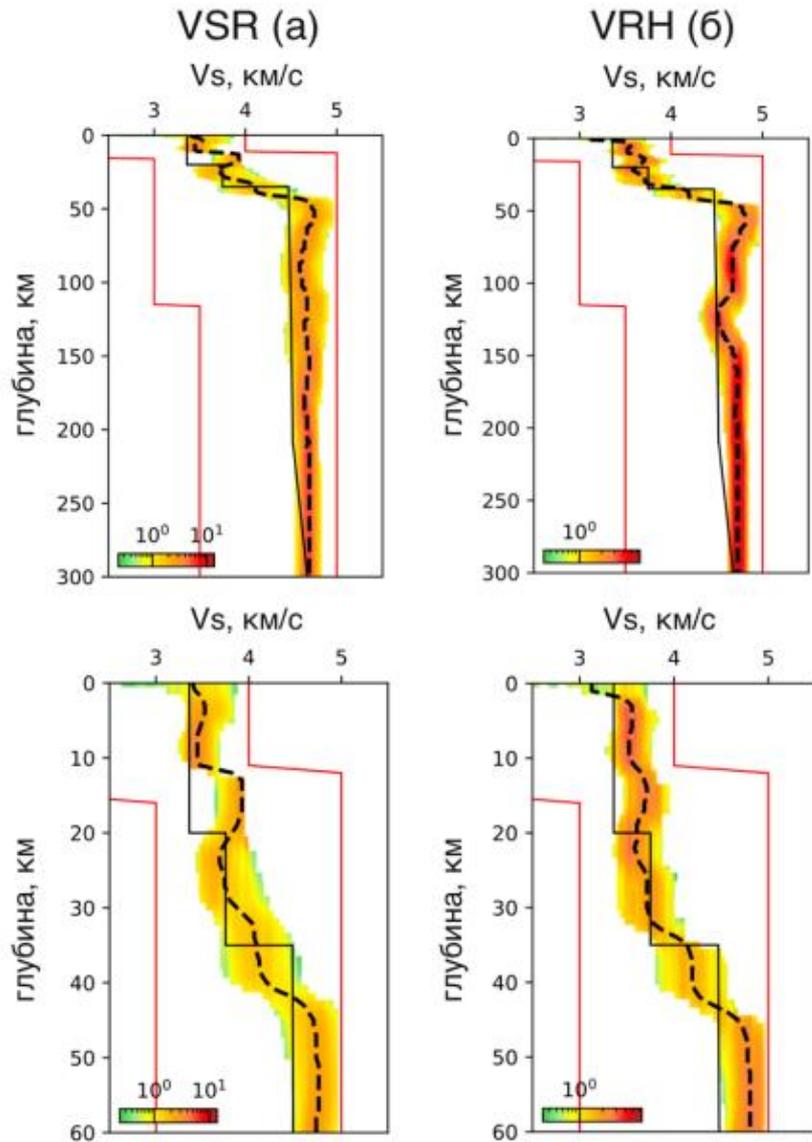


Рисунок - Плотности распределения сейсмических параметров среды в зависимости от глубины. Средние значения распределений изображены сплошной линией. В нижней части панелей приведены среднеквадратичные отклонения. “Истинная” модель изображена пунктиром [Алешин И.М. // Докл. РАН. Науки о Земле, 2021]

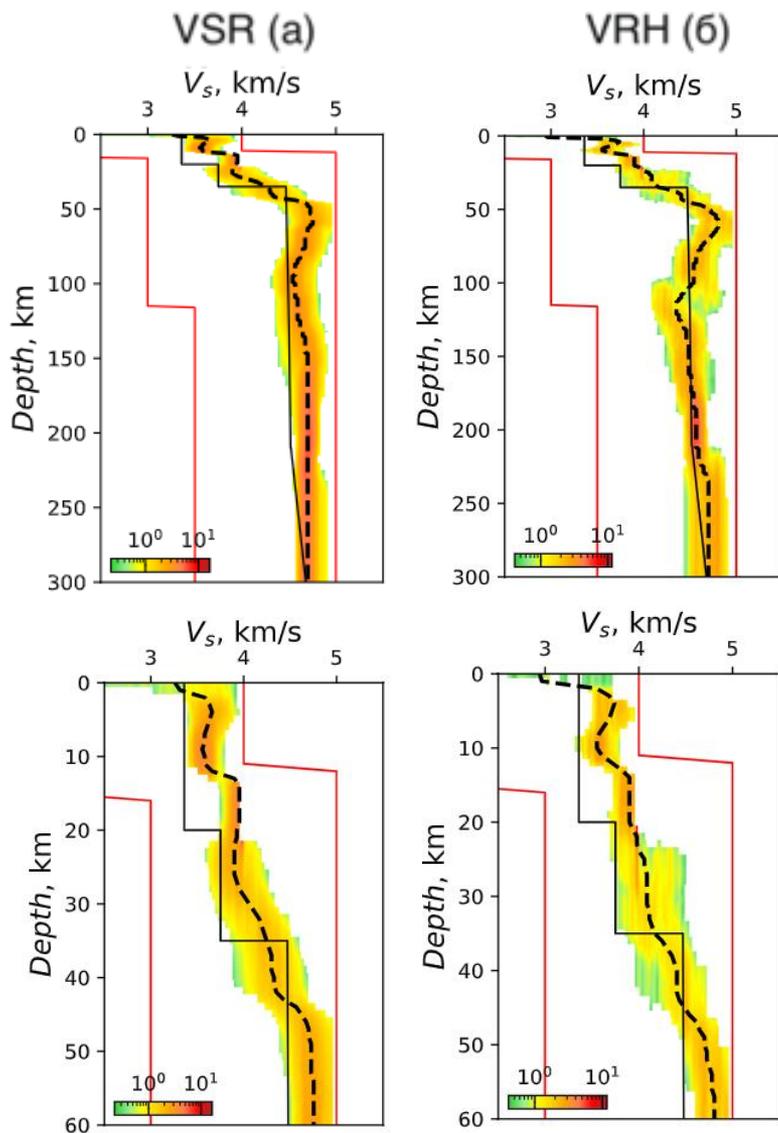
Результаты первых лет



	Характерные элементы	Полученные результаты (VSR)	Полученные результаты (VRH)
Кора	Глубина границы Мохо, км	42	45
	Мощность переходного слоя земная кора – мантия, км	12	11
	Глубина Волновода, км	20-30	20-34
Верхняя мантия	Глубина слоя пониженных поперечных волн, км	-	110-150

Рисунок - Модели распределения скоростей поперечных волн с глубиной для станций VSR и VRH. Верхняя панель рисунка содержит скоростные модели литосферы (до 300км), нижняя – более подробно - земной коры (до 60км). Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют референтную модель IASP91

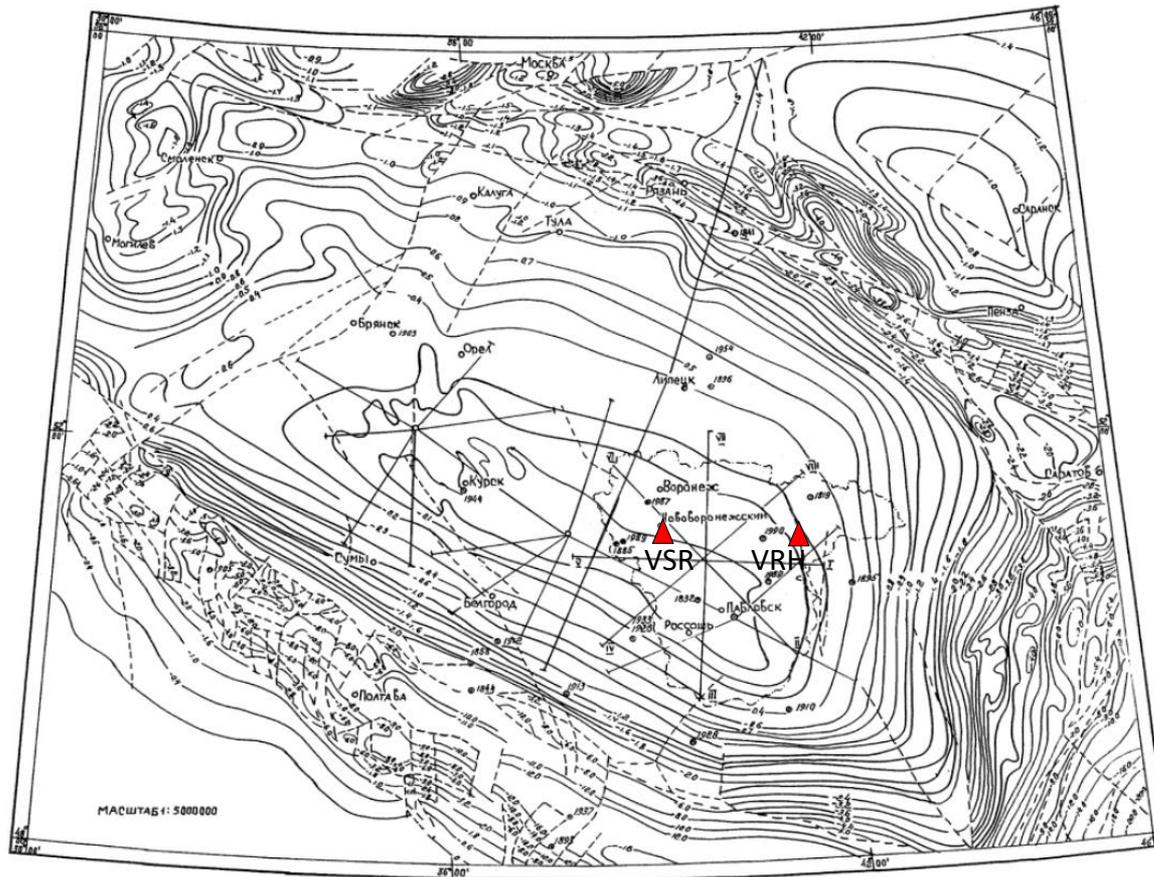
Полученные результаты



	Характерные элементы	Полученные результаты (VSR)	Полученные результаты (VRH)
Кора	Глубина границы Мохо, км	42	45
	Мощность переходного слоя земная кора – мантия, км	12	11
	Глубина Волновода, км	20-26	20-34 (выделяется не устойчиво)
Верхняя мантия	Глубина слоя пониженных поперечных волн, км	-	110-150

Рисунок - Модели распределения скоростей поперечных волн с глубиной для станций VSR и VRH. Верхняя панель рисунка содержит скоростные модели литосферы (до 300км), нижняя – более подробно - земной коры (до 60км). Цветами показаны поля сгущения индивидуальных минимизированных случайных моделей. Пунктирными линиями показаны медианные модели. Красные линии обозначают границы формирования случайных начальных моделей. Черные линии представляют референтную модель IASP91

Подтверждение полученных результатов



- Четырехслойная структура земной коры для исследуемого региона подтверждается проведенными ранее на этой территории исследованиями ГСЗ и МОВЗ.
- В разрезе земной коры на большинстве обработанных профилей также выявляется волновод на глубинах около 20-30 км.
- Четырехслойное деление земной коры находит свое отражение и в геологическом разрезе Хоперского блока.

Рисунок - Обзорная карта со схемой профилей ГСЗ: 1 – изолинии глубин поверхности докембрийского фундамента; 2 – профили ГСЗ, от карьерных взрывов; 3 – профили ГСЗ проекта «Астра»; 4 – эпицентры землетрясений. [член корр. РАН Чернышов и др., 2012]

Подтверждение полученных результатов. Сводная таблица

	Глубина границы Мохо, км	Мощность переходного слоя земная кора – мантия, км	Глубина переходного слоя, км	Глубина волновода, км
Полученные результаты (VSR)	42	-	39-46	20-30
Полученные результаты (VRH)	45	-	42-48	20-34
Профиль Купянск-Липецк (1968г)	39-43	-	-	-
Промышленные взрывы (1972-91г)	41-45	8-11	-	-
Проект «Астра» (1991г)	42-48	9-12	две границы перехода (44 и 48 км)	20-30
Минц (профиль 1-ЕВ)	43	10	-	-

Mid-Lithosphere Discontinuity (MLD)

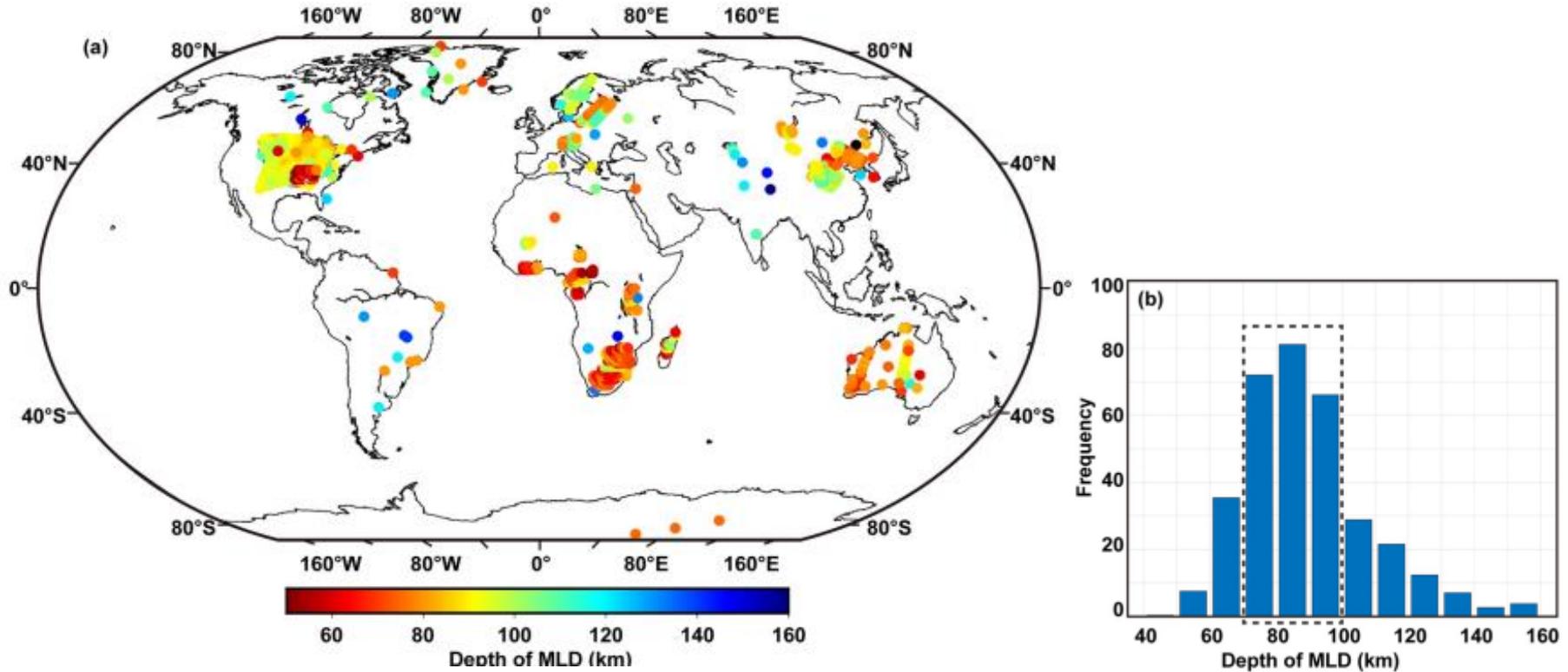


Рисунок - Геофизический мониторинг MLD
[Hui-Ying Fu et al, 2022]

	Характерные элементы	Полученные результаты (VSR)	Полученные результаты (VRH)
Верхняя мантия	Глубина слоя пониженных поперечных волн, км	-	110-150

*В рамках предыдущих исследований коллизионной зоны центральной части ВЕП MLD на сходных глубинах выявлялся по данным других станций (например, постоянных станций MHV и OBN) [Гоев и др., 2021], можно сделать вывод о его наличии и в литосфере Сарматии.

Природа Mid-Lithosphere Discontinuity (MLD)

В настоящий момент нет единого мнения о природе формирования MLD. Среди высказываемых гипотез можно выделить:

- реологическую – расслоенность из-за температуры, при фазовых переходах (близкой к точке солидуса) [Yamauchi & Takei, 2016];
- химическую - наслоение по химическому/минералогическому составу [Selway et al., 2015], либо в присутствии внешних факторов - базальтовых расплавов [Rader et ., 2015];
- **петрофизическую** – наслоение в анизотропной среде при **частичном подплаве** вещества [Yuan and Romanowicz, 2010; Thybo, 2006];
- **изменение деформационных свойств с глубиной** [Karato et al., 2015]. (физическая дисперсия, связанная с температурной и водозависимой упругостью, **облегчаемой упругим скольжением** между границами зерен)

Все они сходятся в том, что:

1. Это слой пониженных, относительно модели IASP91, скоростей, находящийся в верхней мантии, ниже астеносферы. Он обнаружен практически повсеместно под древними кратонами на глубинах порядка 100-150 км [Thybo and Perchuc, 1997]. Собран в работе [Hui-Ying Fu et al, 2022]
2. Глубины залегания кровли слоя MLD, мощность, а также пластовые сейсмические скорости в нем различаются для различных тектонических структур и, вероятно, зависят от геодинамических и тектонических процессов.[Chen et al., 2018; Rychert and Shearer, 2009]

Отсутствие MLD в модели станции VSR может быть объяснено, например тем, что станция установлена в Лосевской шовной (коллизионной) зоне между блоками КМА и Хоперским и изучаемый слой мог быть разрушен в процессе коллизии. Также возможно, что те или иные особенности волнового поля в районе места установки станции VSR повлияли на обнаружение существующих обменных волн от границ 100 и 150 км.

Выводы

- Впервые методом функций приемника получены скоростные модели Хоперского блока и Лосевской Шовной зоны ВКМ до глубины 300км
- Структура земной коры определена четырьмя слоями, с наличием волновода на глубинах 20-30км для станции VSR и 20-34км по данным станции VRH
- Выявлено сложное, возможно градиентное, строение коро-мантийного перехода на глубинах 42км для VSR, 45км - для VRH
- Впервые для Хоперского блока показано наличие MLD в верхней мантии на глубинах 110-150км

Спасибо за внимание!