

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И МАНТИИ АРКТИКИ ПО СЕЙСМИЧЕСКИМ ДАННЫМ

А.И. Филиппова

aleirk@mail.ru



*Институт теории прогноза землетрясений и
математической геофизики РАН, г. Москва*



*Институт земного магнетизма, ионосферы и
распространения радиоволн
им. Н.В. Пушкова, г. Москва, г. Троицк*

II всероссийская школа молодых учёных
Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике

Содержание

I. Введение

- Область исследования
- Сейсмичность и сеть сейсмических станций в Арктике
- Гренландия: пример детально изученного региона

II. Строение земной коры

- Глобальная модель CRUST 1.0
- Региональные модели (EUNaseis, SibCrust и др.)
- Различия моделей: пример Баренцева моря

III. Строение мантии

- Основные особенности строения мантии: глобальные ПВТ модели
- Региональные ПВТ модели и региональная томография по объемным волнам

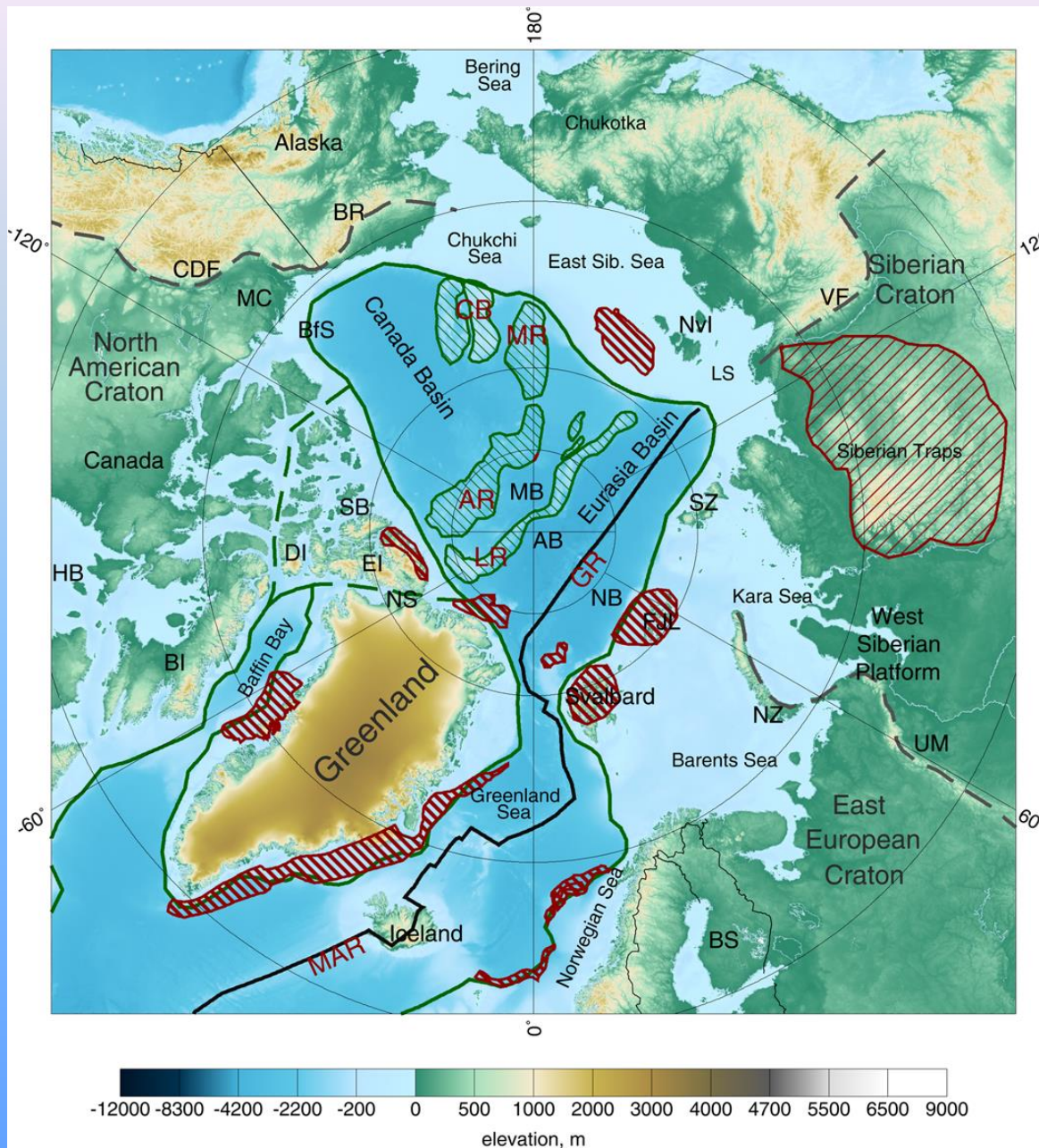
IV. Анализ томографических моделей для решения геодинамических задач на примере моря Лаптевых

- Область исследования
- Возможные причины растяжения литосферы vs результаты томографии

V. Заключение

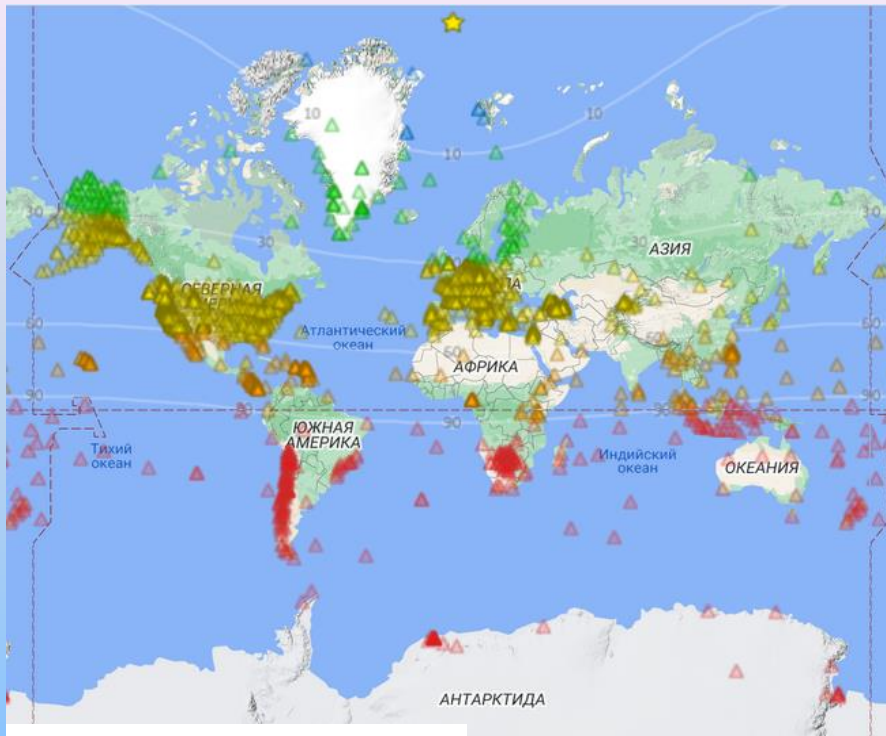
I. Введение

Область исследования



Сейсмичность и сеть сейсмических станций в Арктике

Широкополосные станции
(LN-каналы, 2022 г.)



IRIS <https://ds.iris.edu>

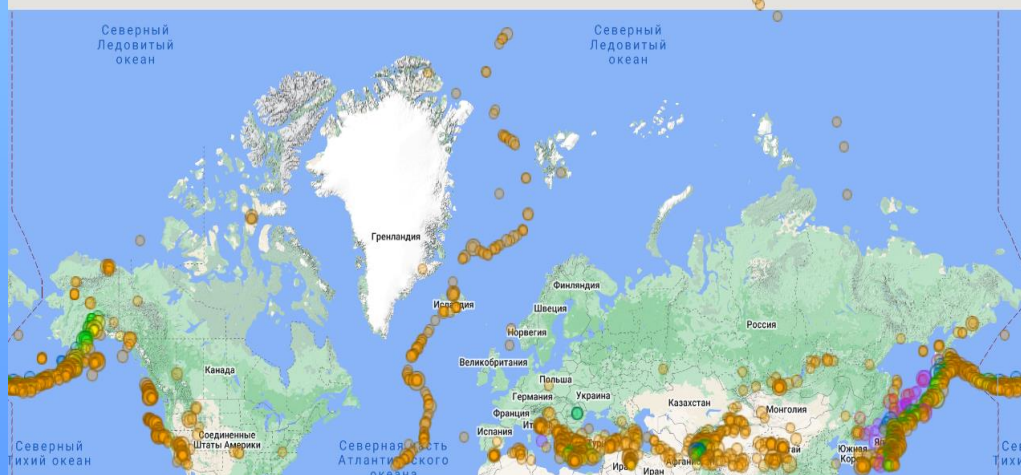
Недостаток сейсмических станций существенен для **всех** методов:

- receiver function
- томография по сейсмическому шуму
- поверхностно-волновая томография
- томография по объемным волнам

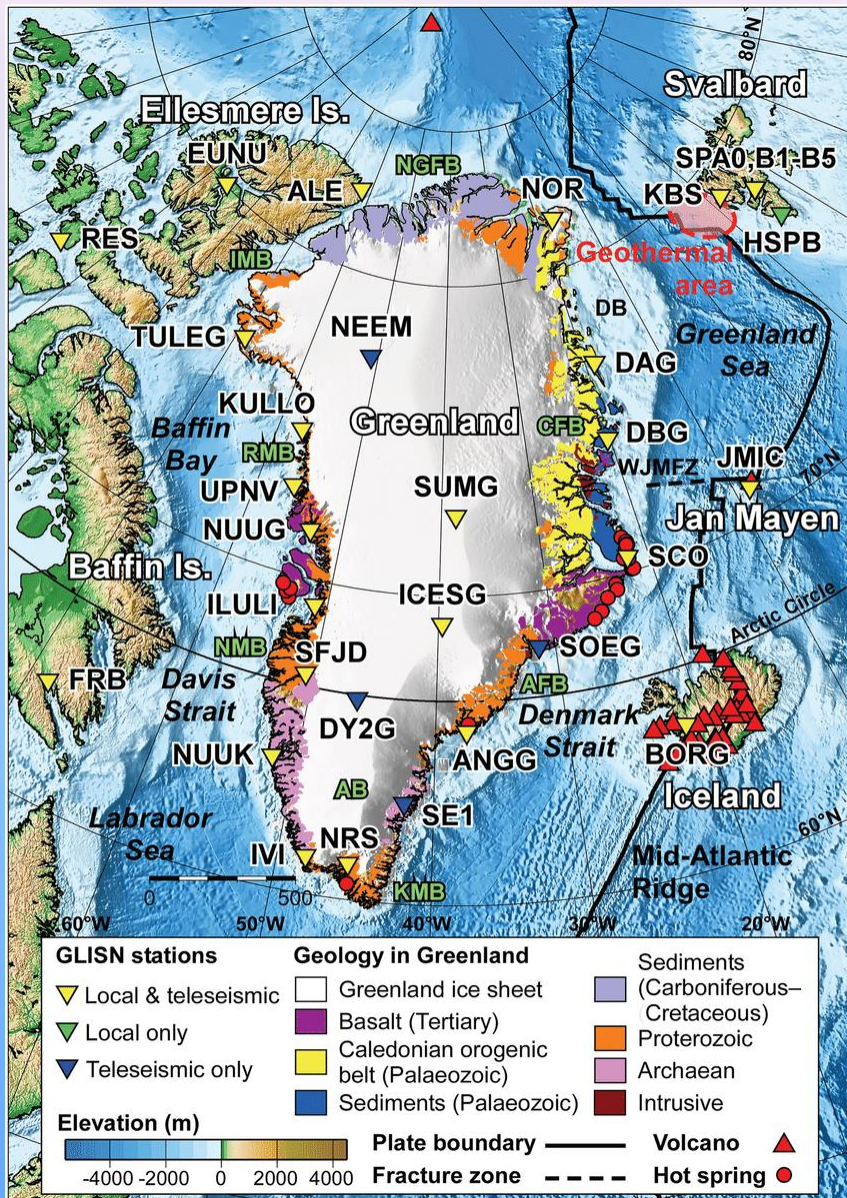
Невысокий уровень сейсмической активности существенен для методов:

- томография по объемным волнам
- поверхностно-волновая томография
- receiver function

Эпицентры землетрясений
($M \geq 5.0$, 2010–2022 г.)



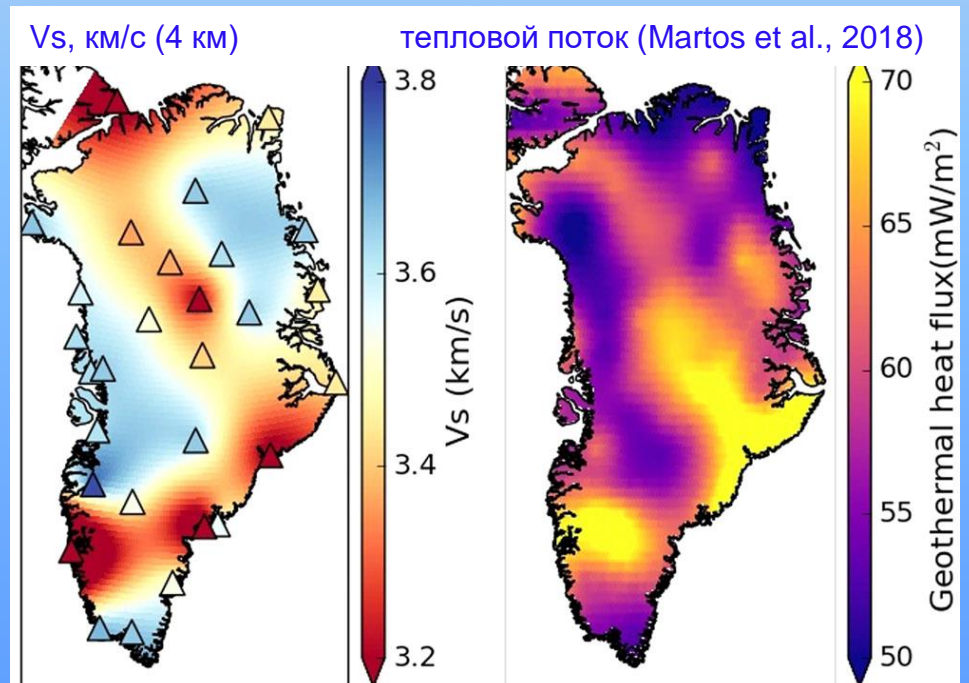
Гренландия: пример детально изученного региона



Сеть GLISN с 2009 г.

Примеры последних работ:

1. Receiver function: [Kraft et al., 2019](#) (PRF, SRF)
2. Томография по сейсмическому шуму: [Levshin et al., 2017](#) (гр. и фаз. скорости волн Рэля, 5-40 с, до 100 км, разрешение ~300-450 км,)
3. ПВТ: [Darbyshire et al., 2018](#) (гр. скорости волн Рэля, 10-80 с, до 100 км, разрешение ~200 км)
4. ПВТ + ambient noise: [Pourpoint et al., 2018](#) (гр. скорости волн Рэля, 25-170 с, шум – 8-65 с, до 200 км, разрешение 200-400 км)
5. Томография по объемным волнам: [Toyokuni et al., 2020 a, b](#) (Р-волны, до 2880 км, разрешение ~200 км)
6. Томография по сейсмическому шуму (Rayleigh wave ellipticity): [Jones et al., 2021](#) (2012-2017 г., 2-10 с, до 5 км)



II. Строение земной коры

Глобальная модель CRUST 1.0 (Laske et al., 2013)

Параметры:

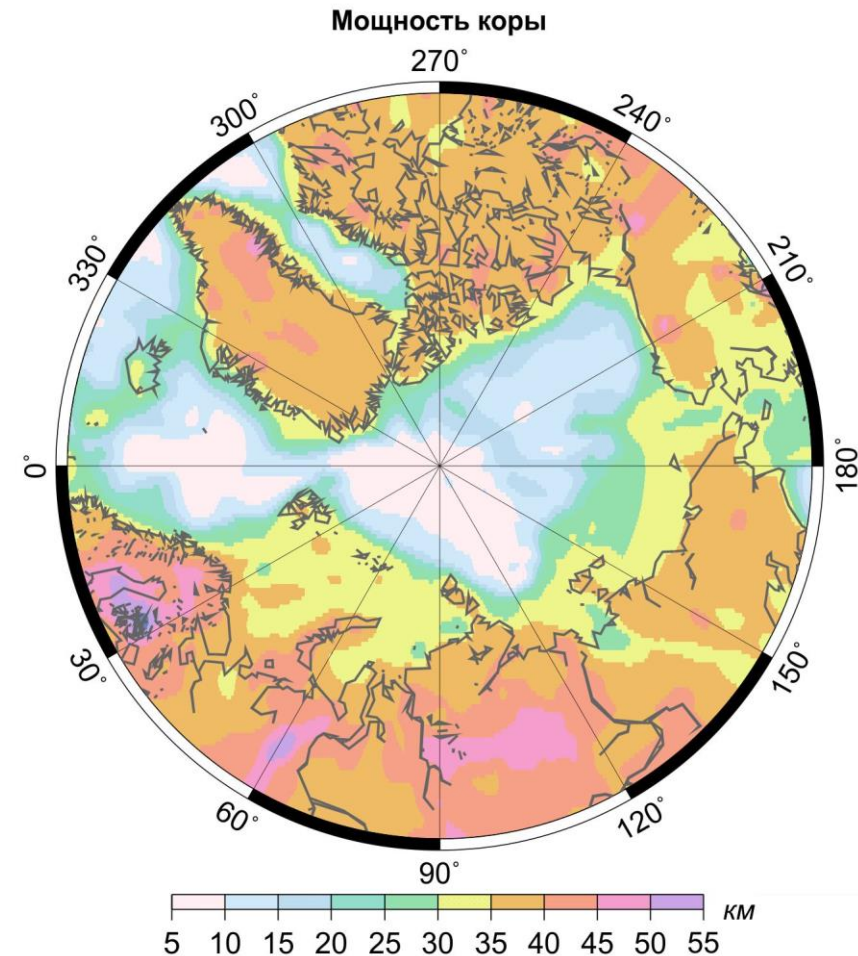
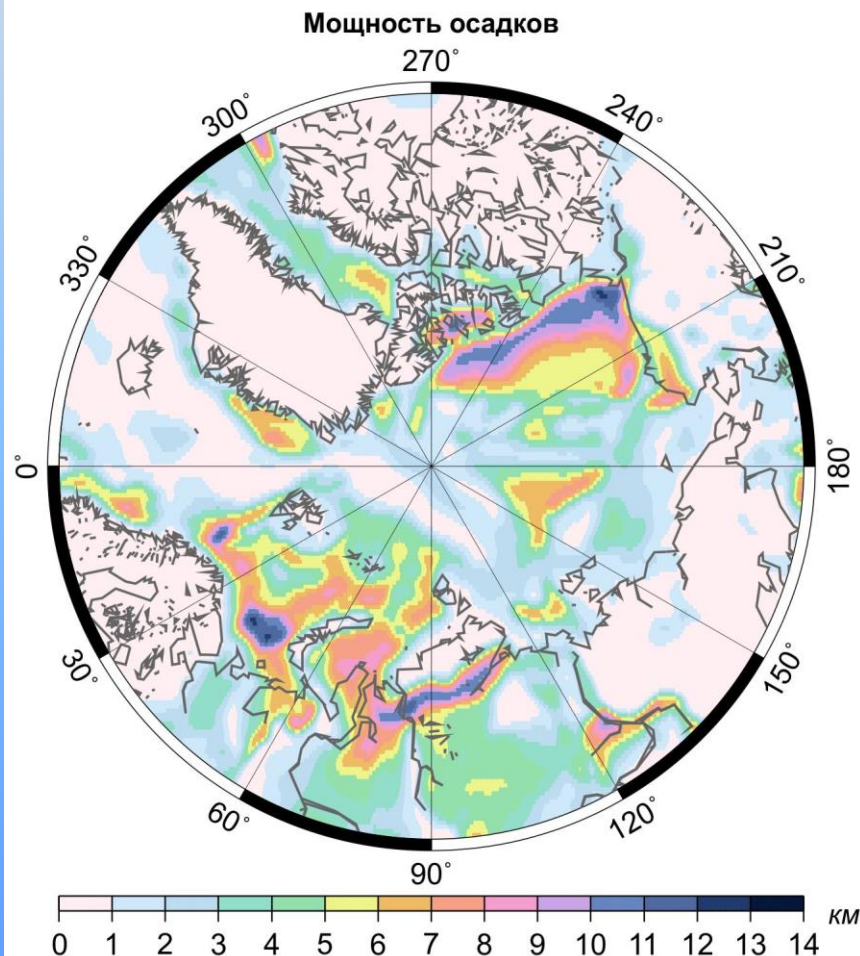
1. Средние скорости V_p и V_s в слоях коры
2. Средняя плотность в слоях коры
3. V_p , V_s , ρ под Мохо

Модель доступна на:

<https://igppweb.ucsd.edu/~gabi/crust1.html>

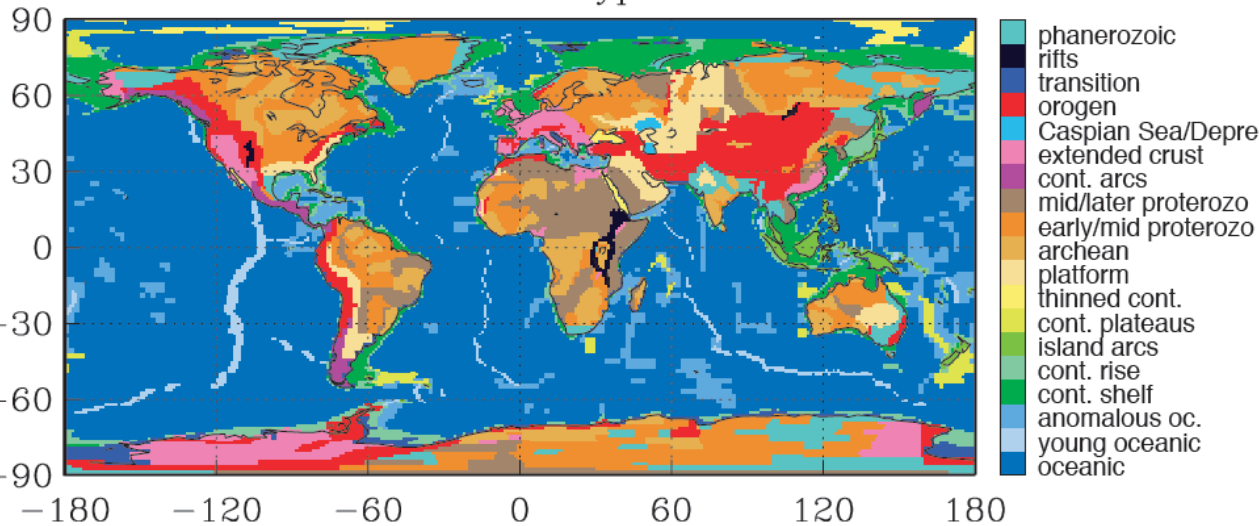
Деление коры на слои (8 слоев):

1. Вода
2. Лед
3. 3 слоя осадков
4. Верхняя кора
5. Средняя кора
6. Нижняя кора



Глобальная модель CRUST 1.0 (Laske et al., 2013)

CRUST 1.0 Types



Предшествующие модели:
CRUST 5.1 (Mooney et al., 1998), CRUST2.0 (Bassin et al., 2000)

Сетка: 1° x 1°

Данные:

1. Топография и батиметрия
- модель ETOPO1 (Amante, Eakins, 2009)

<https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

2. Сейсмические данные (profiles, receiver function)

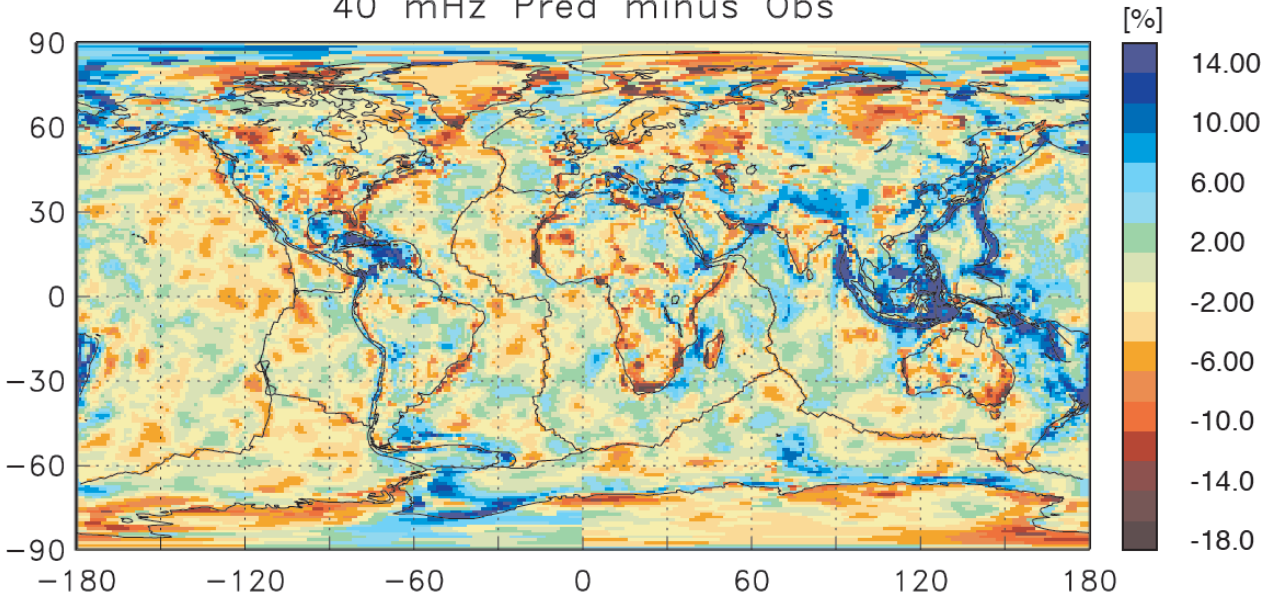
3. Строение верхней мантии – модель LLNL-G3Dv3 (Simmons et al., 2012)

<http://ds.iris.edu/ds/products/emc-llnl-g3dv3/>

4. Гравиметрические данные
5. Возраст (Artemieva and Mooney, 2001)

Верификация: по групповым скоростям волн Рэля (Ma et al., 2014)

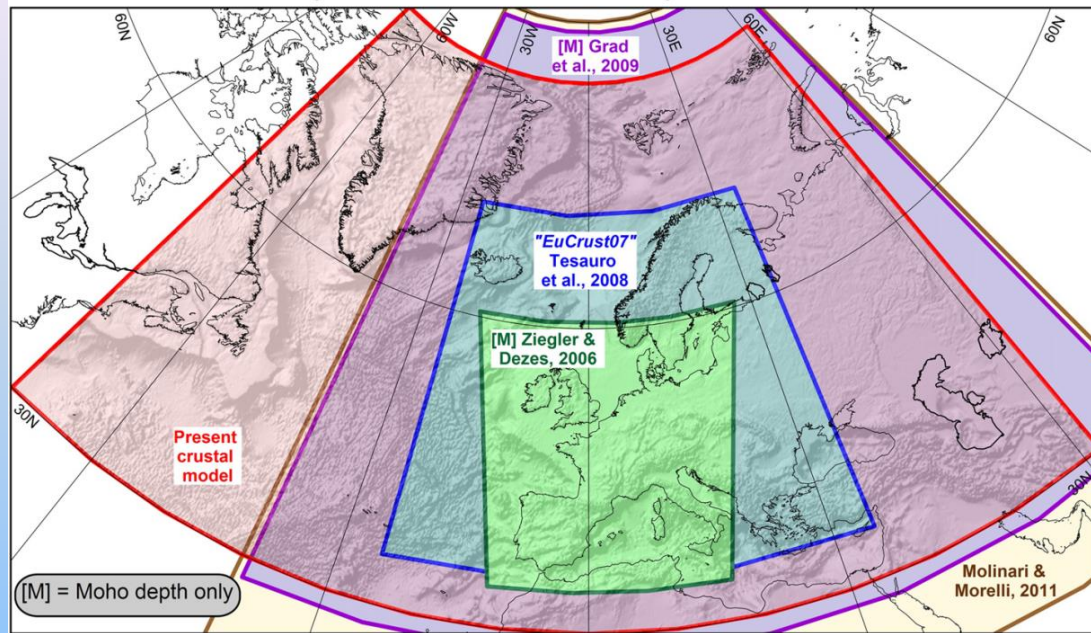
40 mHz Pred minus Obs



...CRUST1.1

Региональные модели: EUNaseis (Artemieva and Thybo, 2013)

European-scale models of the Moho depth and crustal structure

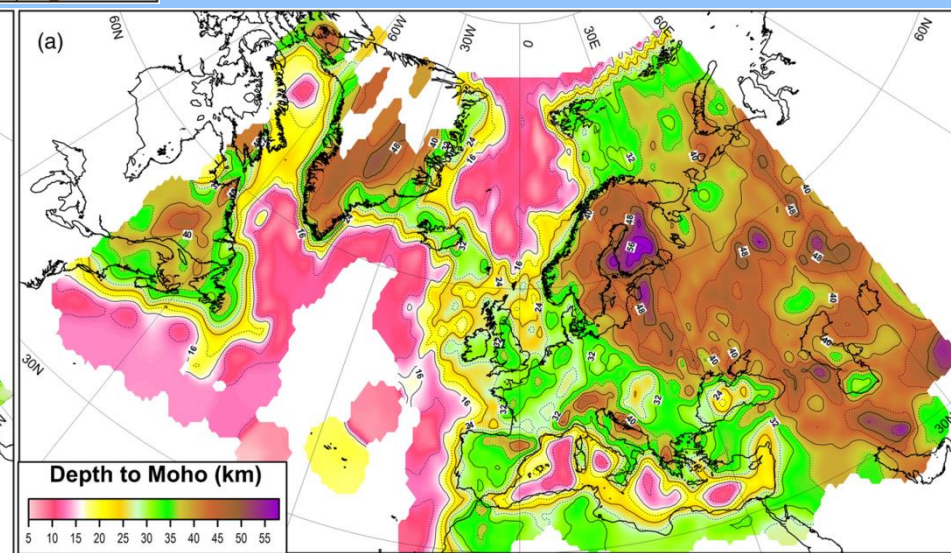
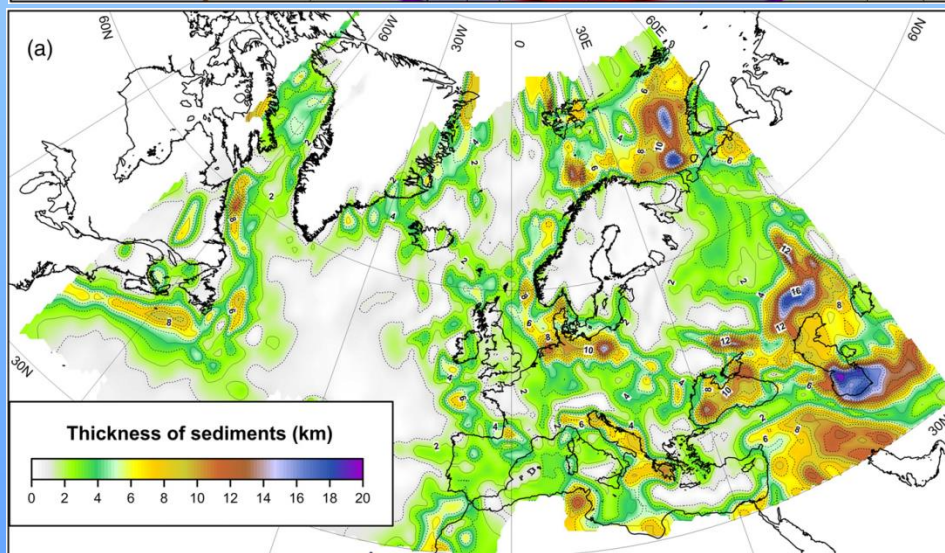


Разбиение на слои по скоростям Р-волн:

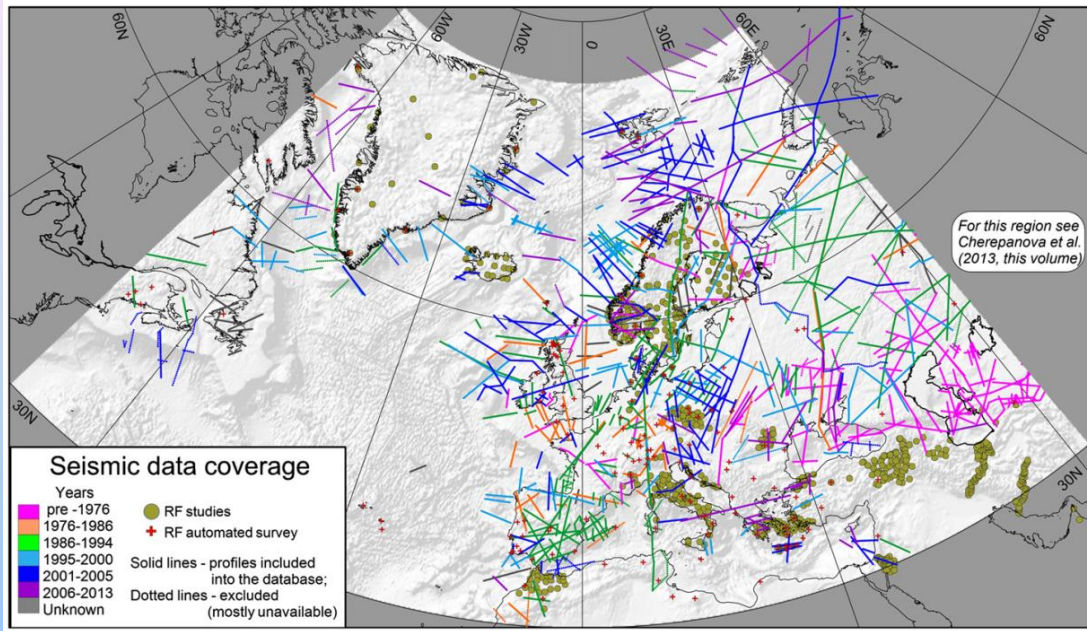
1. Осадки $V_p < 5.8$ км/с
2. Верхняя кора $V_p = 5.8 - 6.4$ км/с
3. Средняя кора $V_p = 6.4 - 6.8$ км/с
4. Нижняя кора $V_p = 6.8 - 7.2$ км/с
5. Lowermost crust $V_p = 7.2 - 7.8$ км/с

11 параметров в каждой точке
(мощности и скорости в слоях коры + V_p под корой)

Сетка: $3^\circ \times 3^\circ$ (без белых пятен)



Региональные модели: EUNaseis (Artemieva and Thybo, 2013)



Данные (с конца 1960-х гг.):

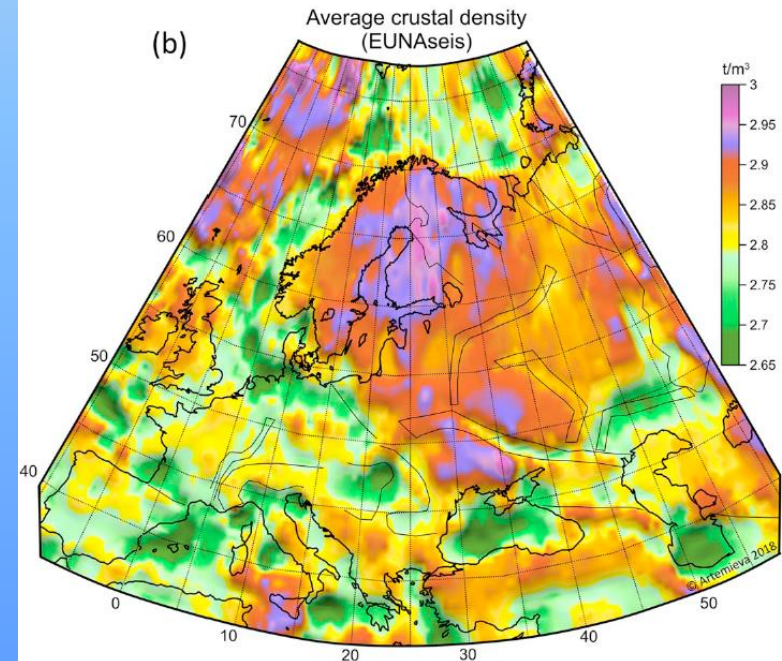
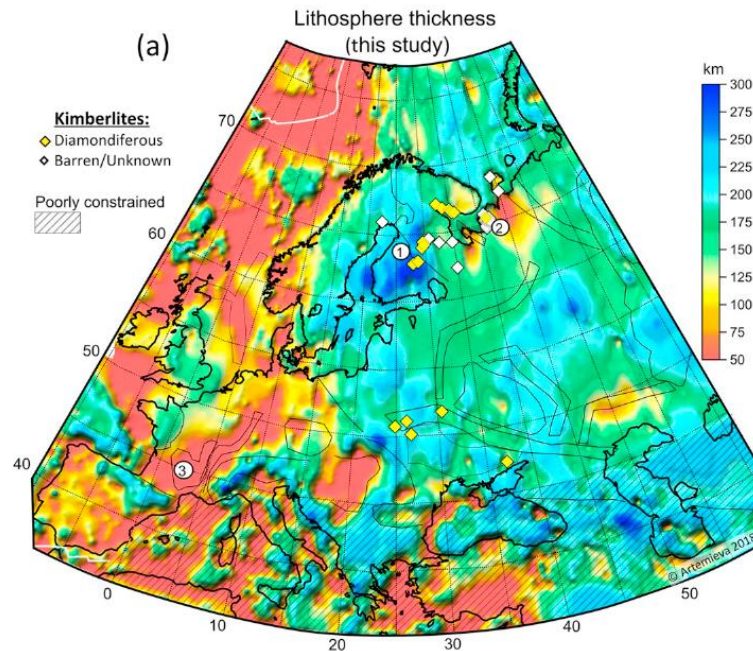
1. ГСЗ, МОВ, МПВ, МОВ-ОГТ и др.
2. Receiver function

Неравномерное покрытие территории данными. Мало данных: Гренландия, Исландия, Северная Атлантика и др.

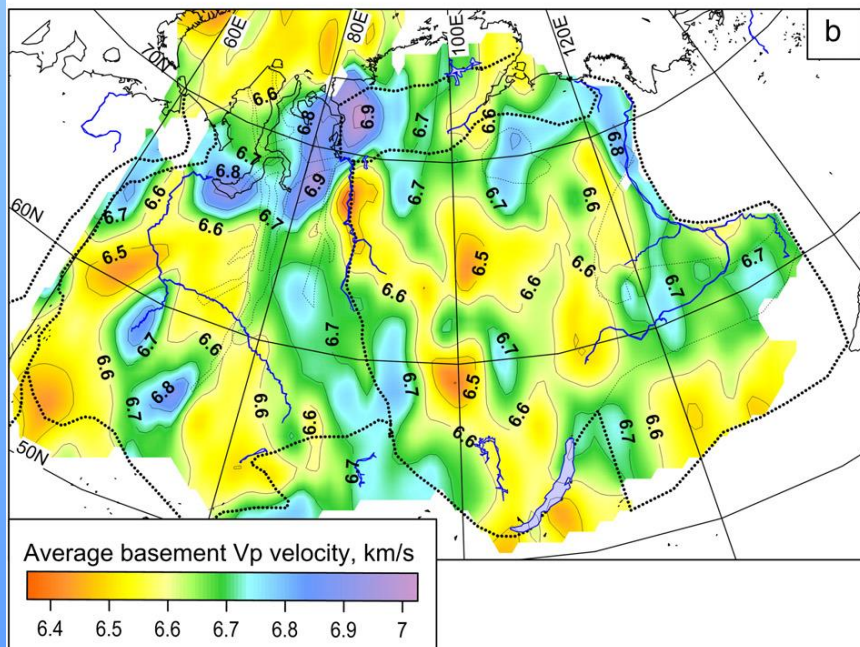
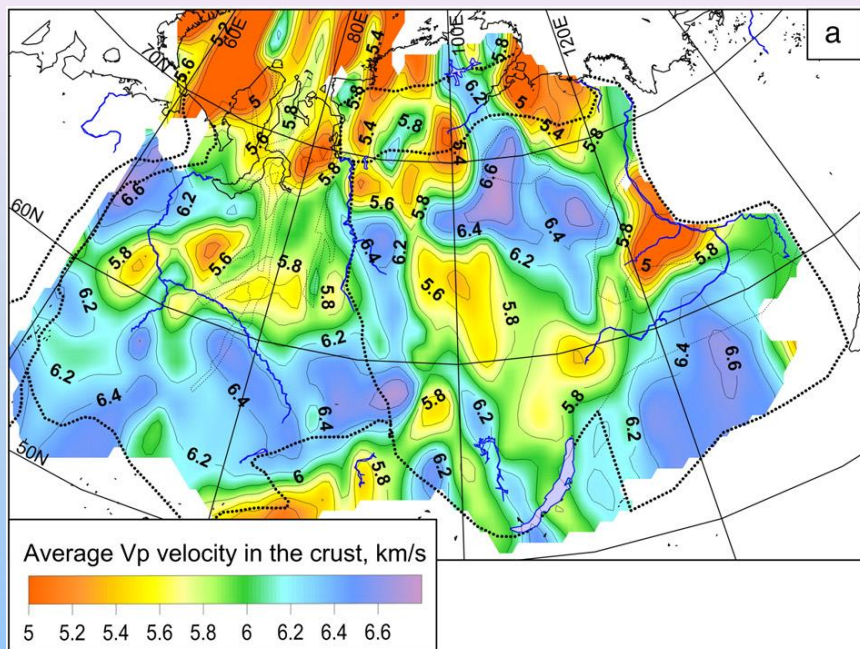
Модель доступна на:

<http://www.lithosphere.info/>

Модель литосферы Европы
(Artemieva, 2019)



Региональные модели: SibCrust (Cherепенova et al., 2013)



Разбиение на слои по скоростям Р-волн:

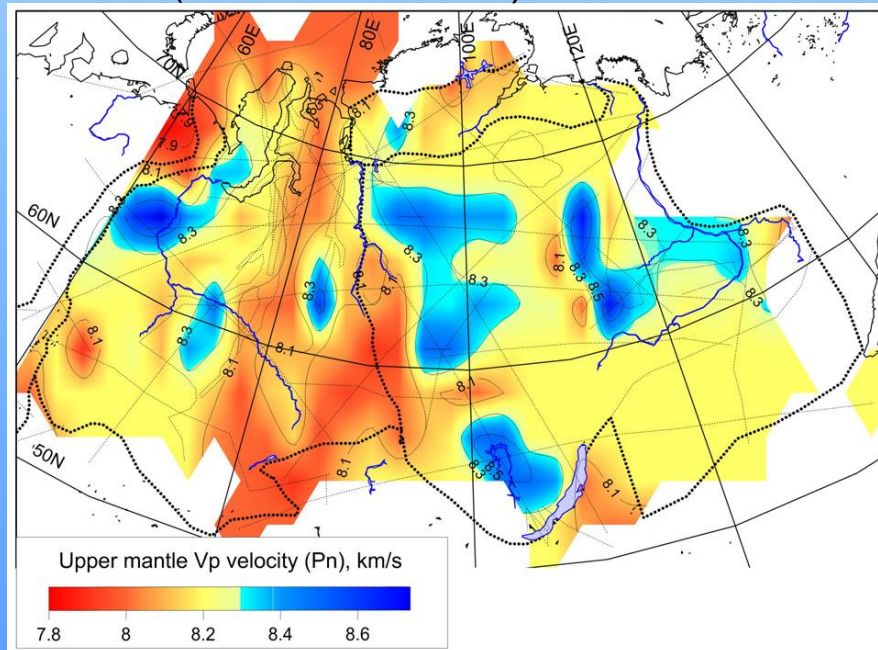
1. Осадки $V_p < 5.8$ км/с
2. Верхняя кора $V_p = 5.8 - 6.4$ км/с
3. Средняя кора $V_p = 6.4 - 6.8$ км/с
4. Нижняя кора $V_p = 6.8 - 7.2$ км/с
5. Lowermost crust $V_p = 7.2 - 7.8$ км/с

11 параметров в каждой точки (мощности и скорости в слоях коры + V_p под корой)

2 сетки:

$0.5^\circ \times 0.5^\circ$

$2^\circ \times 2^\circ$ (без белых пятен)



Региональные модели: SibCrust (Cherempanova et al., 2013)

Данные (с конца 1960-х гг.):

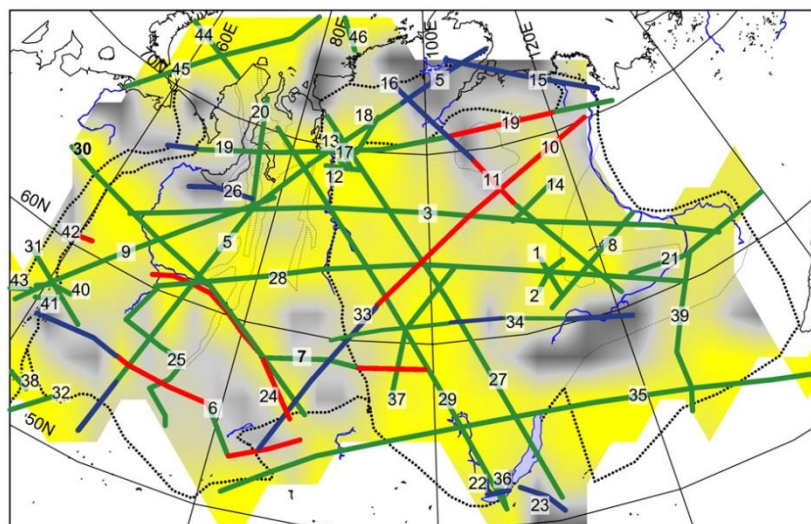
1. ГСЗ, МОВ, МПВ, МОВ-ОГТ и др.
2. Сверхдлинные профили
3. Receiver function

Неравномерное покрытие территории данными

Модель доступна на:

<http://www.lithosphere.info/>

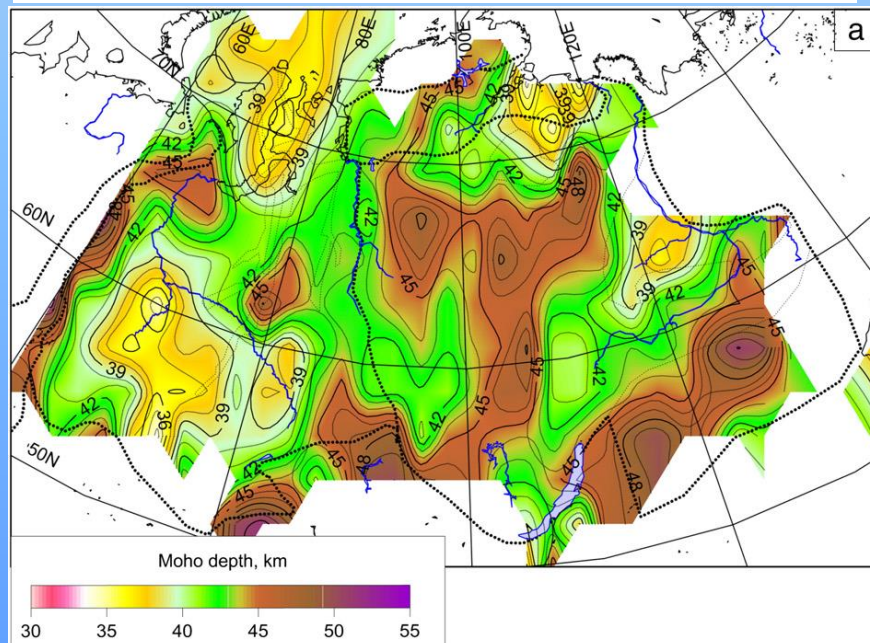
(Will be available for download SHORTLY)



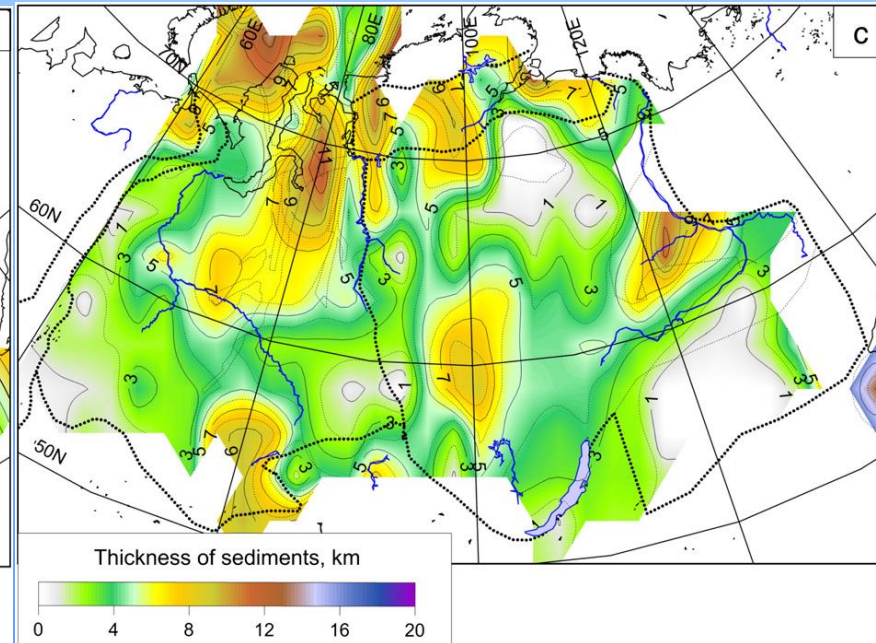
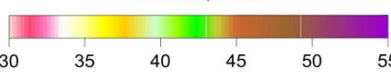
Overall quality of the crustal model



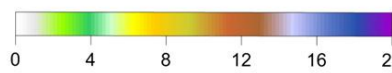
Completeness of information on the internal crustal structure



Moho depth, km

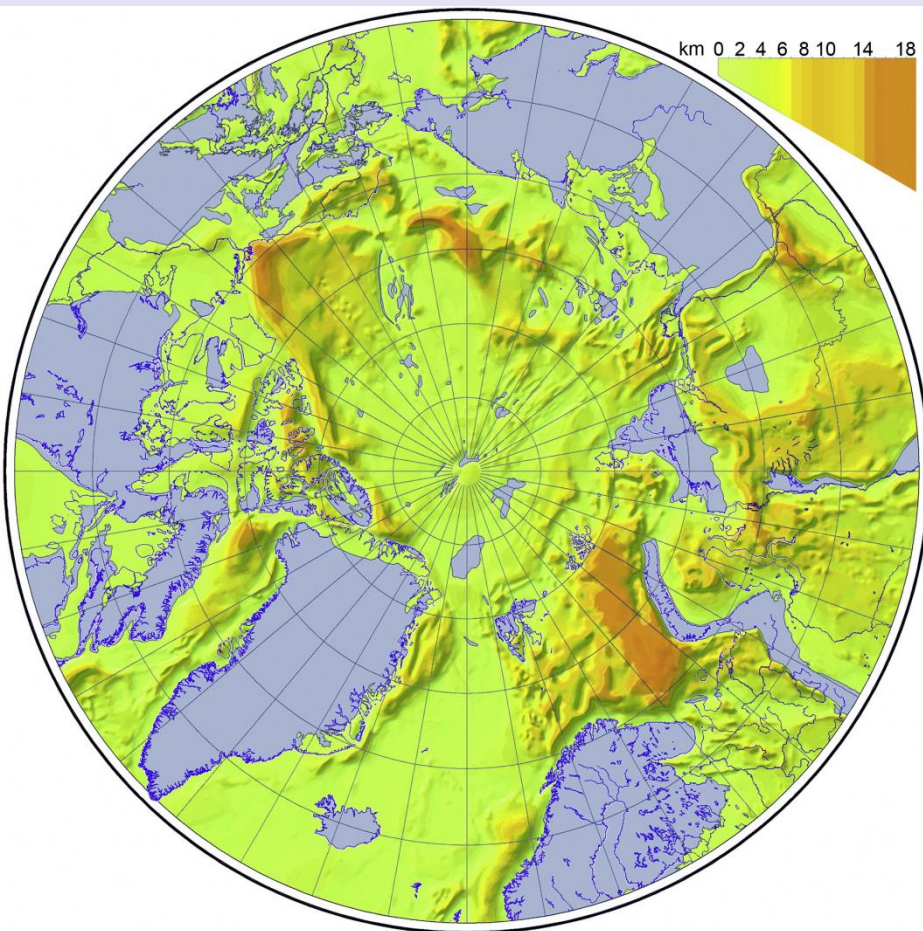


Thickness of sediments, km

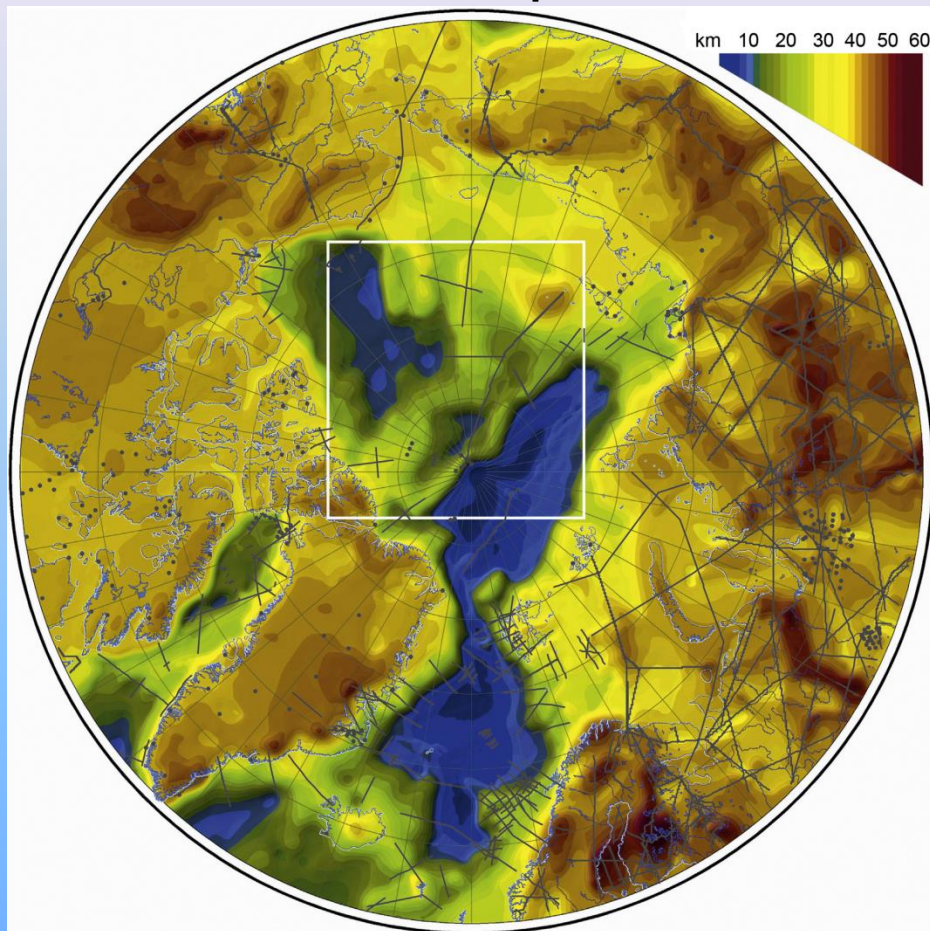


Региональная модель строения коры для всей Арктики (Petrov et al., 2016)

Мощность осадков



Мощность коры



Сетка: 5 x 5 км

Компиляция сейсмических данных (ВСЕГЕИ, ВНИИОкеангеология)

CRUST 1.0

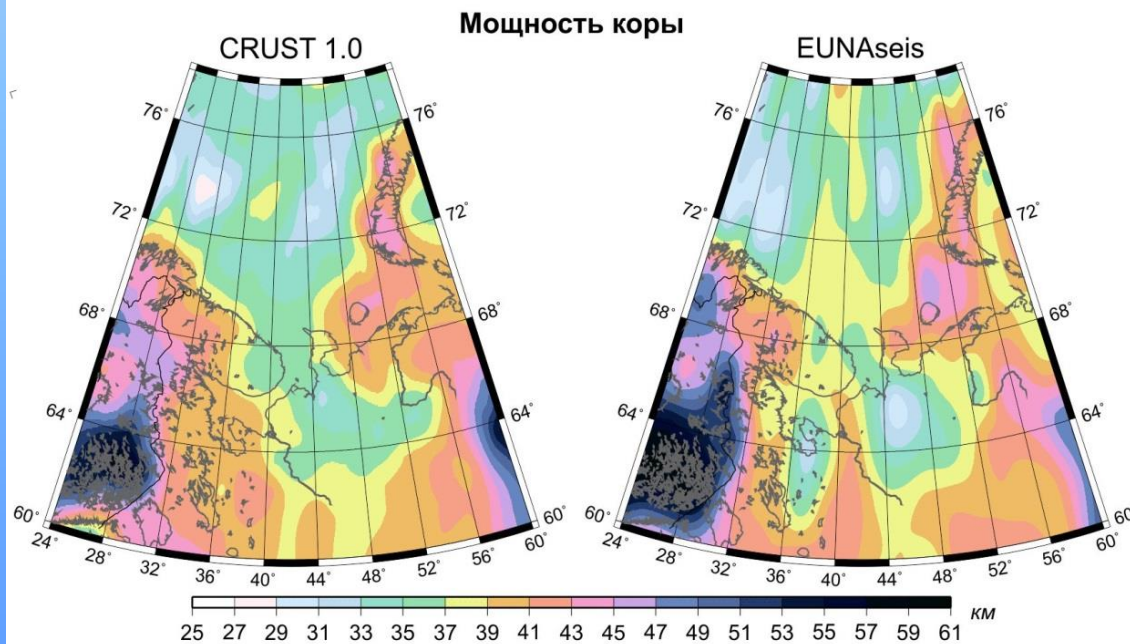
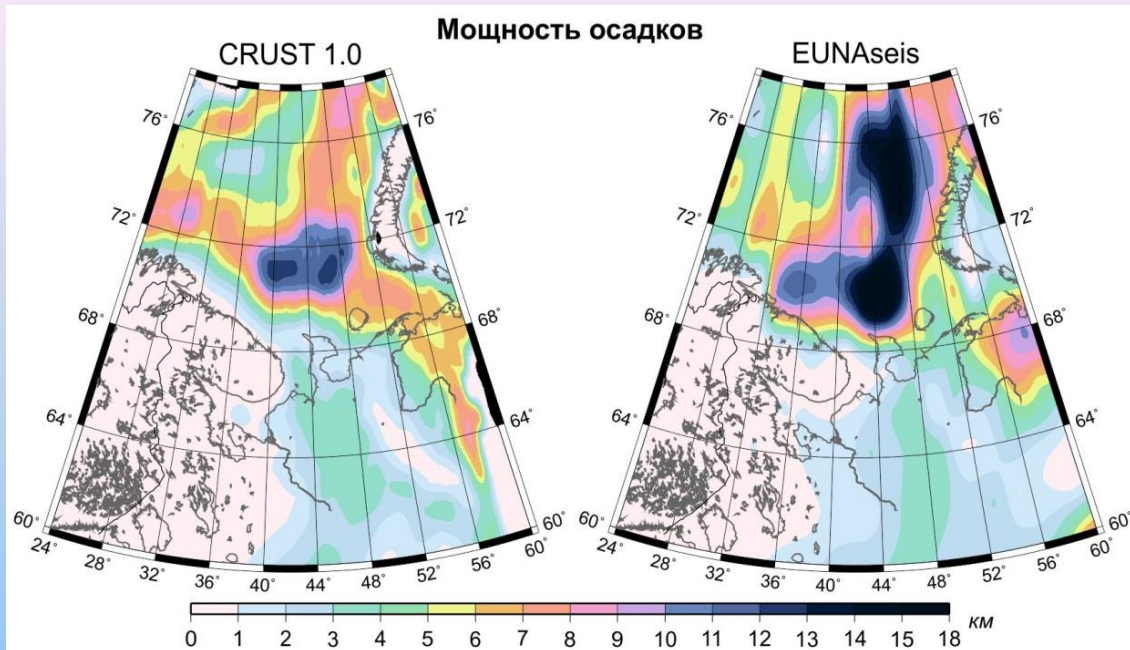
Сетка: 10 x 10 км

(Grad et al., 2009), EUNaseis, SibCrust

Доп. ограничения: по данным гравиметрии

Данные:

Различия моделей: пример Баренцева моря



Расхождения:

Мощность осадков – до 10 км
Мощность коры – до 5 км

Источники ошибок (EUNaseis):

1. Погрешности вычислений исходных данных (1-2 км для «хороших» профилей, 2-4 км – receiver function).
2. Различия в моделях, публикуемых разными авторами.
3. Погрешность интерполяции.

Общая погрешность - ? В регионах с малым количеством данных может составлять 8 км и более.

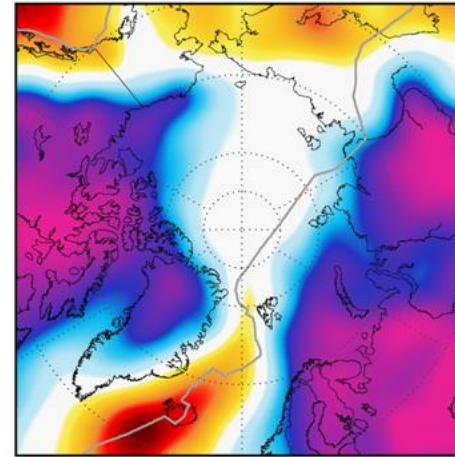
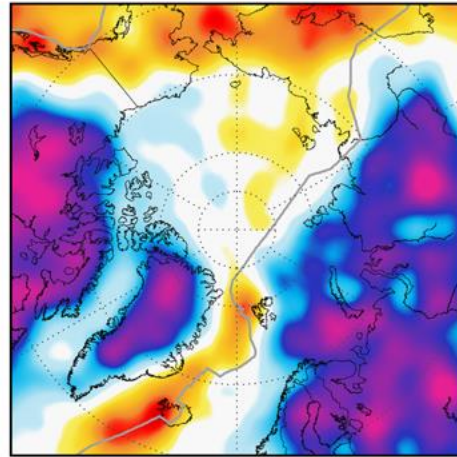
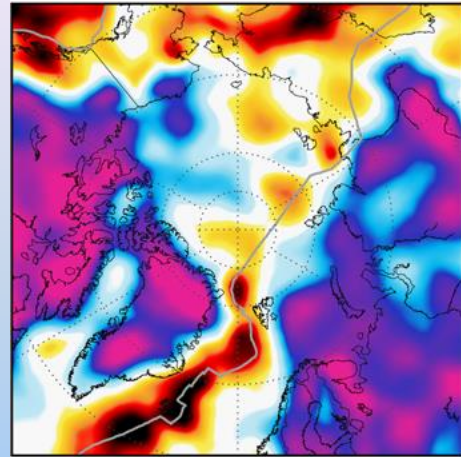
III. Строение мантии

Основные особенности строения мантии: глобальные ПВТ модели

AMISvArc

3D2015_07Sv

Savani



-9.86/9.67

(Lebedev et al., 2017)

SEMum2

100 km

-5.23/9.06

(Debayle et al., 2016)

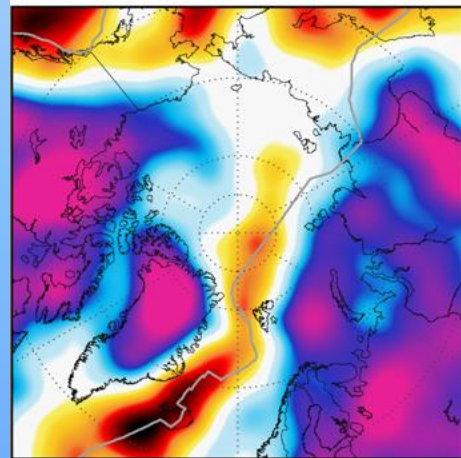
S40RTS

±8%

-6.67/9.33

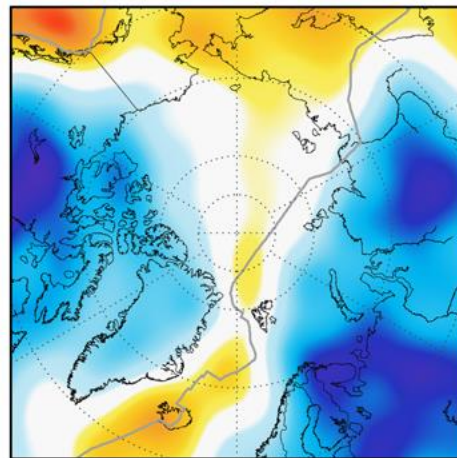
(Auer et al., 2014)

CUB



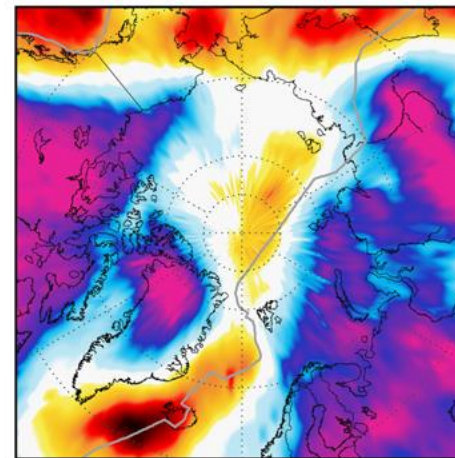
-8.27/10.38

(French et al., 2013)



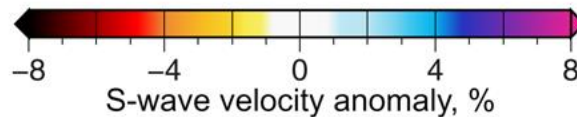
-4.42/5.40

(Ritsema et al., 2011)



-7.75/11.03

(Shapiro & Ritzwoller, 2002)



Общие особенности для всех моделей (крупномасштабные):

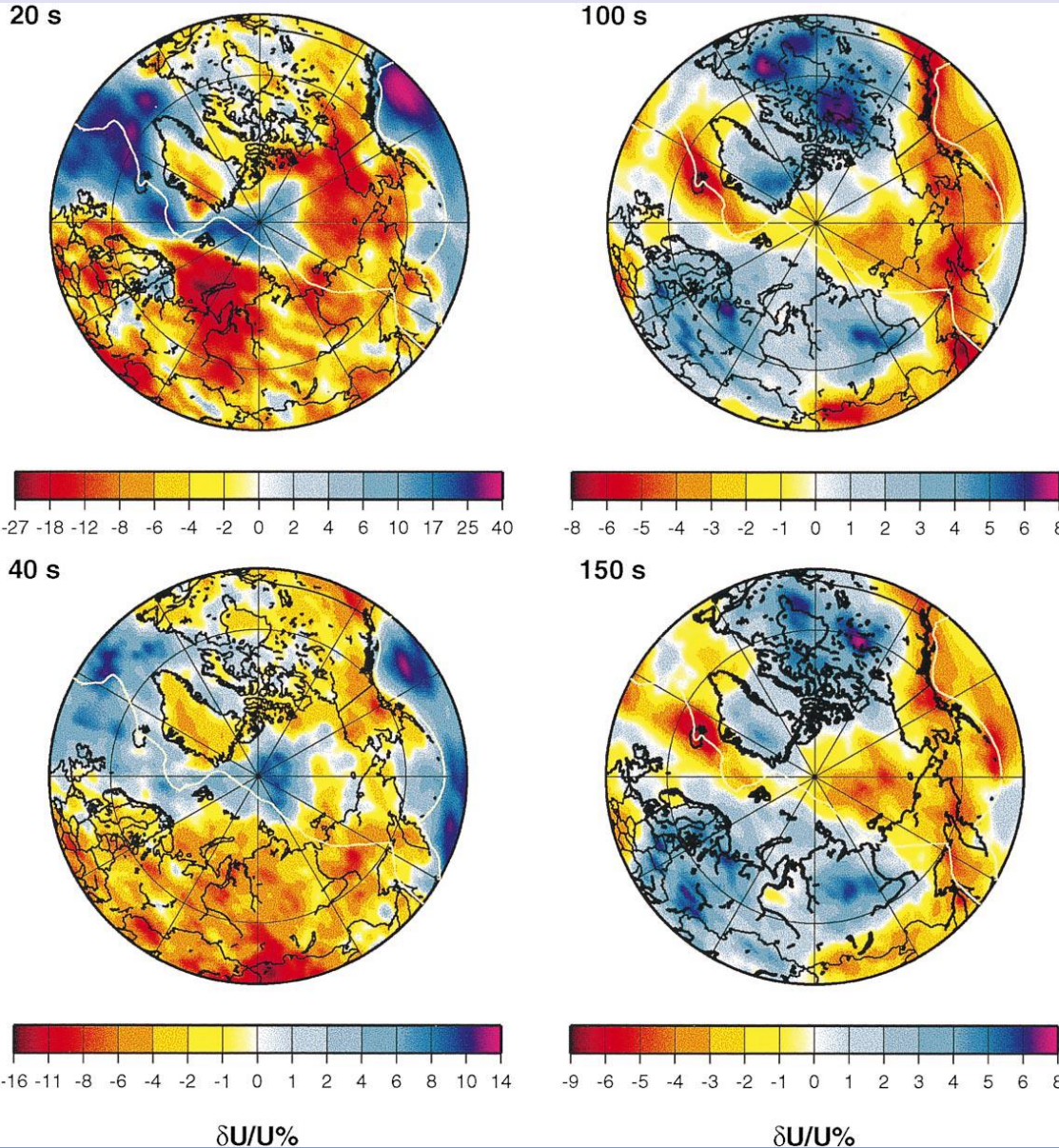
1. Высокие скорости в мантии под стабильными щитами и платформами.
2. Низкие скорости под складчатыми поясами на северо-востоке Евразии и Аляске.

3. Минимум скоростей - вдоль хребта Гаккеля; абсолютный минимум – под Срединно-Атлантическим хребтом в районе Исландии.

Причины различий: разный набор исходных данных, горизонтальное разрешение и др.

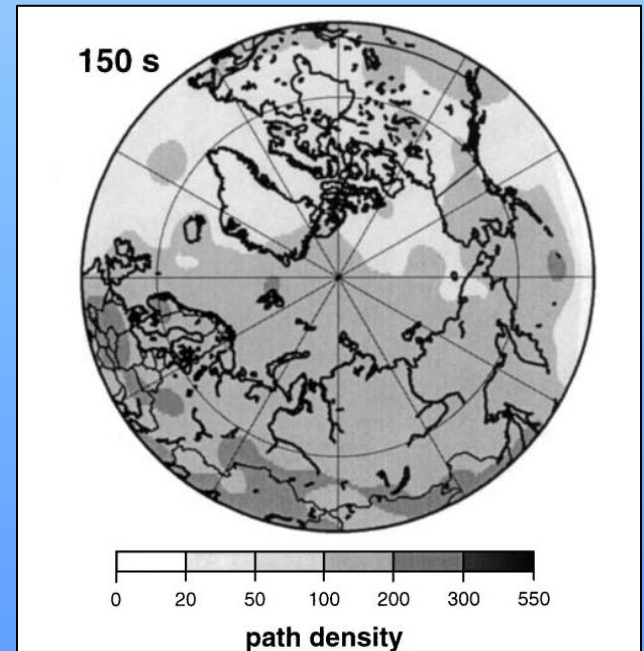
ПВТ: распределения групповых скоростей поверхностных волн (Levshin et al., 2001)

Волны Рэлея



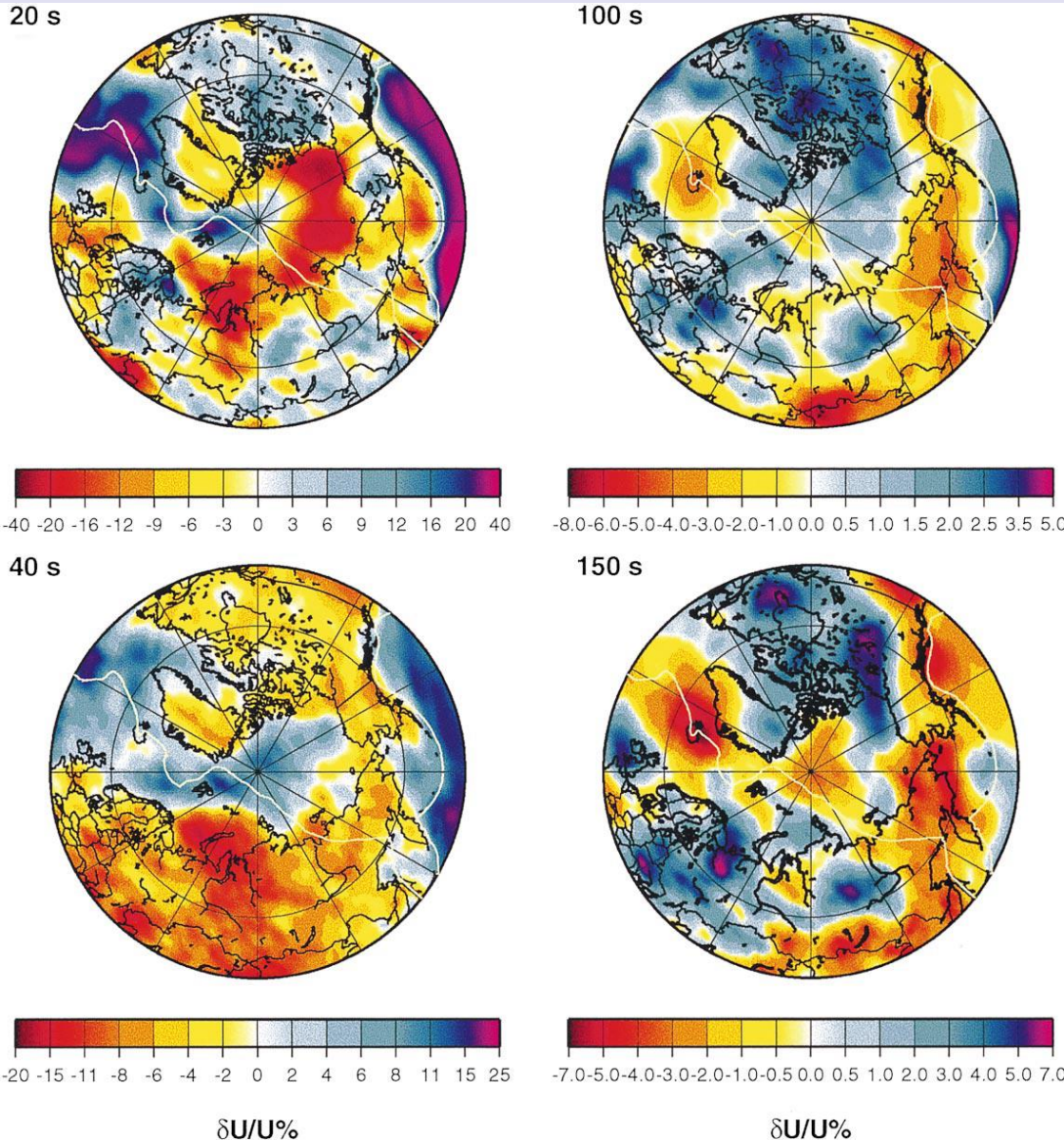
Результаты:

1. Распределения групповых скоростей волн Рэлея и Лява на отдельных периодах из диапазона 15–200 с.
2. Данные об азимутальной анизотропии групповых скоростей поверхностных волн (2 Ψ компонента).
3. Распределения скоростей P_n и S_n .



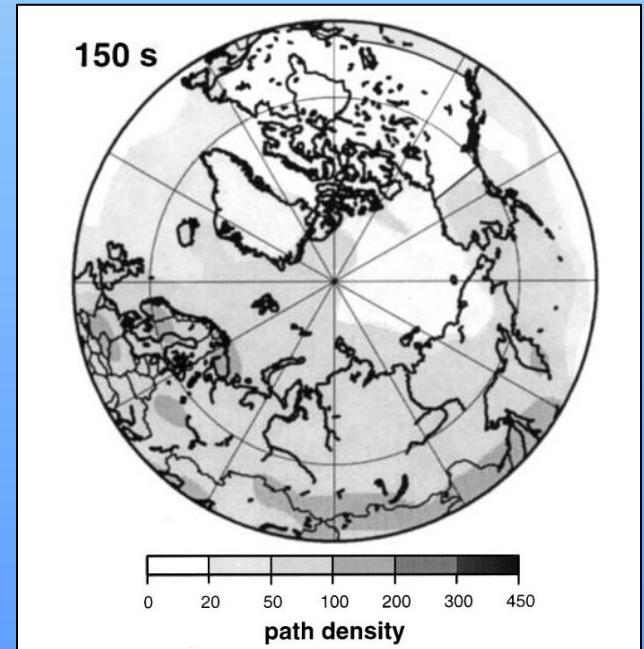
ПВТ: распределения групповых скоростей поверхностных волн (Levshin et al., 2001)

Волны Лява

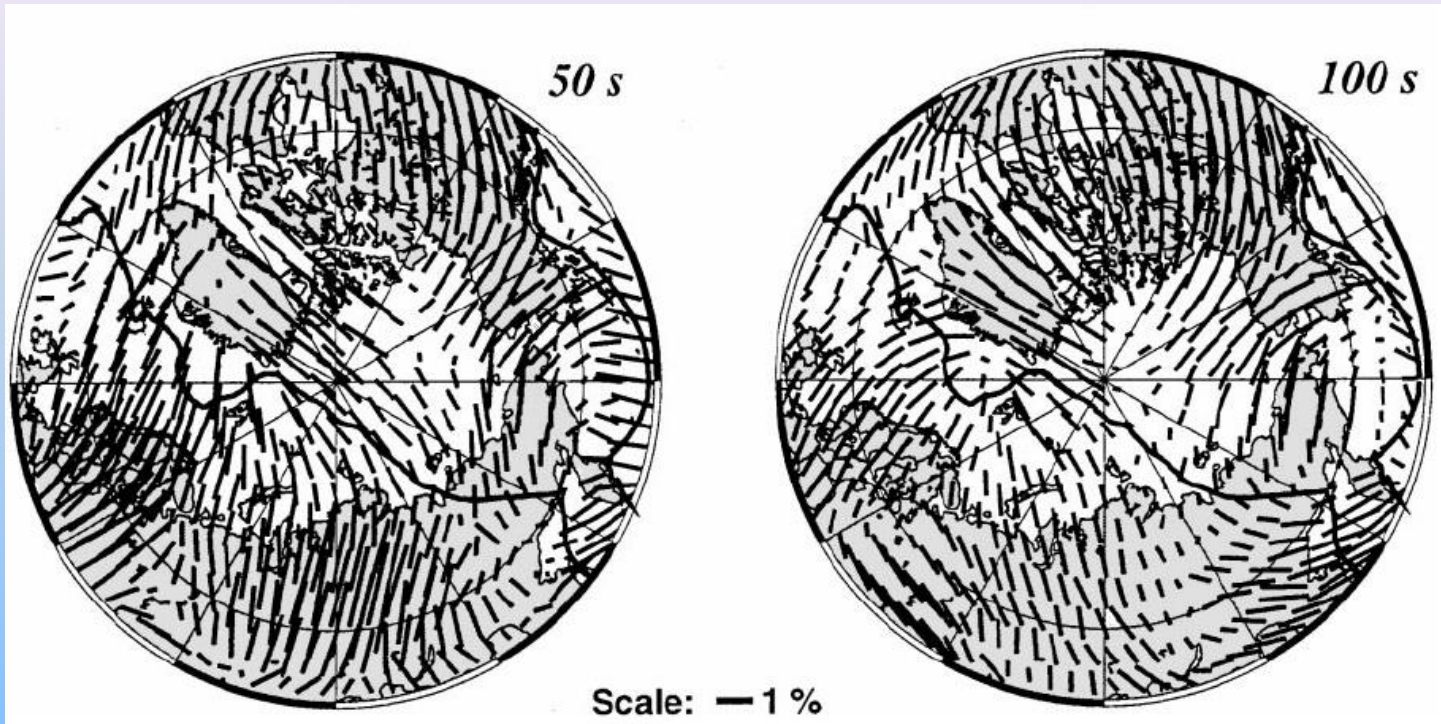


Достоинства:

1. Широкий диапазон периодов 15–200 с.
2. Достаточно однородное покрытие трассами восточного полушария.
3. Единственная региональная модель (для всей Арктики), учитывающая азимутальную анизотропию групповых скоростей волн Рэлея.



ПВТ: азимутальная анизотропия групповых скоростей волн Рэлея (Levshin et al., 2001)

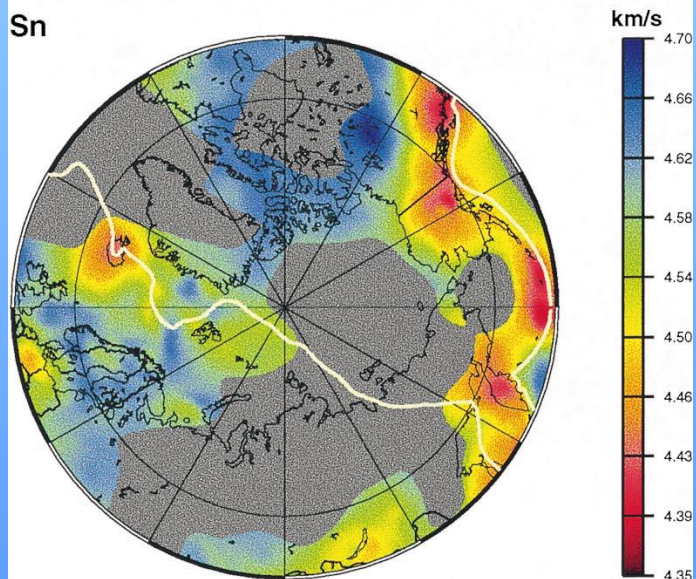
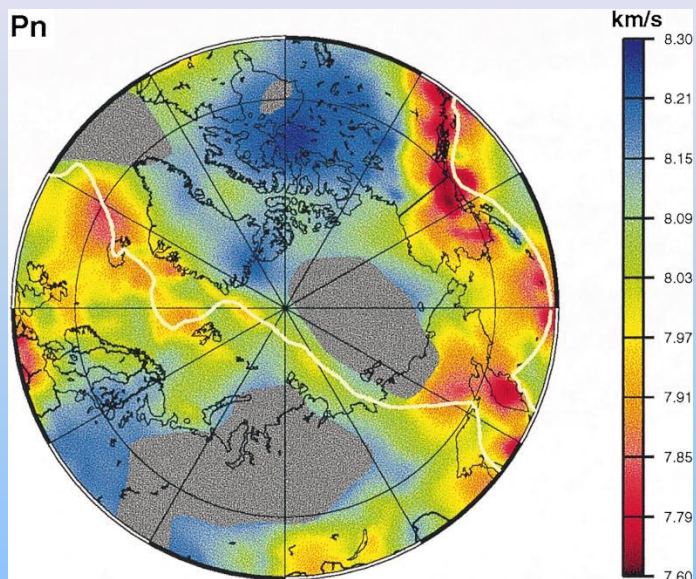


Азимутальная анизотропия:

1. Характерна для всей Арктики, включая стабильные щиты и платформы.
2. Схожие распределения для 50 и 100 с, следовательно, близкий характер распределения анизотропных свойств в верхней мантии до глубин 100–150 км.
3. Предварительные результаты, сильно зависят от выбора параметра регуляризации.

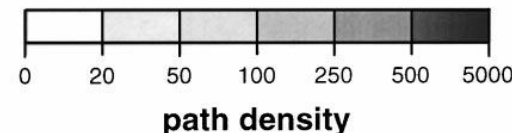
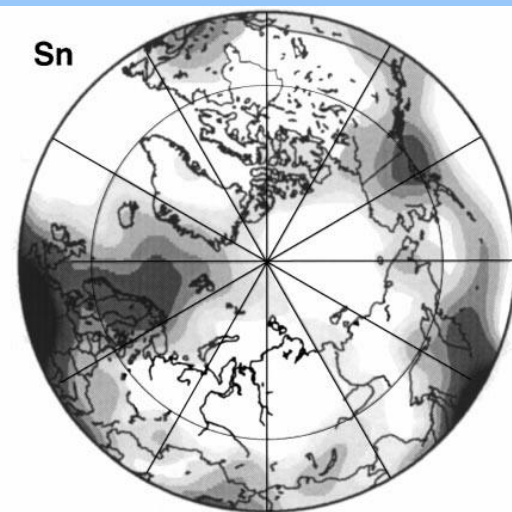
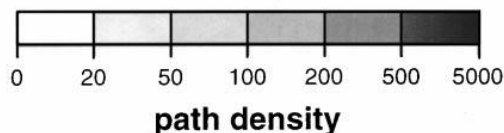
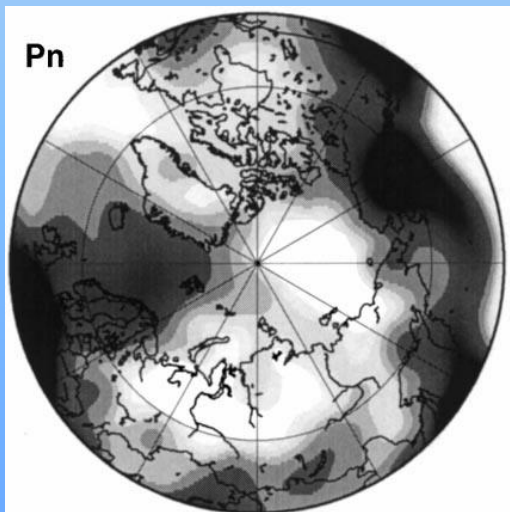
Распределения скоростей P- и S-волн в верхней мантии (Levshin et al., 2001)

Скорости P- и S-волн в мантии

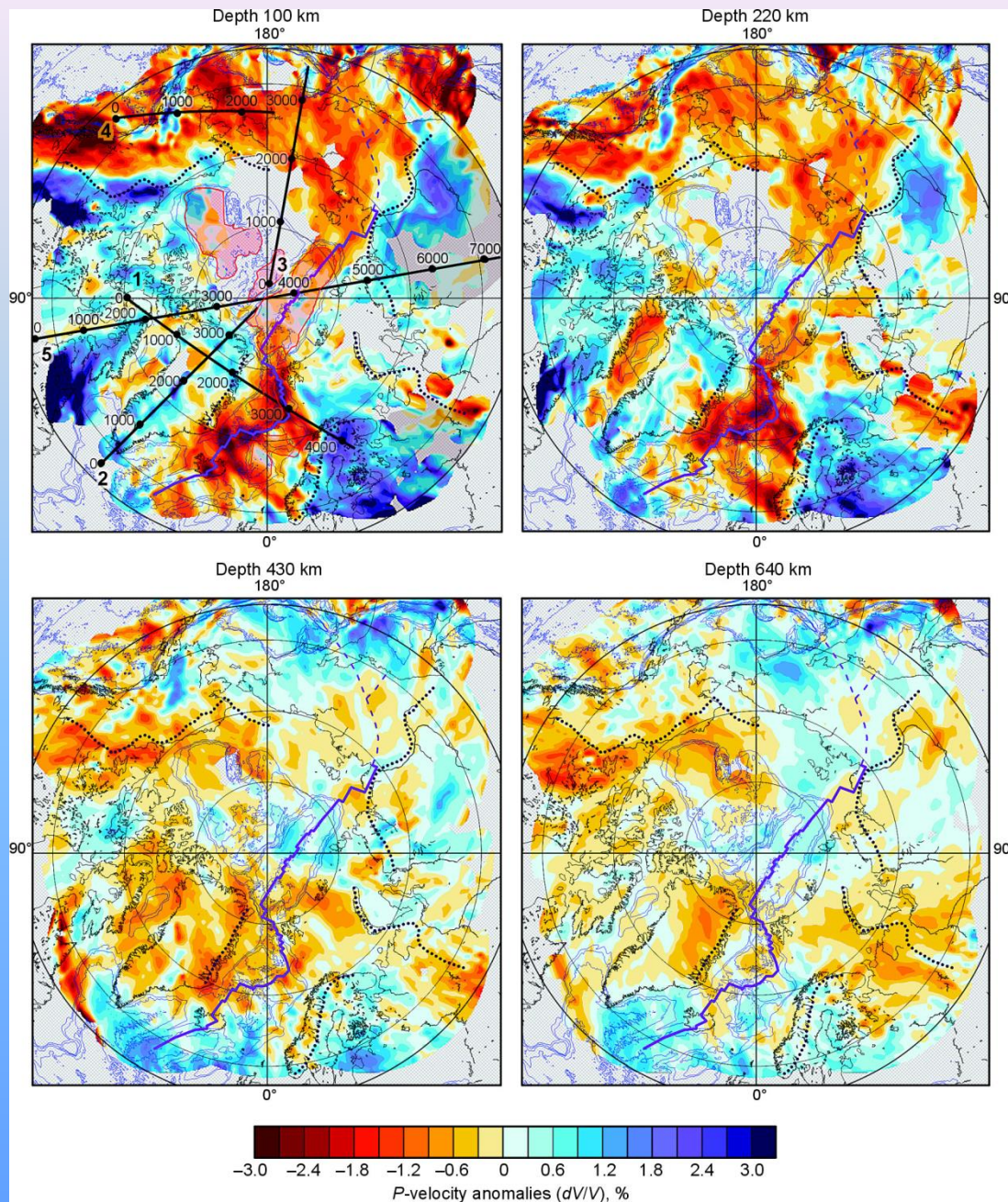


Недостатки:

1. Недостаточное покрытие сейсмическими трассами отдельных территорий (Гренландия, Северная Атлантика, Северная Америка, Восточно-Сибирское море).
2. Большая разница в количестве используемых трасс на разных периодах.
3. Трудность интерпретации – не рассчитано распределение скоростей S-волн.



Томография по объемным волнам (Яковлев и др., 2012)



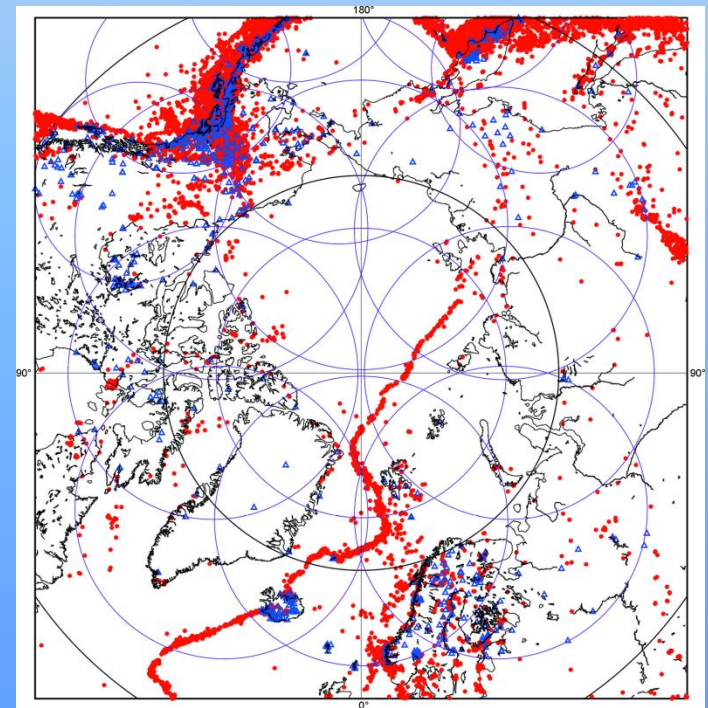
Результаты: распределение скоростей Р-волн до 670 км.

Достоинства:

- региональная модель для Р-волн;
- большая глубинность.

Недостатки:

- обширные «белые пятна» на глубинах до ~250 км;
- не указаны данные по разрешению.



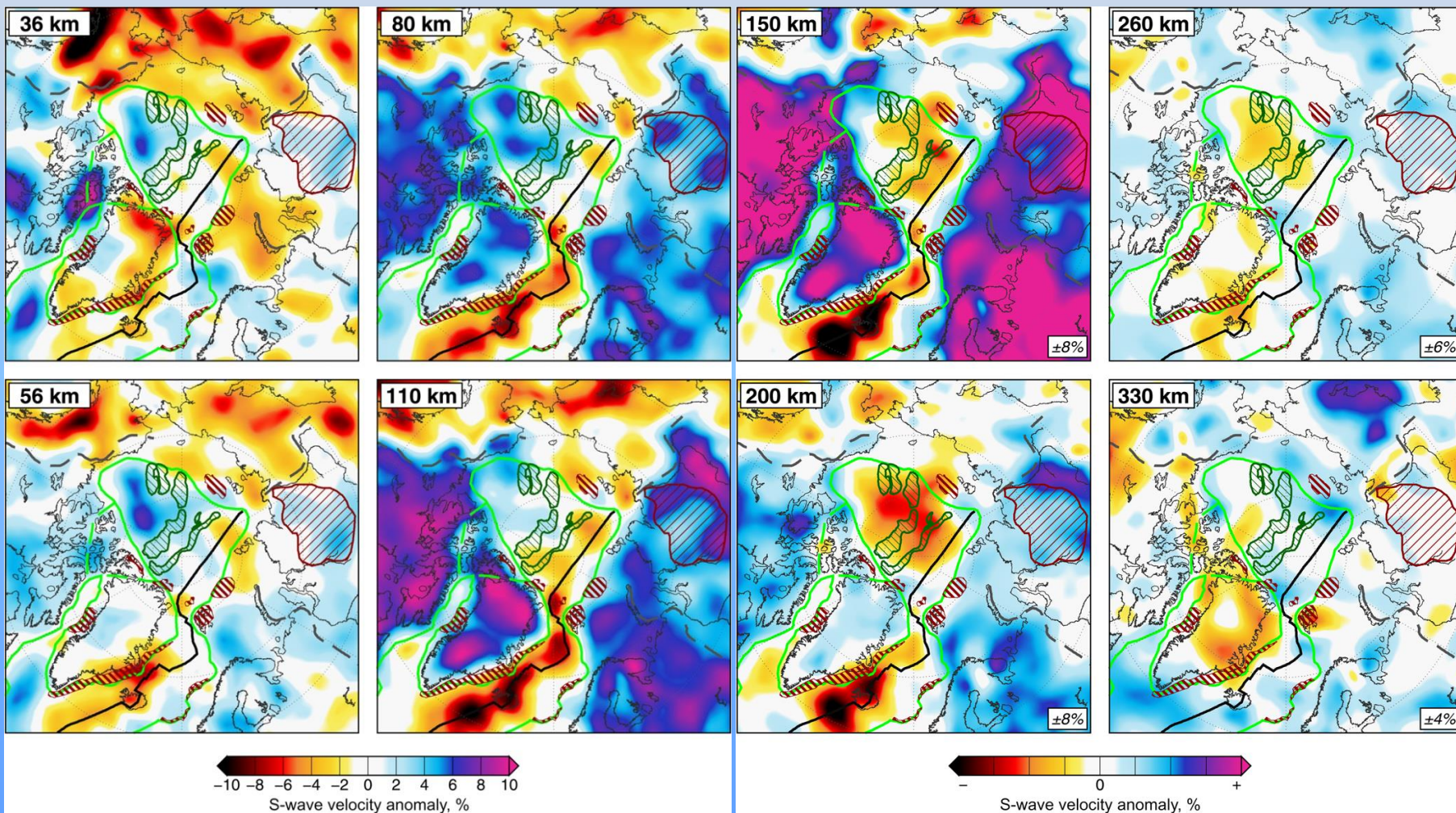
ПВТ: распределение скоростей волн SV (Lebedev et al. , 2017)

Результаты:

- распределение скоростей S-волн в коре и мантии;
- Средние температуры в интервале глубин 80-150 км.

Методы:

- Automated Multimode Inversion (Lebedev et al., 2005);
- Инверсия $V_s \rightarrow T$ – петрофизическое моделирование Perple_X (Conolly, 2005)



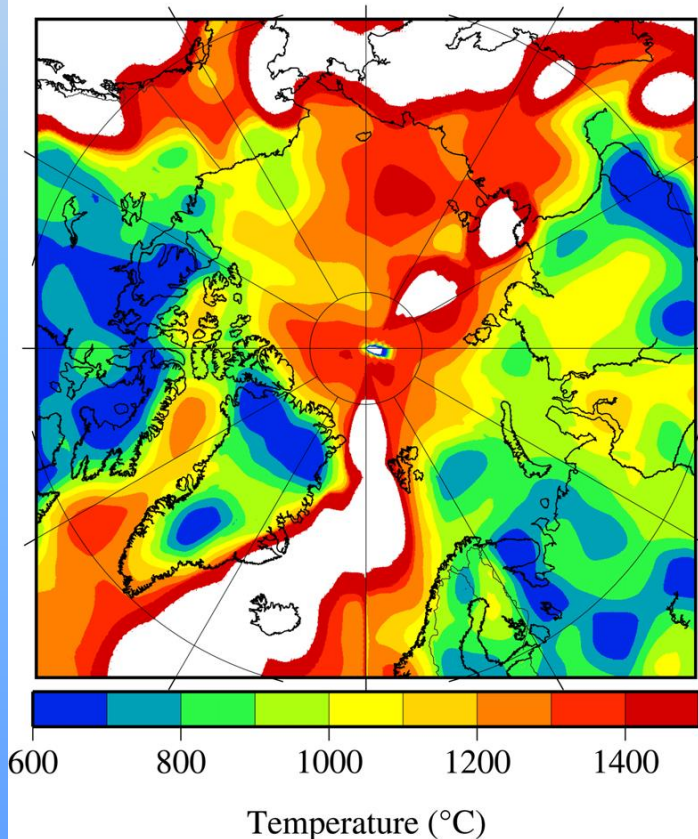
ПВТ: средние температуры (Lebedev et al. , 2017)

Достоинства:

1. Широкий диапазон периодов 10–400 с.
2. Используются высшие моды поверхностных волн, S-волны.
3. Улучшено разрешение относительно глобальных моделей.

Средняя температура (°C)

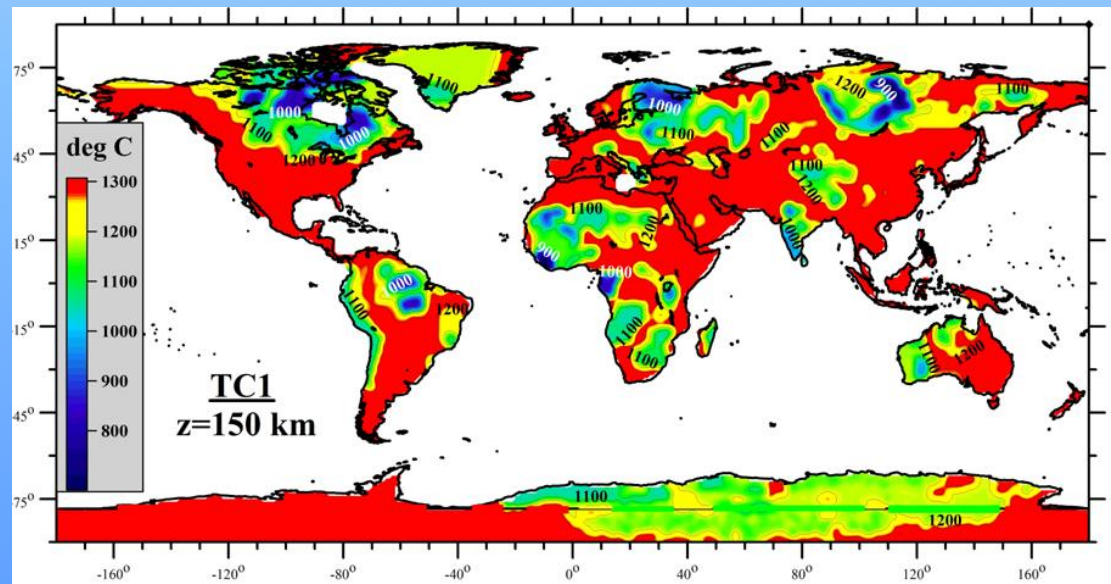
80–150 km



Недостатки:

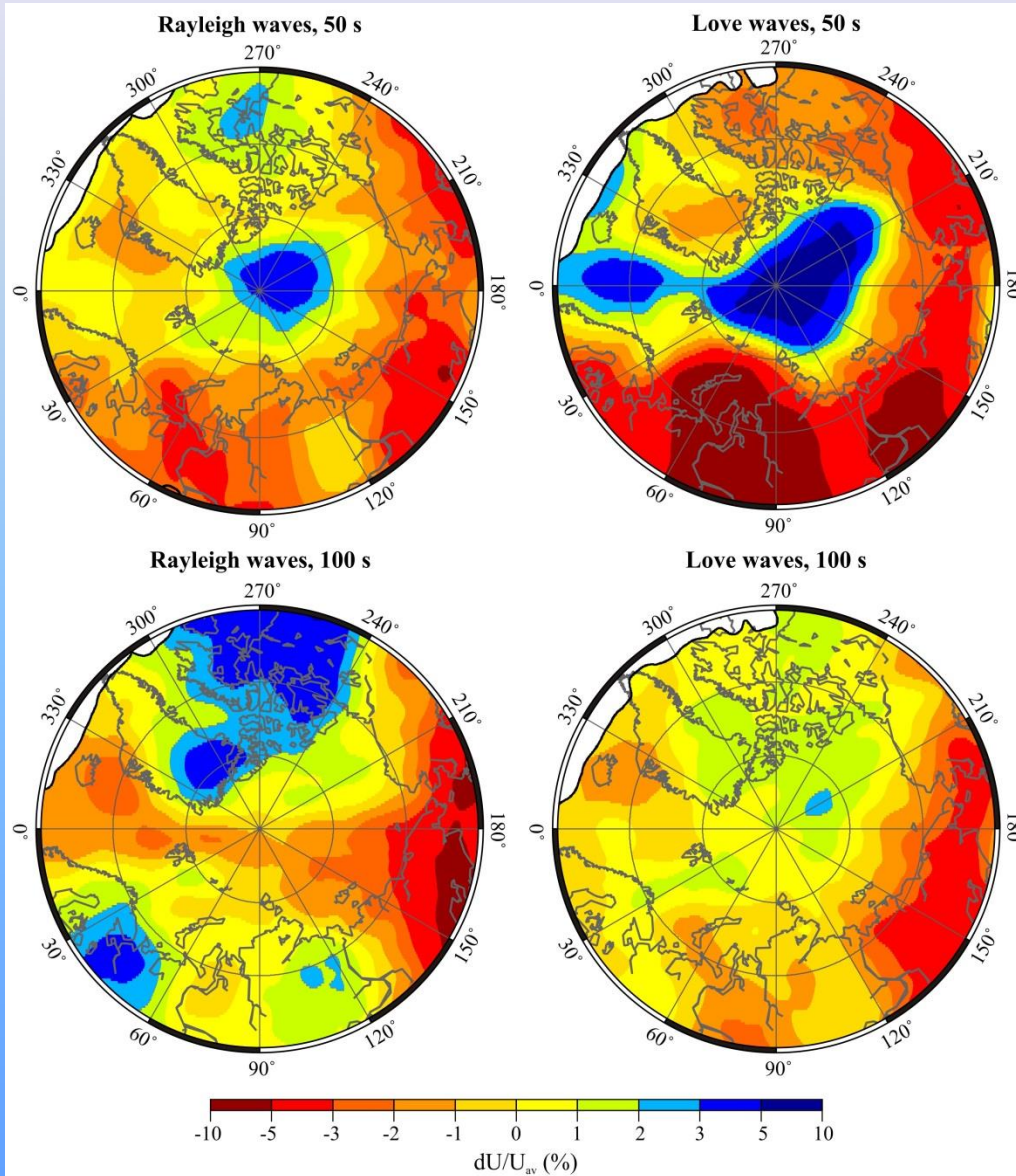
1. Не указаны данные по разрешению (в зависимости от глубины и территориально).
2. Неоднородное покрытие трассами (Северная Америка и Европа – лучшее покрытие по сравнению с северо-востоком Евразии).
3. Есть расхождения с независимыми моделями для регионов с худшим покрытием.

Модель TC1 (Artemieva, 2006)

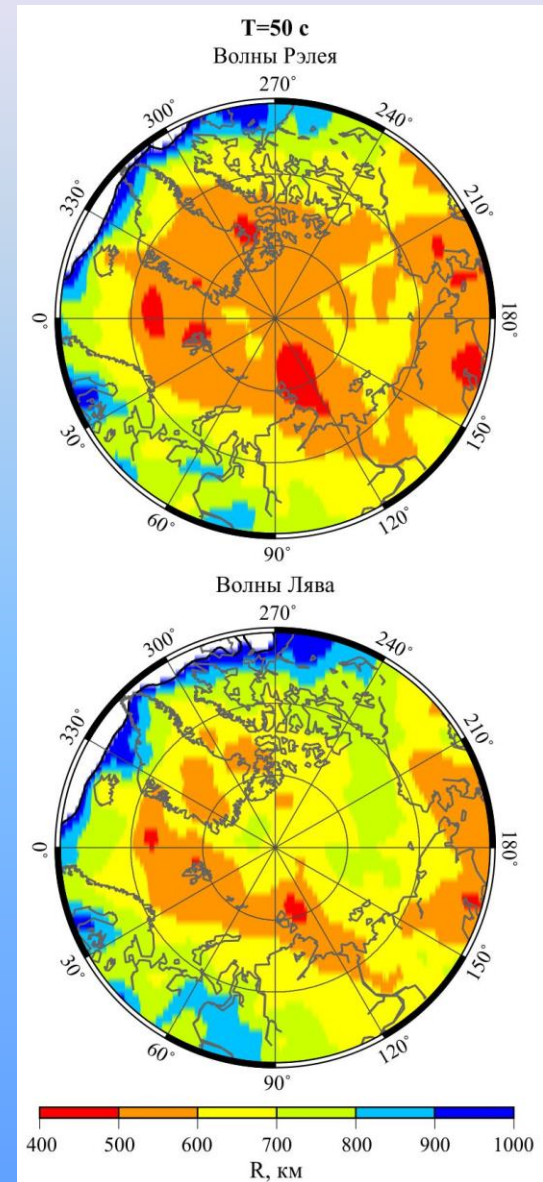


ПВТ: распределения групповых скоростей поверхностных волн (Середкина, 2019)

Групповые скорости (10–250 с)



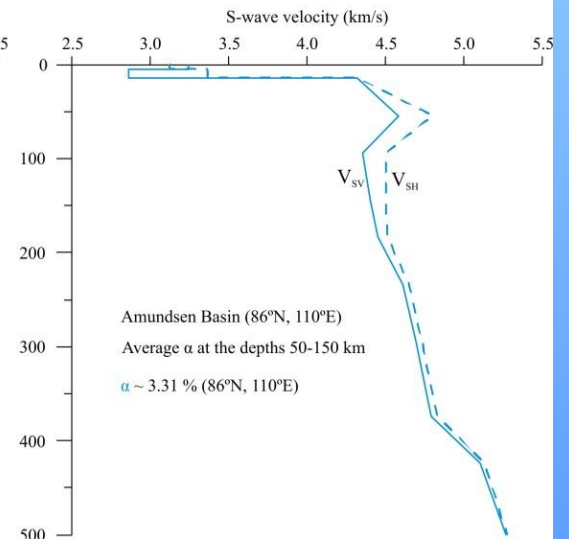
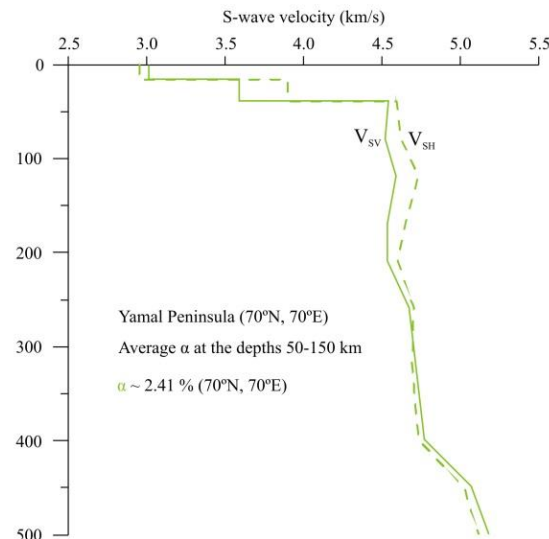
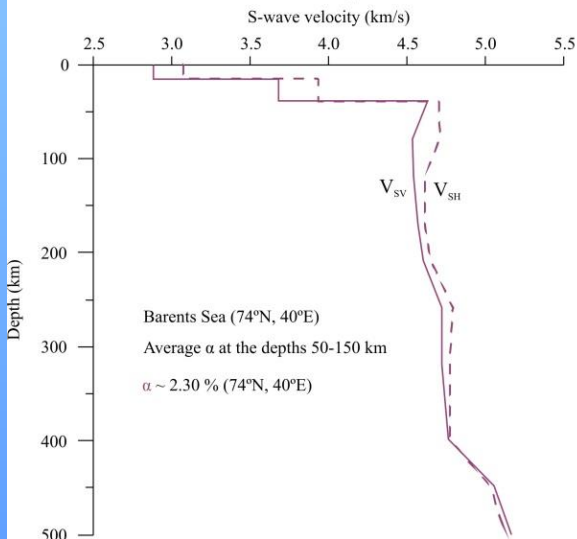
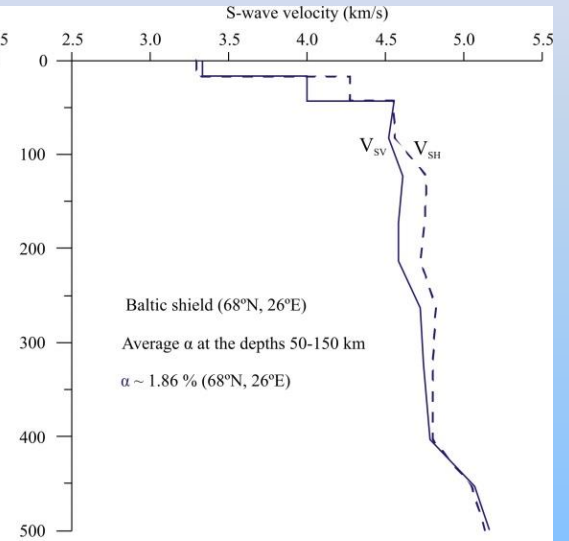
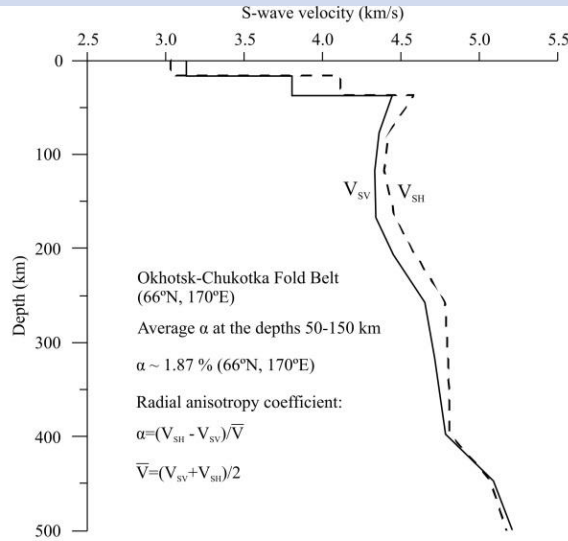
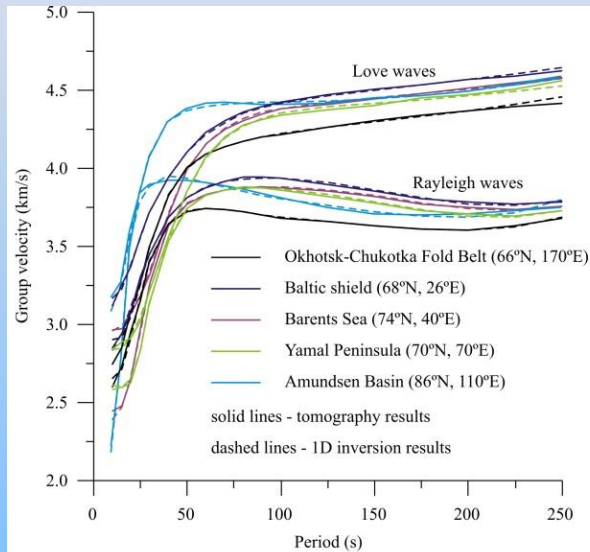
Горизонтальное разрешение



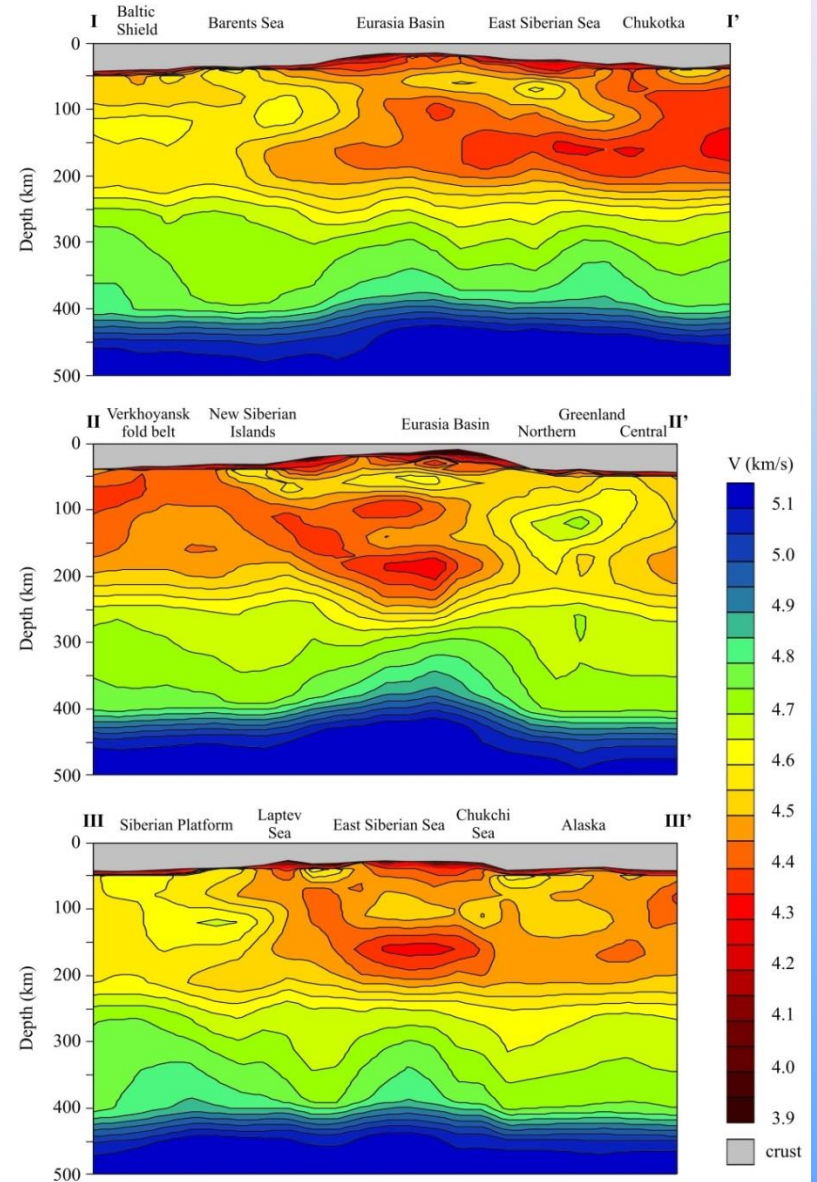
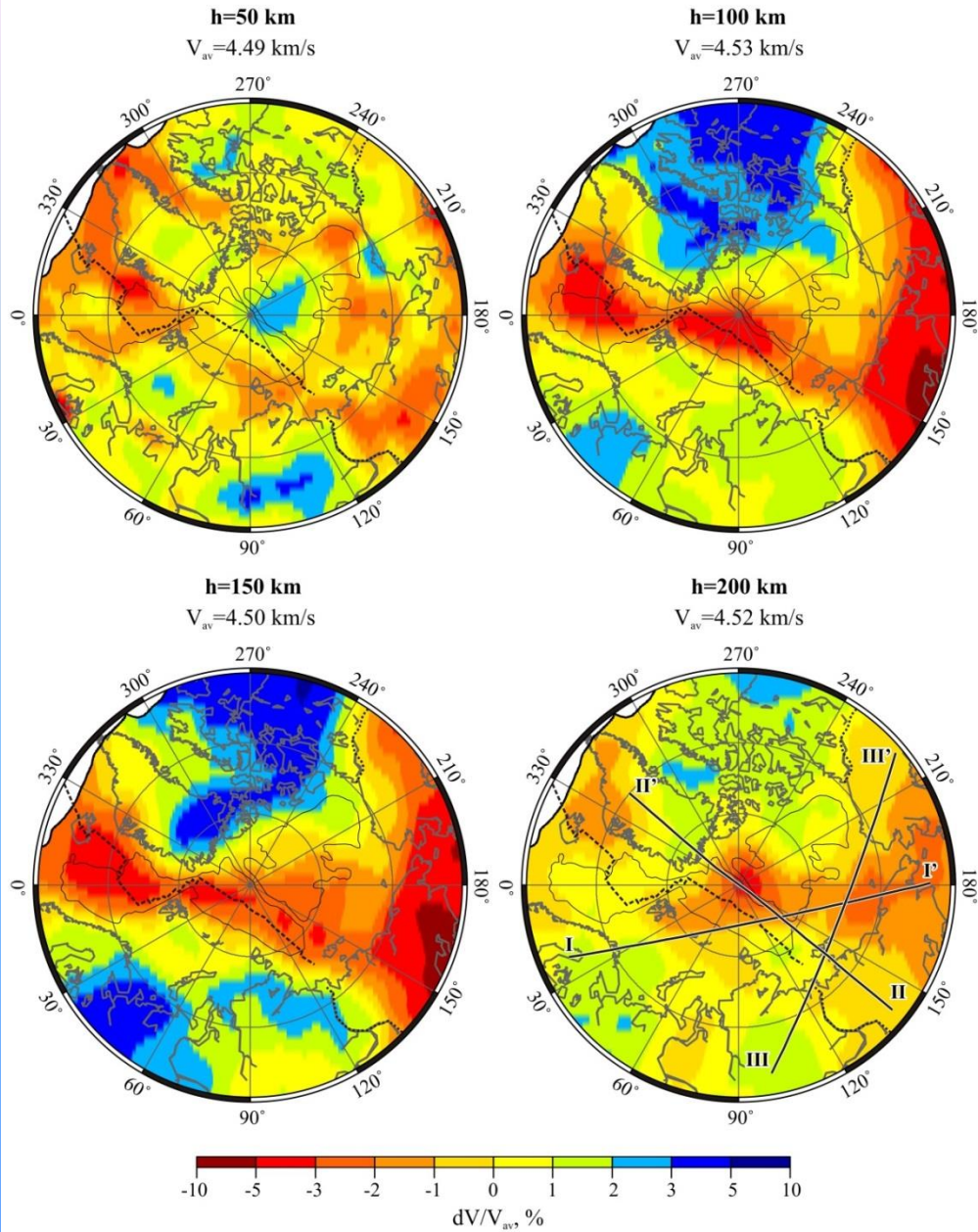
ПВТ: данные о радиальной анизотропии (Середкина, 2019)

PREM
(*Dziewonski, Anderson, 1981*)
+ модель коры

$$V_{SV}, V_{SH} \rightarrow \bar{V} = \frac{V_{SV} + V_{SH}}{2} \rightarrow \text{коэффициент радиальной анизотропии } \alpha = \frac{V_{SH} - V_{SV}}{\bar{V}}$$



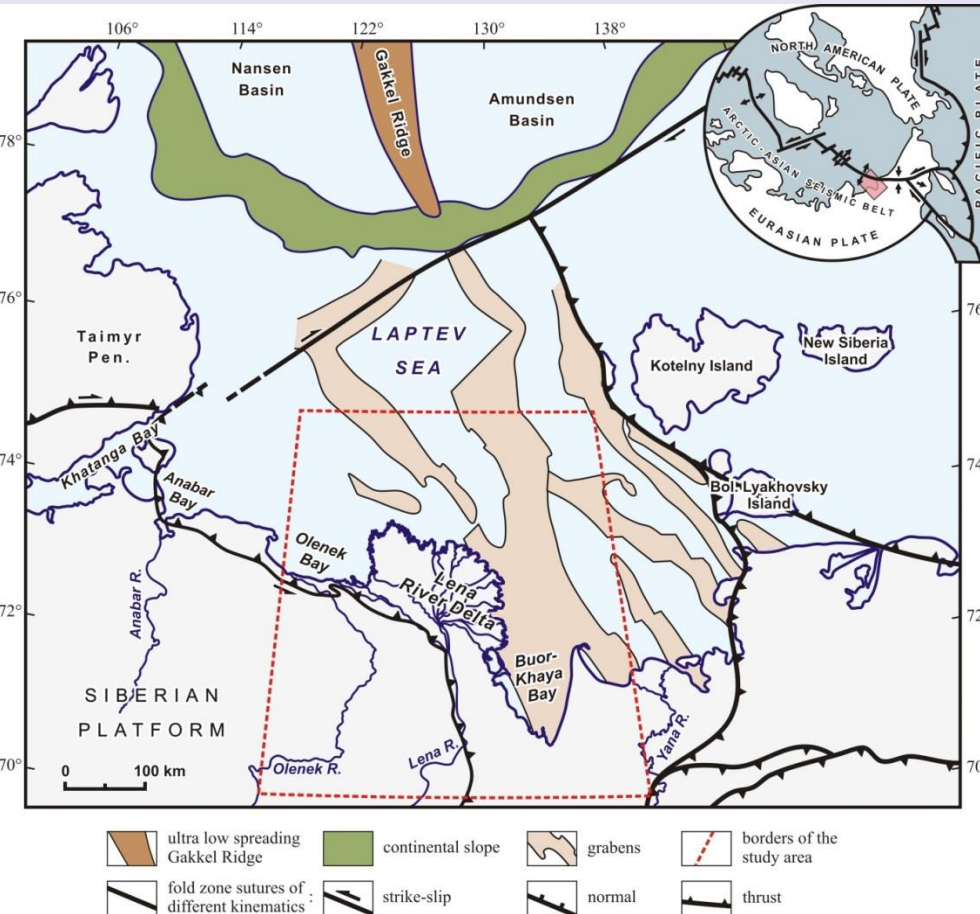
ПВТ: распределение скоростей волн SV (Seredkina, 2019)



IV. Анализ томографических моделей для решения геодинамических задач на примере моря Лаптевых

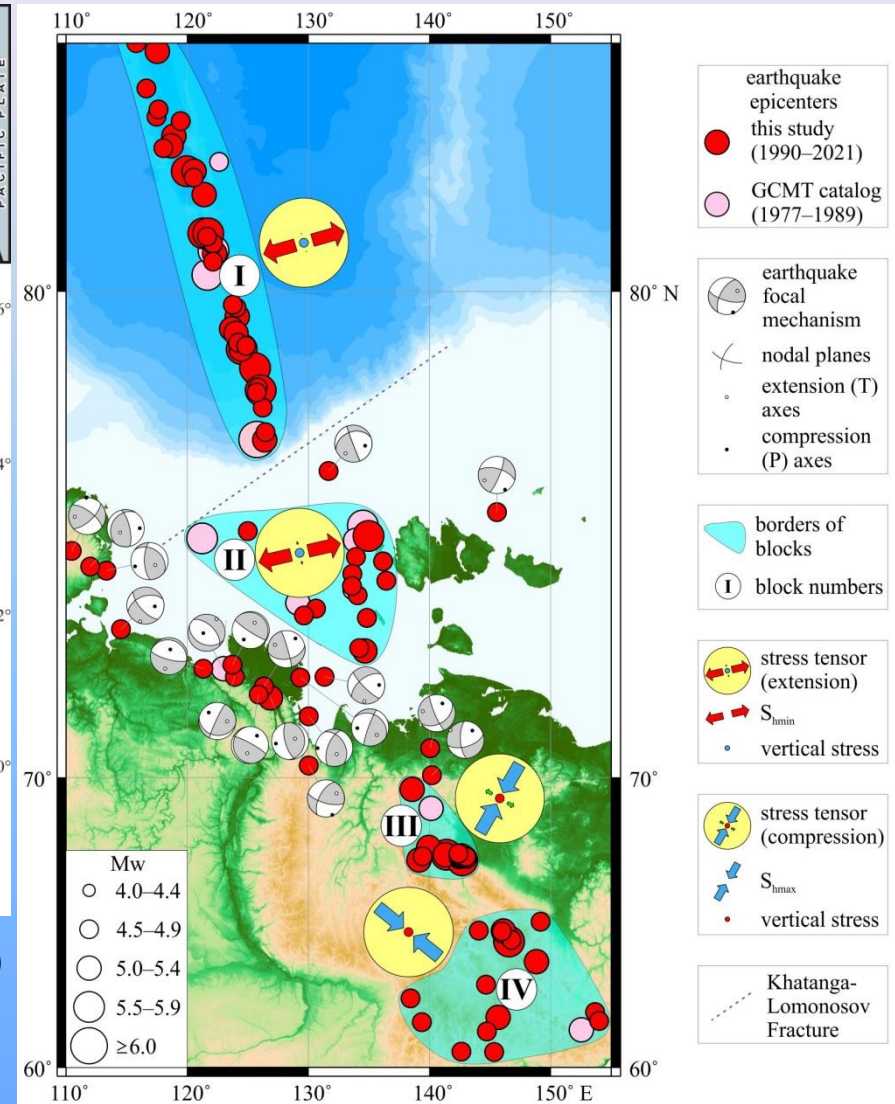
Область исследования

Тектоническая схема



(Имаева и др., 2017)

Преобладающие напряжения



(Filippova, Melnikova)

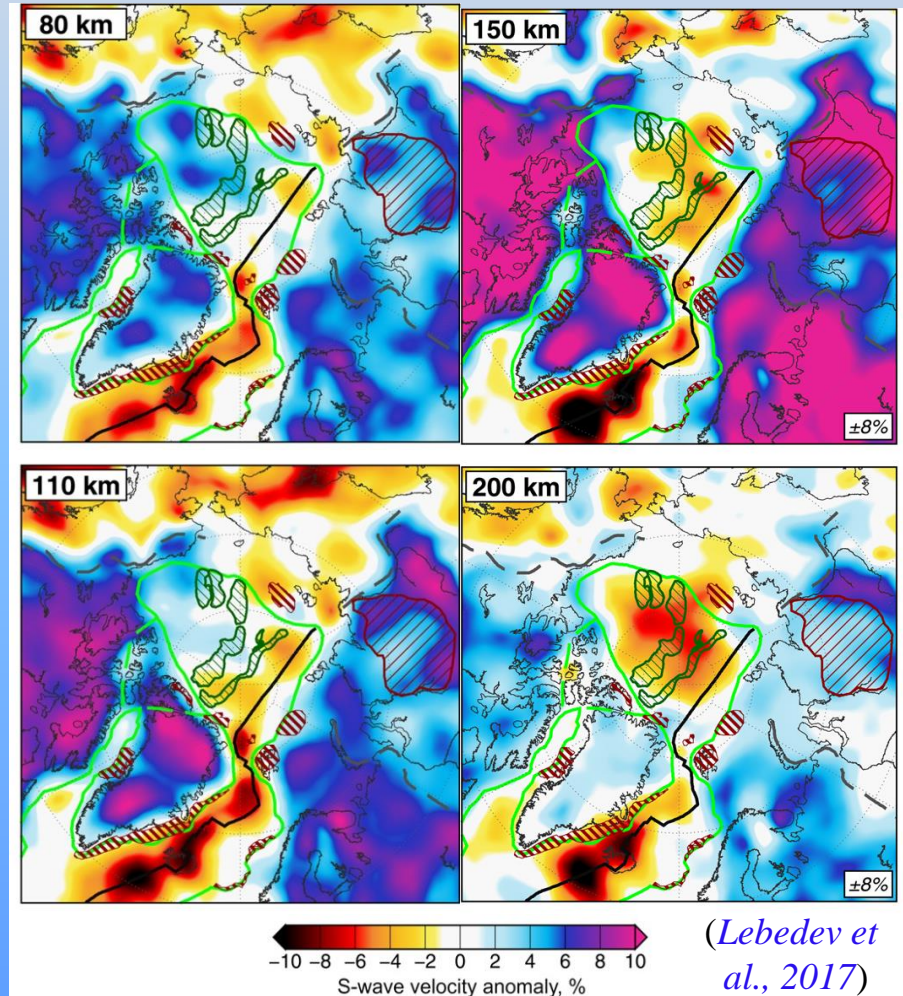
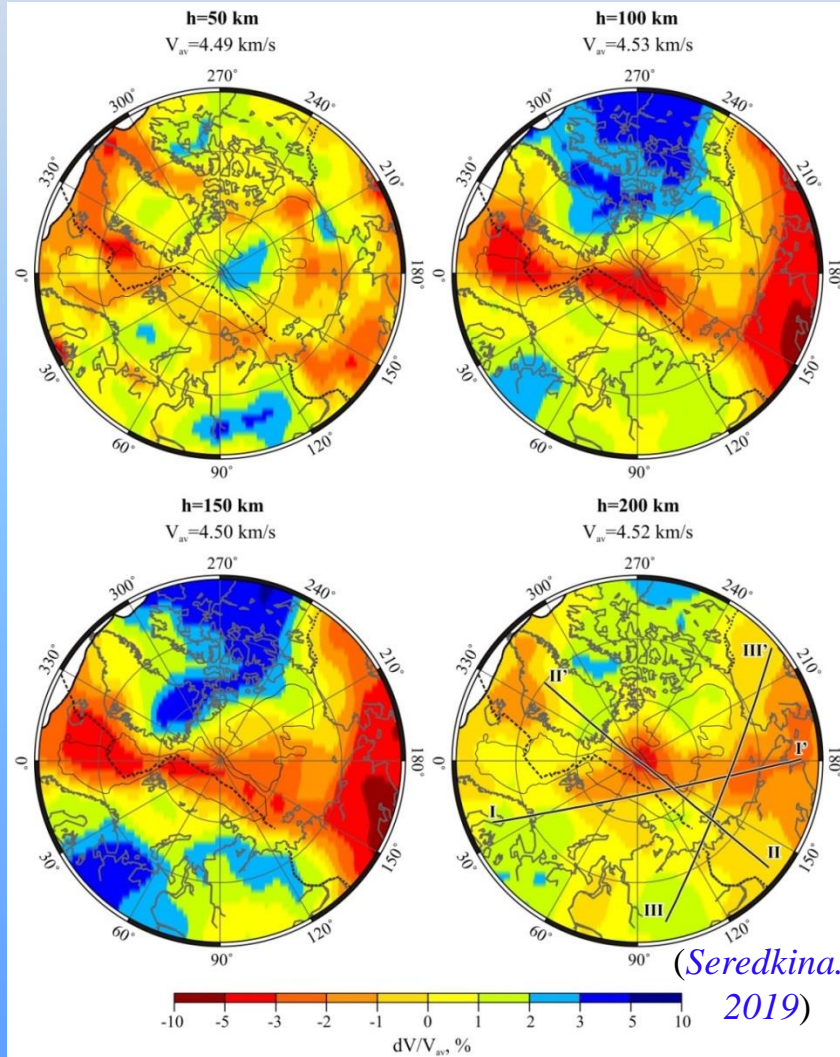
Возможные причины растяжения литосферы vs результаты томографии

Активный рифтинг:

- Продолжение хребта Гаккеля на шельф (Виноградов, 1984; Ким, 1986)
- Мантийный плюм (Grachev, 2003)

Пассивный рифтинг:

- Движения Лаптевоморской микроплиты (Avetisov, 1999)
- Движения на границе Северо-Американской и Евразийской плит (Drachev, Scharubo, 2017)



V. Заключение

Из-за недостатка сейсмических станций и невысокого уровня сейсмической активности Арктика остается одним из наименее изученных регионов Земли с точки зрения глубинного строения.

Существующие модели строения земной коры и верхней мантии согласуются между собой относительно крупномасштабных деталей глубинного строения, но могут существенно отличаться для более мелких структур.

Используя ту или иную модель, необходимо учитывать ее разрешение (может меняться по горизонтали и с глубиной), погрешности вычислений, ограничения методов и т.д.

Спасибо за внимание!



*Оз. Байкал
Бухта Песчаная*

Филиппова Алена Игоревна

Кандидат физико-математических наук

Старший научный сотрудник Института теории прогноза землетрясений и математической геофизики РАН

Старший научный сотрудник Института земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН

aleirk@mail.ru