

# Системный анализ динамики природных процессов в российской Арктике

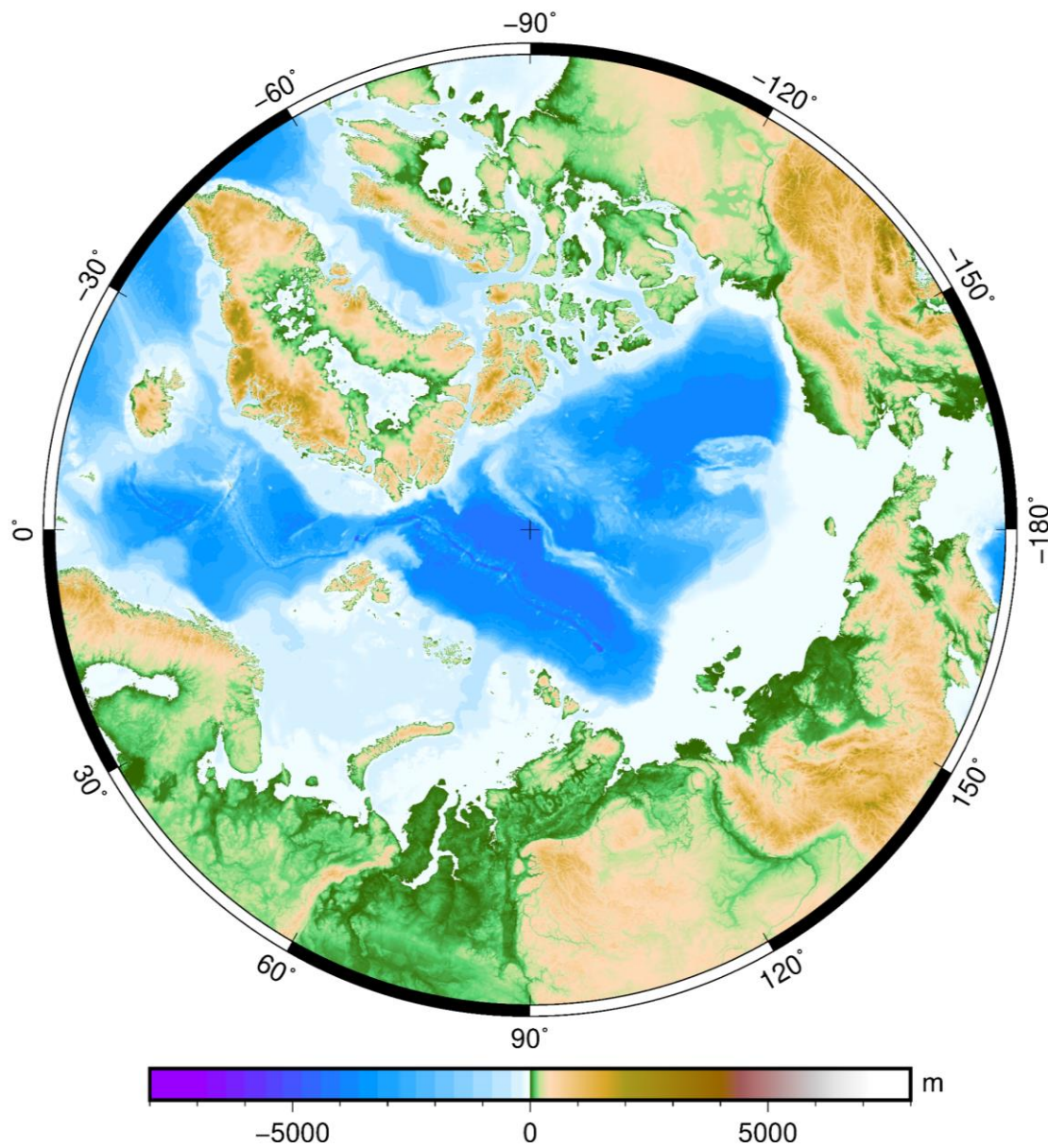
## Изучение геодинамики Арктики по данным спутниковой геодезии

Г.М. Стеблов

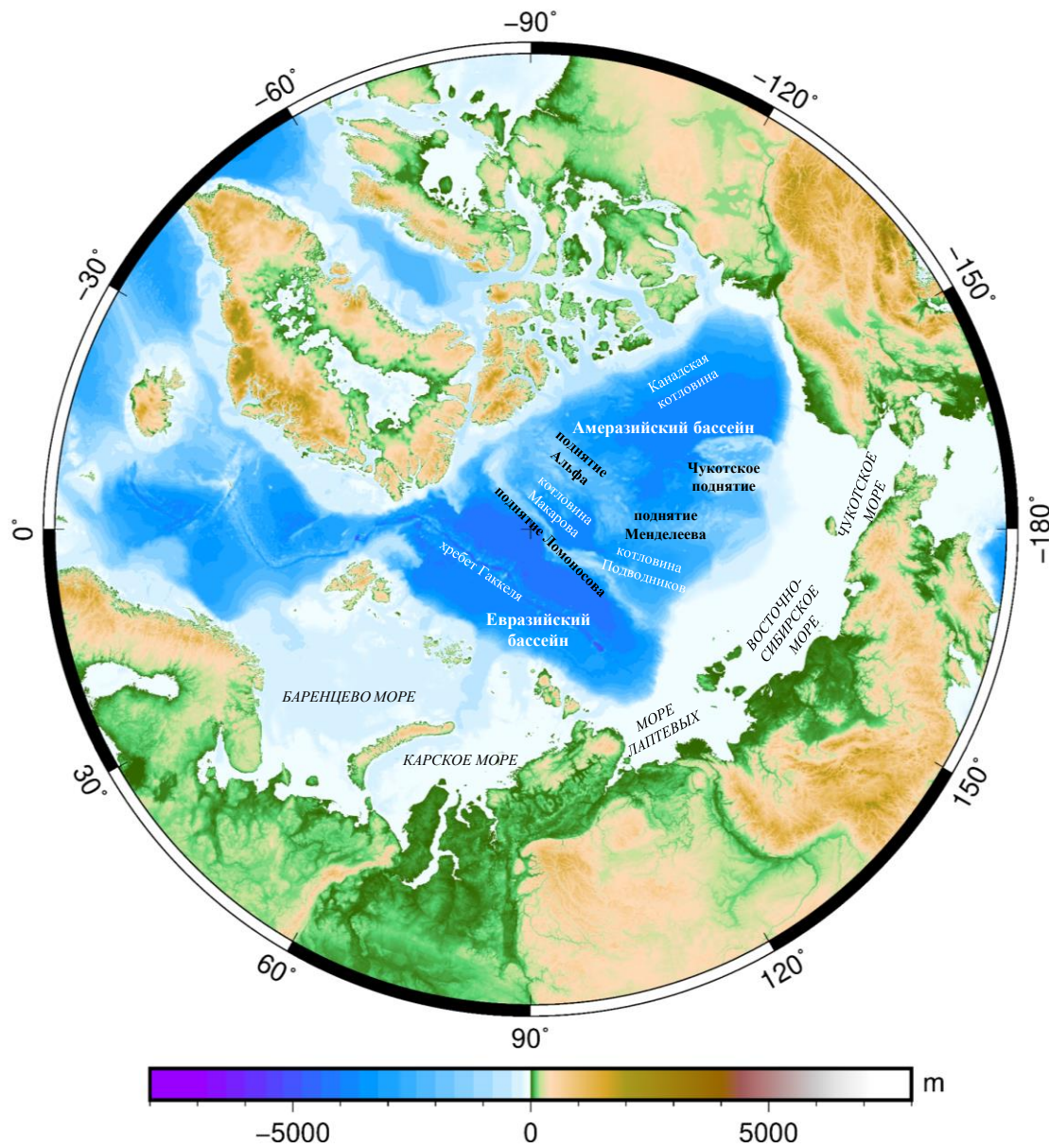
Институт теории прогноза землетрясений и  
математической геофизики РАН

*Московская область, 6-9 июня 2022*

# Арктика

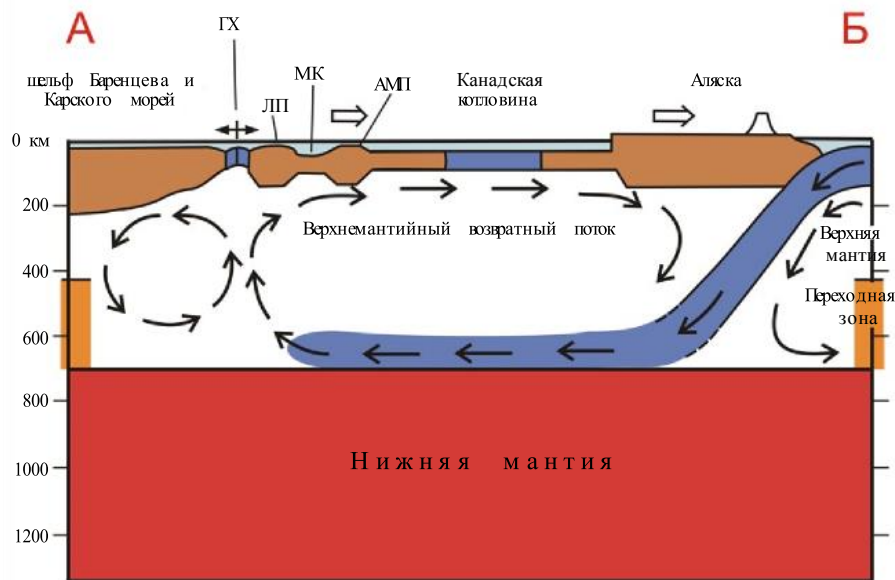
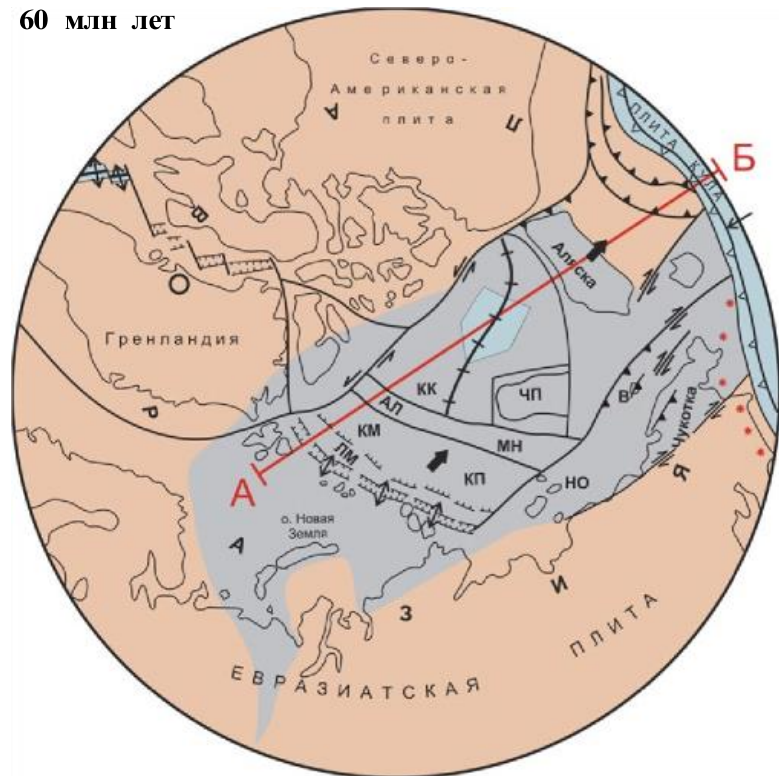


# Арктика: основные морфоструктуры



# Арктика: палеогеодинамическая реконструкция и верхнемантийная конвекция под континентом Лавразия

60 млн лет



АМП – поднятие Альфа-Менделеева, ГХ – хребет Гаккеля, ЛП – поднятие Ломоносова, МК – котловина Макарова.

1 – водная толща океана; 2–3 – литосфера: 2 – континентальная, 3 – океаническая; 4 – вектор движения континентальных блоков в направлении Тихоокеанской зоны субдукции под воздействием активной возвратной ячейки верхнемантийной конвекции; 5 – направление потоков в верхней мантии и переходной зоне; 6 – спрединг в Евразийской котловине; 7 – проявления магматизма

АЛ – хребет Альфа, В – о. Врангеля, КК – Канадская котловина, КМ – котловина Макарова, КП – котловина Подводников, ЛМ – хребет Ломоносова, МН – хребет Менделеева, НО – Новосибирские о-ва, ЧП – Чукотское поднятие.

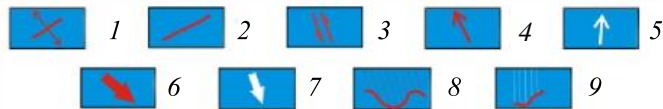
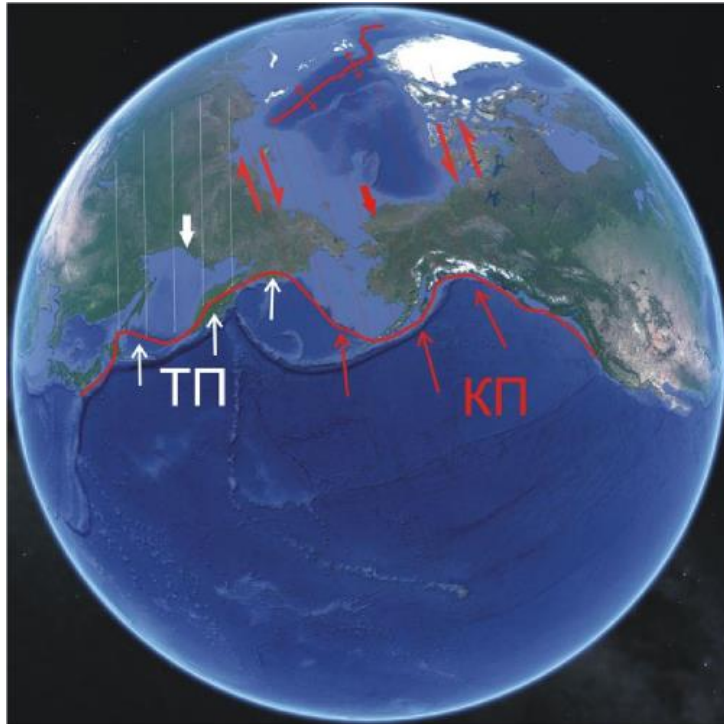
1–2 – области с корой: 1 – континентальной, 2 – океанической; 3 – территория распавшегося палеоконтинента Арктида; 4 – положение на плане профиля с разрезом геодинамической модели; 5–8 – зоны: 5 – спрединга (отмершие), 6 – субдукции, 7 – надвигов; 8 – сдвигов (крупномасштабные) и трансформных разломов; 9 – рифты; 10–12 – направление: 10 – сдвигов, 11 – растяжения, по структурным данным [17, 66], 12 – движения блоков Американо-Азиатской микроплиты относительно Лавразии; 13 – островодужный магматизм

*М.В. Кононов, Л.И. Лобковский. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕМАНИЙНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ И СВЯЗАННОЙ С НЕЙ СУБДУКЦИИ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ НА ТЕКТОНИКУ АРКТИКИ В ПОЗДНЕМ МЕЛУ–КАЙНОЗОЕ // ГЕОТЕКТОНИКА, 2019, № 6, с. 27–45.*

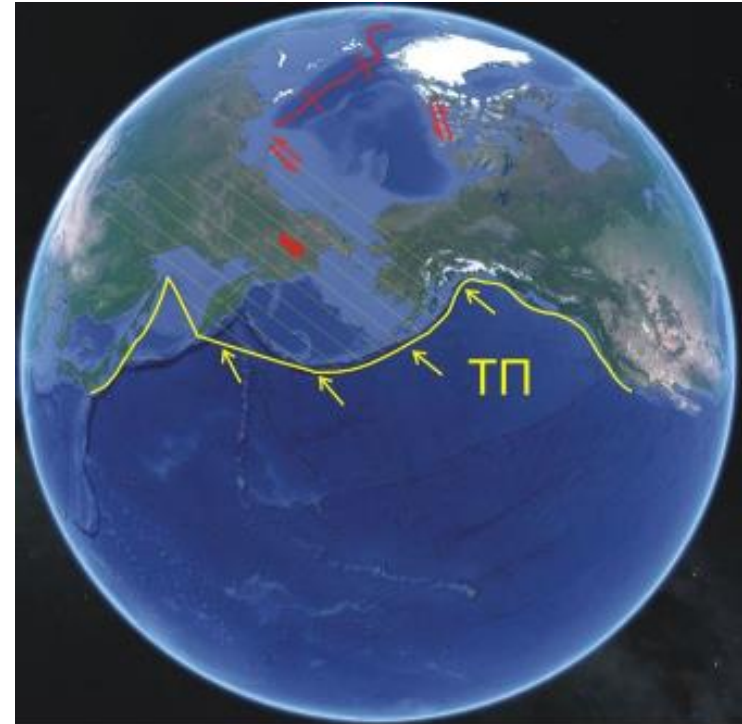


# Спрединг в арктическом Евразийском бассейне и движение Тихоокеанской плиты

57 млн лет



44 млн лет

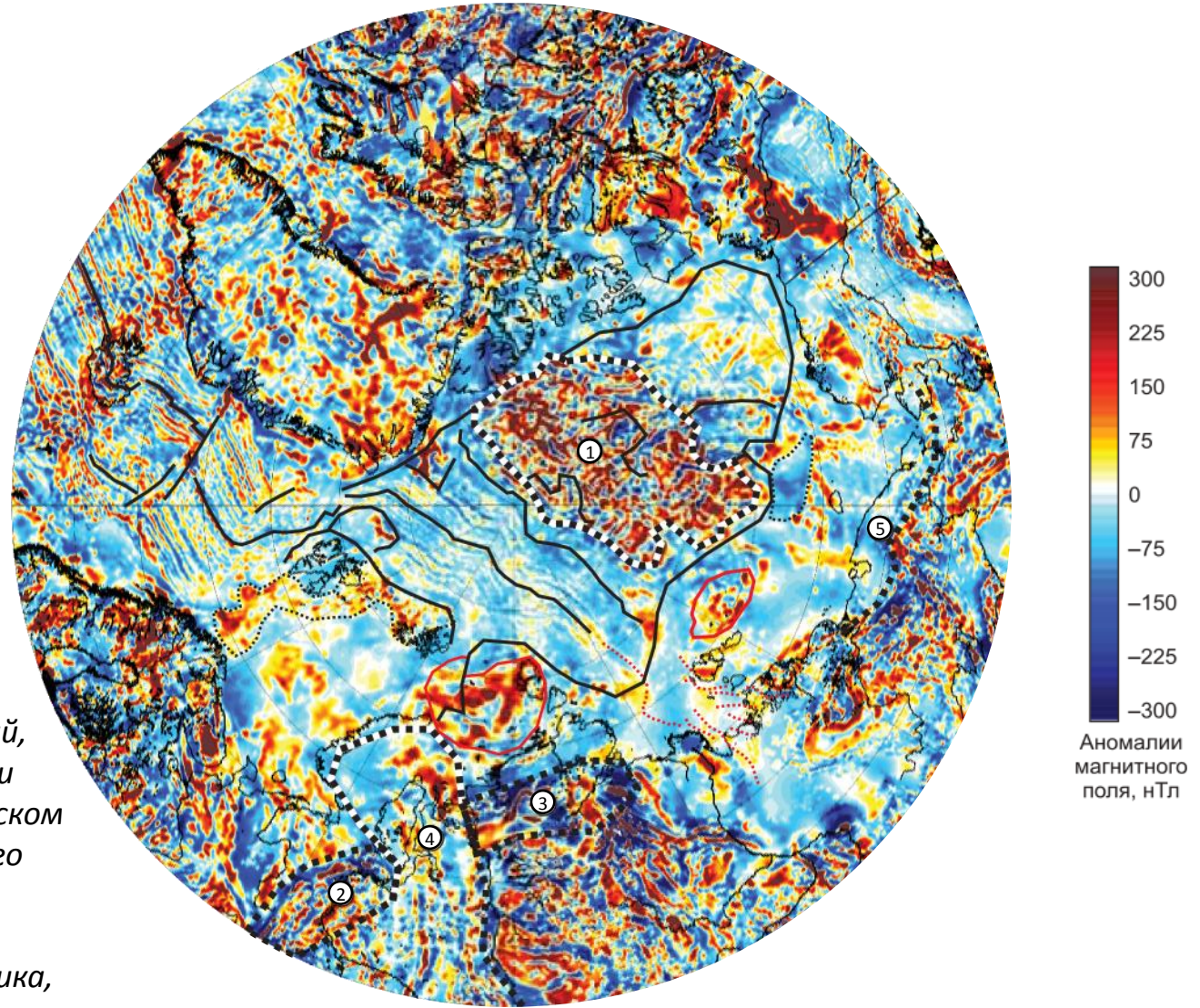


1 – спрединг на арктическом подводном хребте Гаккеля; 2 – действующая система зон субдукции; 3 – сдвиговые зоны; 4–5 – векторы скоростей движения: 4 – океанической плиты Кула ( $\approx 12$  см/год), 5 – Тихоокеанической плиты ( $\approx 6.5$  см/год); 6–7 – направление движения, в соответствии с воздействием верхнемантийной конвективной ячейки, навстречу Тихоокеанской зоне субдукции: 6 – арктической Амеразийской микроплиты, 7 – Евразийской плиты; 8–9 – горизонтальный размер подлитосферной верхнемантийной ячейки, образованной в результате субдукции океанской литосферы в глубоководных желобах: 8 – плиты Кула, 9 – Тихоокеанской плиты

1 – спрединг на арктическом подводном хребте Гаккеля; 2 – действующая система зон субдукции; 3 – сдвиговые зоны; 4 – векторы скоростей движения Тихоокеанической плиты ( $\approx 5$  см/год); 5 – направление движения Евразийской плиты навстречу Тихоокеанской зоне субдукции в соответствии с воздействием верхнемантийной конвективной ячейки, 6 – горизонтальный размер подлитосферной верхнемантийной ячейки, образованной в результате субдукции океанской литосферы Тихоокеанской плиты в глубоководных желобах

*М.В. Кононов, Л.И. Лобковский. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕМАНТИЙНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ И СВЯЗАННОЙ С НЕЙ СУБДУКЦИИ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ НА ТЕКТОНИКУ АРКТИКИ В ПОЗДНЕМ МЕЛУ–КАЙНОЗОЕ // ГЕОТЕКТОНИКА, 2019, № 6, с. 27–45.*

# Магнитные аномалии в Арктике

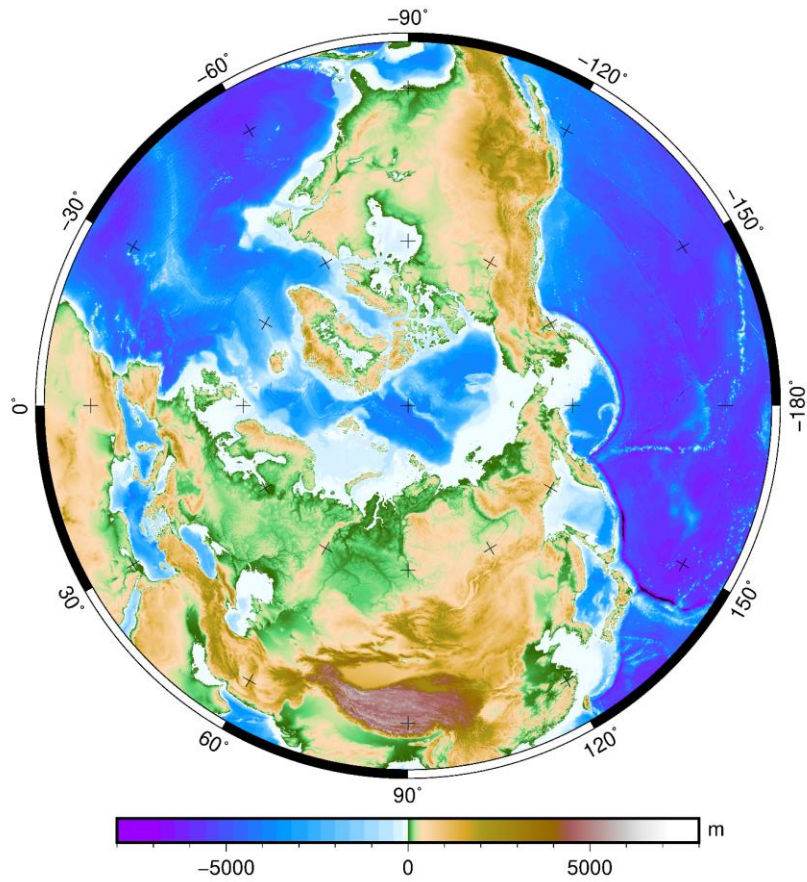


*И.Ю. Кулаков, К. Гайна,  
Н.Л. Добрецов, А.Н. Василевский,  
Н.А. Бушенкова. Реконструкции  
перемещений плит в арктическом  
регионе на основе комплексного  
анализа гравитационных,  
магнитных и сейсмических  
аномалий // Геология и геофизика,  
2013, т. 54, № 8, с. 1108—1125.*

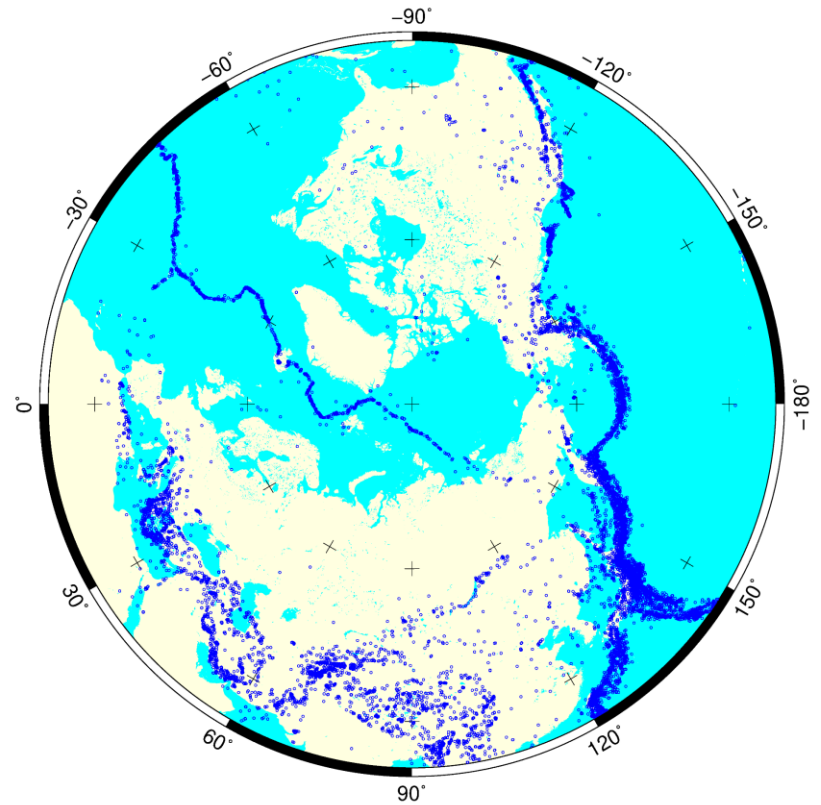


# Арктика

## топография

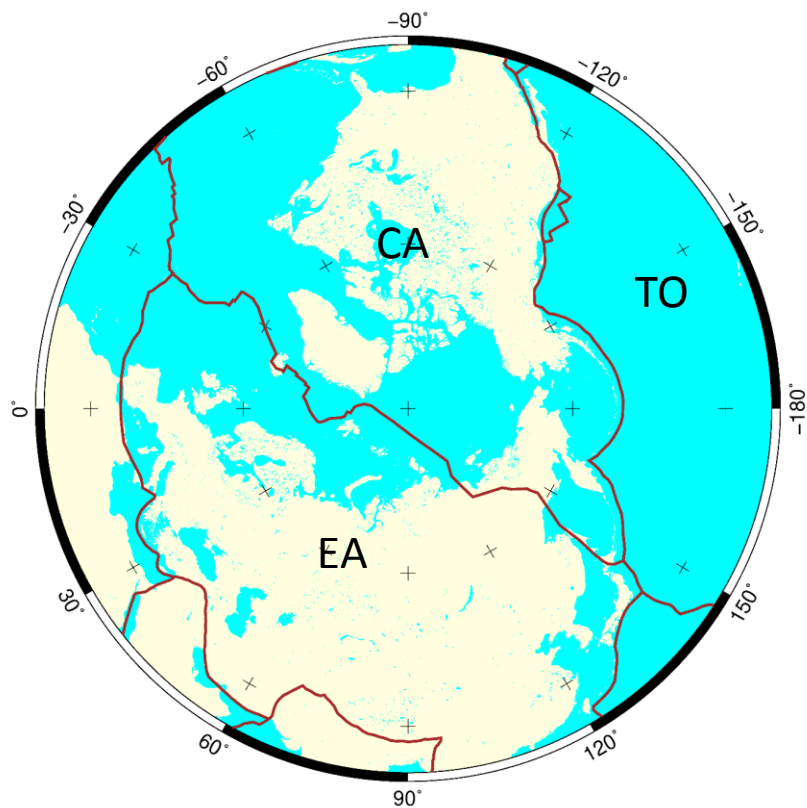


## сейсмичность

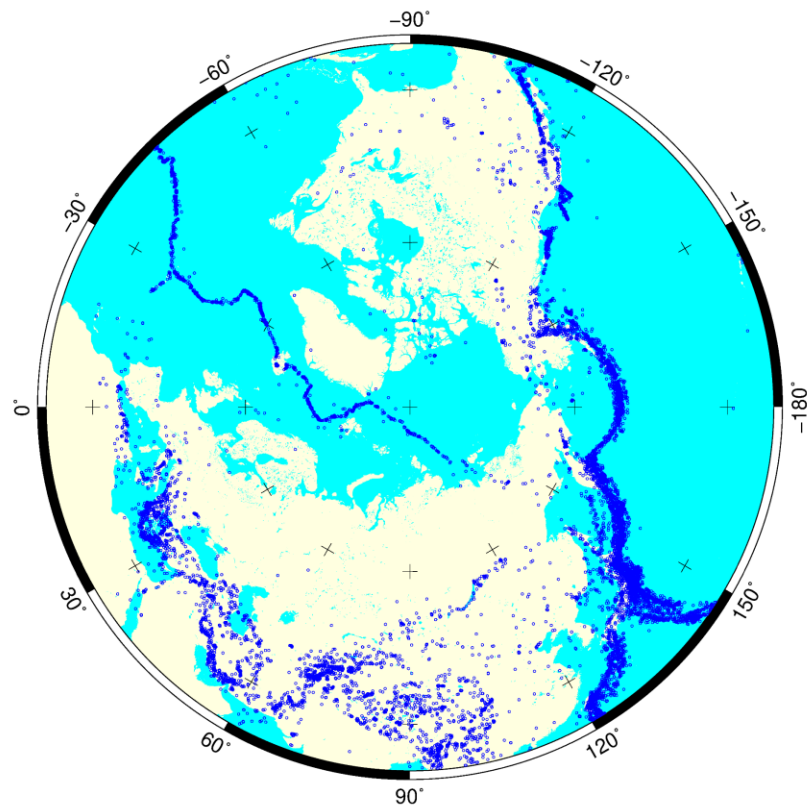


# Арктика

тектоника

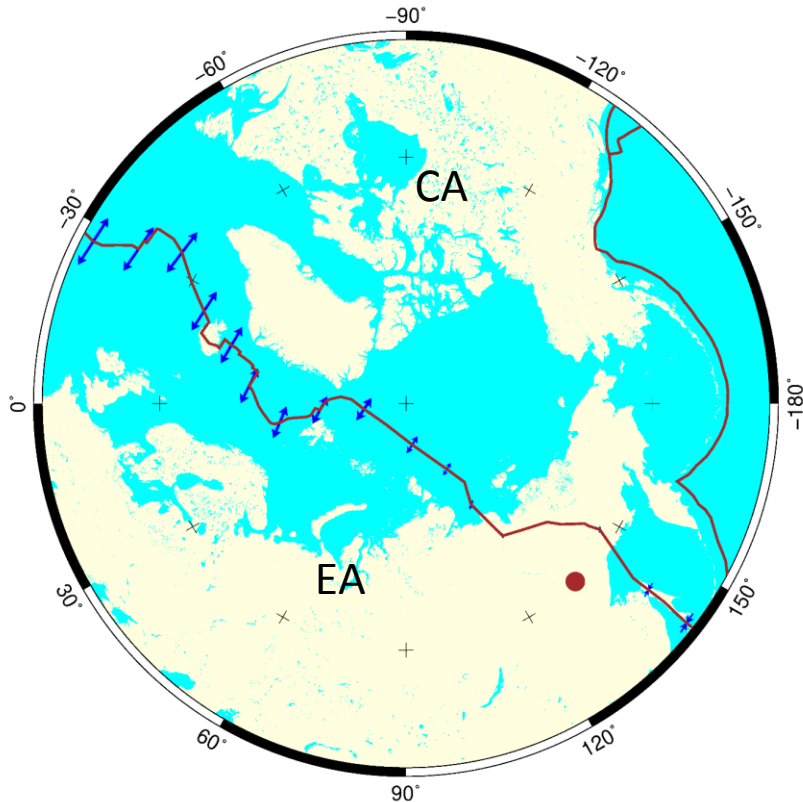


сейсмичность





# Арктика: спрединг



Кинематика плиты:

$$\bar{V} = \bar{\Omega} \times \bar{R}$$

$\bar{\Omega}$  – вектор Эйлера

$\bar{V}$  – скорость,

$\bar{R}$  – радиус-вектор

Скорость спрединга:

$$\Delta \bar{V} = \bar{\Omega}_{1,2} \times \bar{R}, \quad \bar{\Omega}_{1,2} = \bar{\Omega}_1 - \bar{\Omega}_2$$

Полюс взаимного вращения:

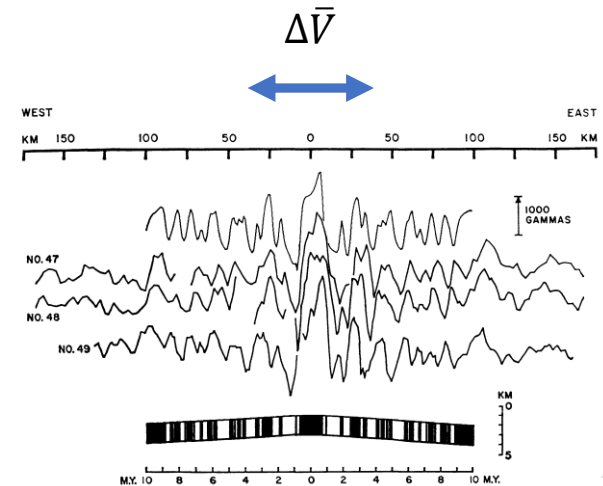
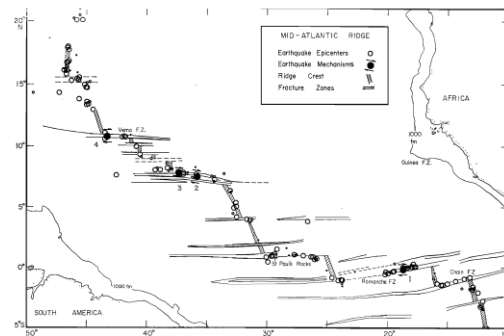
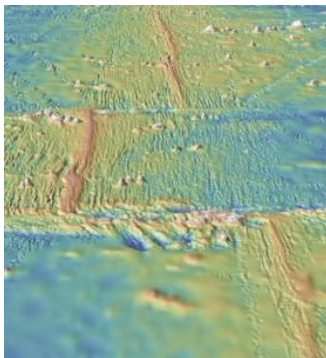
$$\bar{\Omega}_{1,2} \times \bar{R}_i = \Delta \bar{V}_i \Rightarrow \bar{\Omega}_{1,2}$$

W. C. Pitman, III  
and J. R. Heirtzler.  
*Science*. 1966, Vol.

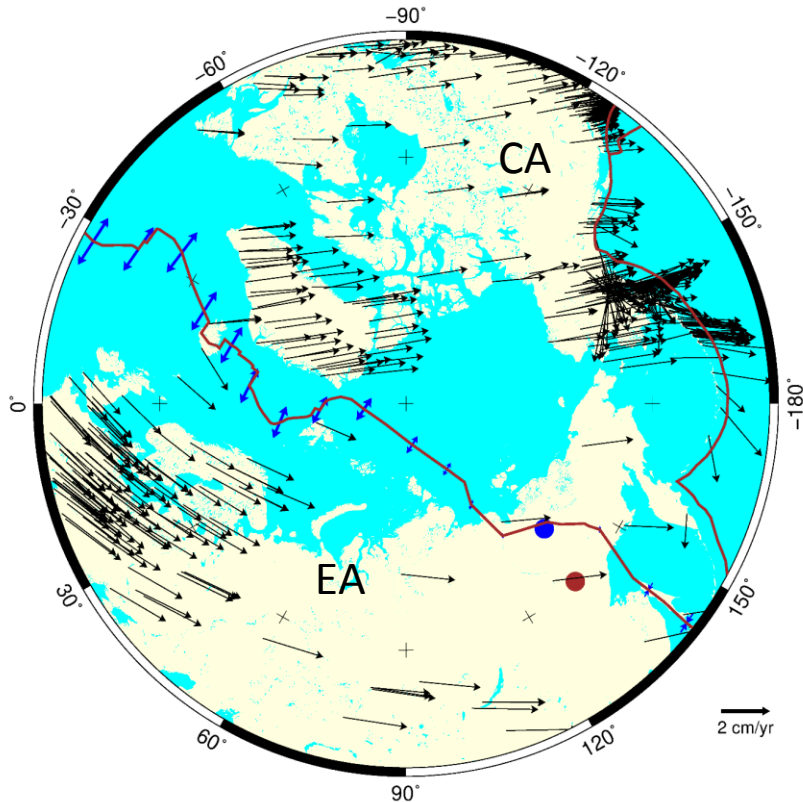
154, Issue 3753,  
pp. 1164-1171.

Lynn R. Sykes.

*Journal of  
Geophysical  
Research*. 1967,  
Vol. 72, No. 8, pp.  
2131-2153.



# Арктика: спутниковая геодезия



Кинематика плиты:

$$\bar{V} = \bar{\Omega} \times \bar{R}$$

$\bar{\Omega}$  – вектор Эйлера

$\bar{V}$  – скорость,

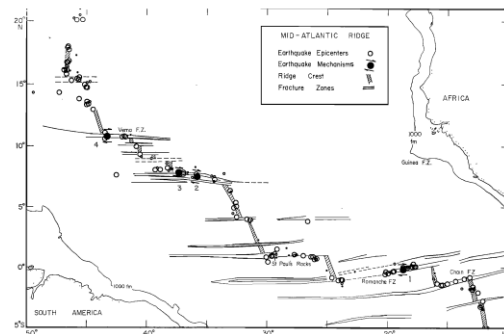
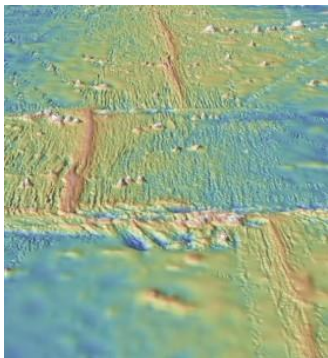
$\bar{R}$  – радиус-вектор

Полюс взаимного вращения:

$$\left. \begin{aligned} \Omega_1 \times \bar{R}_{i1} &= \bar{V}_{i1} \\ \Omega_2 \times \bar{R}_{j2} &= \bar{V}_{j2} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \bar{\Omega}_{1,2} = \bar{\Omega}_1 - \bar{\Omega}_2$$

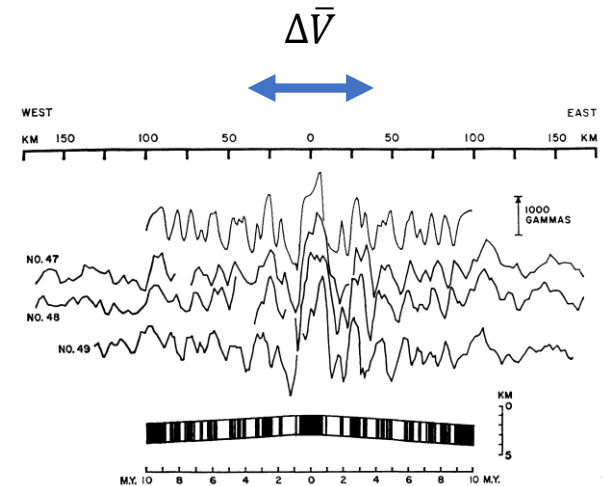
Скорость спрединга:

$$\Delta \bar{V} = \bar{\Omega}_{1,2} \times \bar{R}$$

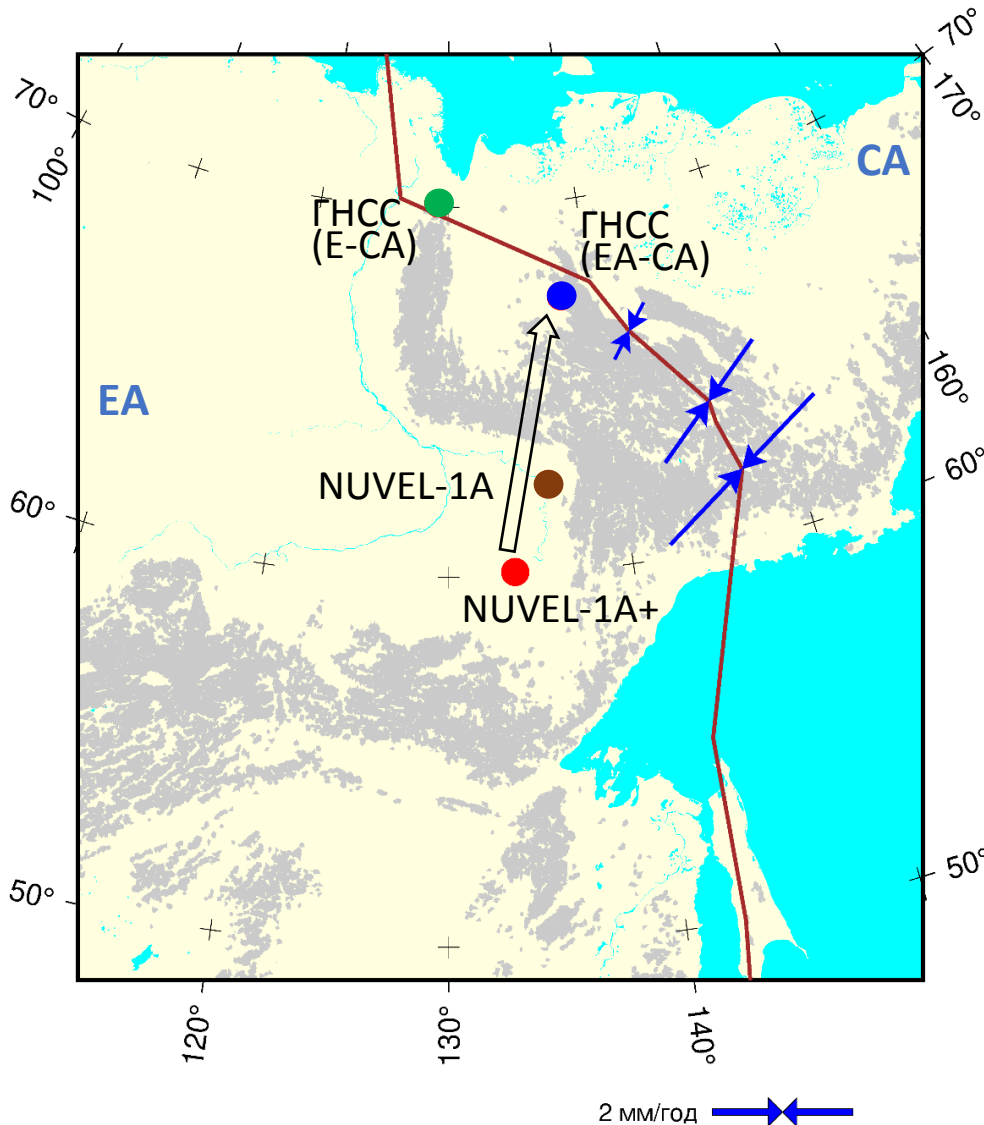


*W. C. Pitman, III and J. R. Heirtzler. Science. 1966, Vol. 154, Issue 3753, pp. 1164-1171.*

*Lynn R. Sykes. Journal of Geophysical Research. 1967, Vol. 72, No. 8, pp. 2131-2153.*



# Относительные движения смежных плит: Евразийская (ЕА) и Североамериканская (СА)



Положение полюса мгновенного вращения (Эйлера):

● ГНСС (Е-СА) – по станциям ГНСС в Европе и Северной Америке

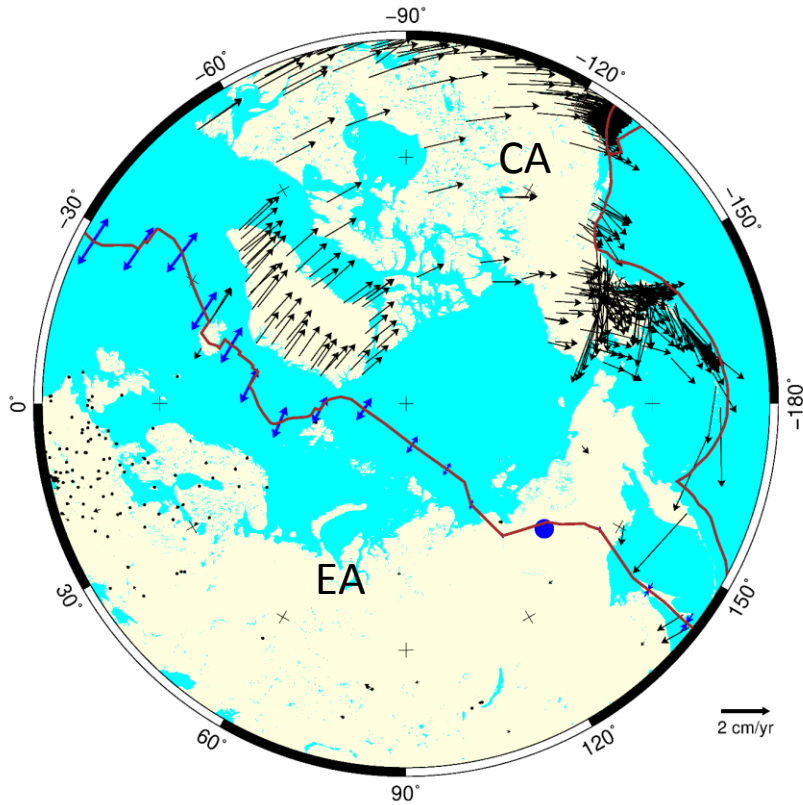
● ГНСС (ЕА-СА) – по станциям ГНСС в Евразии и Северной Америке

*Kogan M.G., Steblov G.M. Current global plate kinematics from GPS (1995-2007) with the plate-consistent reference frame // Journal of Geophysical Research. 2008. Т. 113. № 4.*

● NUVEL-1A – по ориентации трансформных разломов и морским магнитным аномалиям

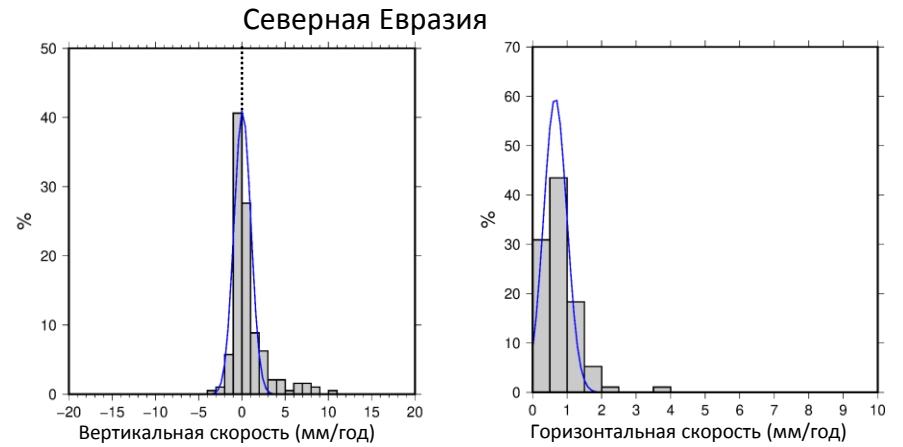
● NUVEL-1A+ – по уточненным морским магнитным аномалиям

# Евразия: ГНСС



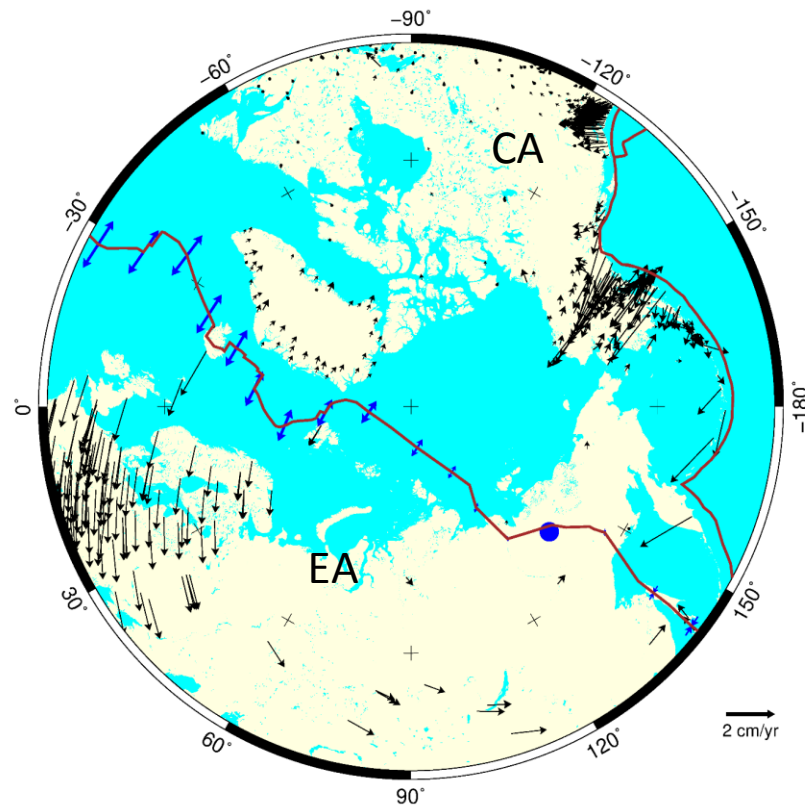
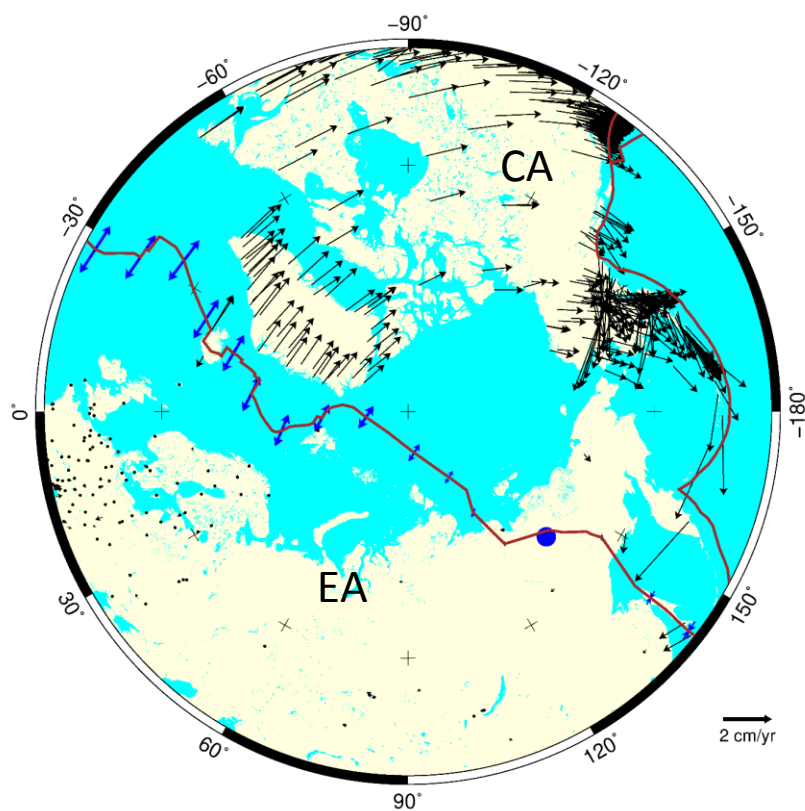
Стабильные платформы:

$$|\bar{V}_i - \Omega \times \bar{R}_i| \leq \delta, \quad \delta \approx 1 \text{ мм/год}$$





# Относительные движения смежных плит: Евразийская (ЕА) и Североамериканская (СА)

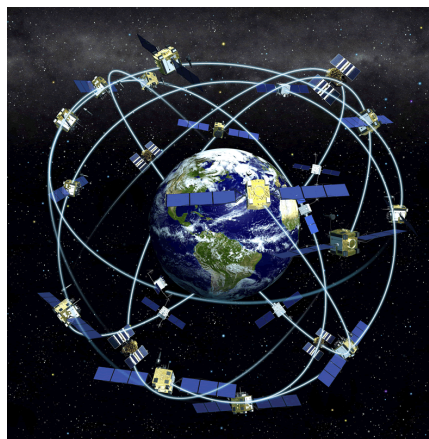


# Космическая геодезия

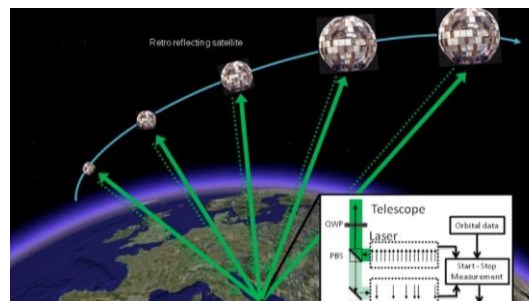
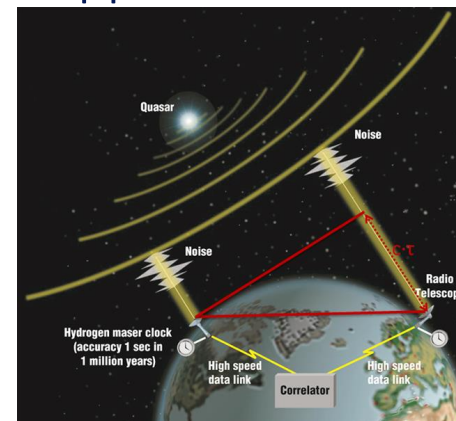
## Координатные методы:

- Глобальная навигационная спутниковая система (ГНСС)
- Радиоинтерферометрия со сверхдлинной базой (РСДБ/VLBI)
- Квантово-оптическая система (КОС/SLR)
- Интегрированная система орбитальных и навигационных определений (DORIS)

ГНСС



РСДБ

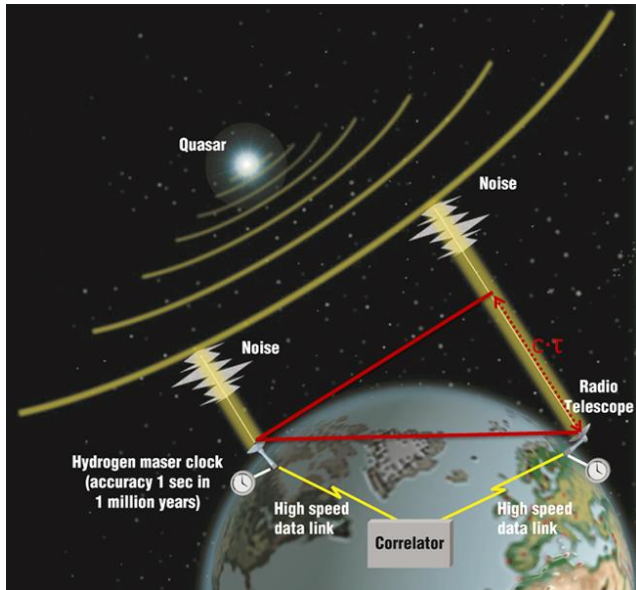


КОС



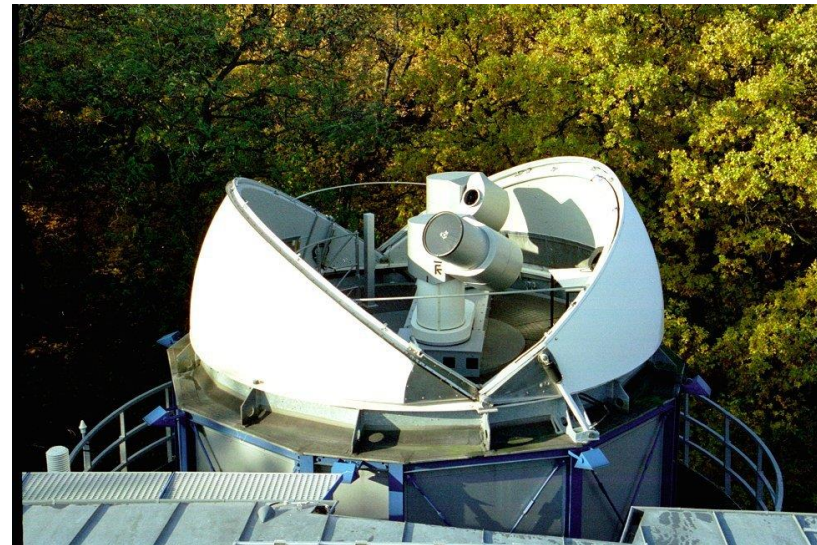
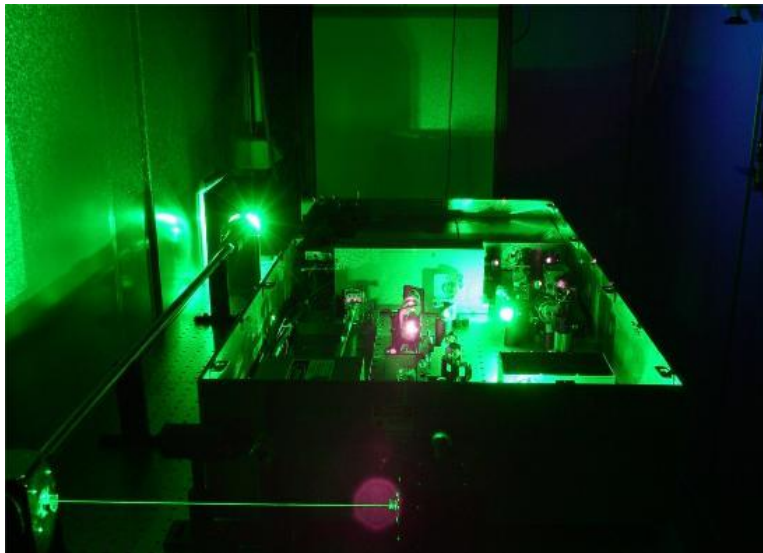
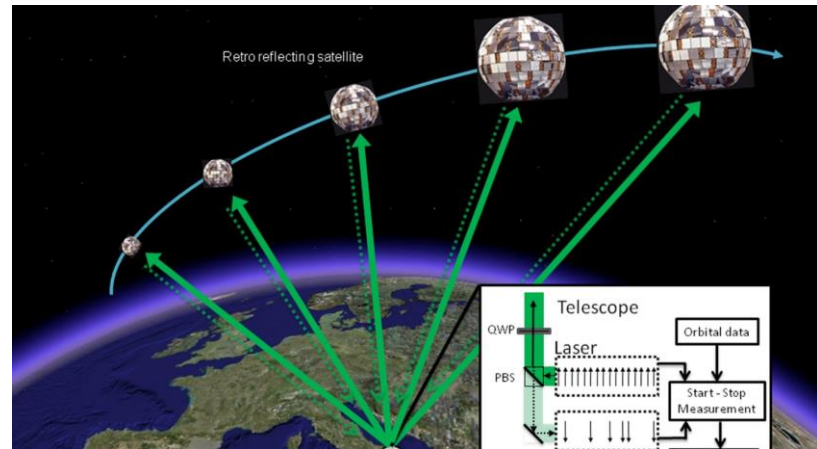
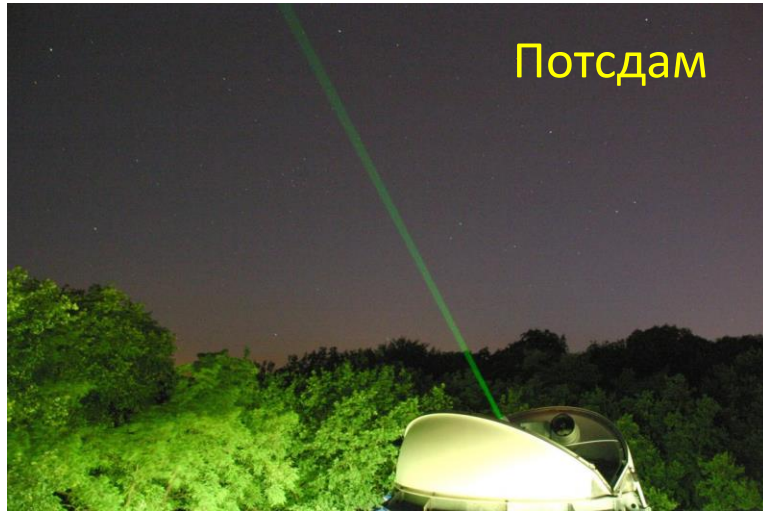
DORIS

# Космическая геодезия: РСДБ





# Космическая геодезия: КОС

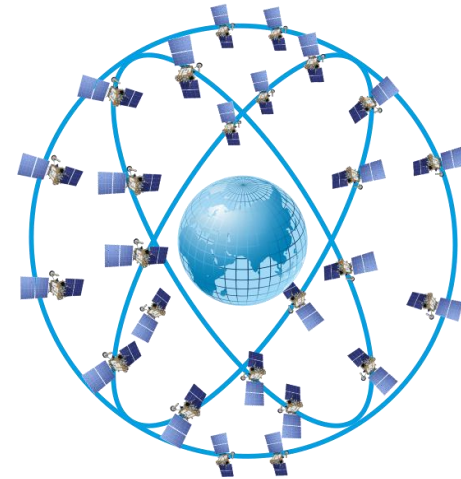
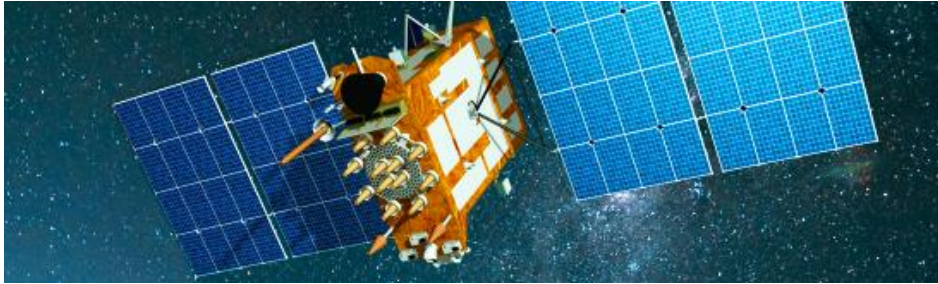




# Космическая геодезия: DORIS

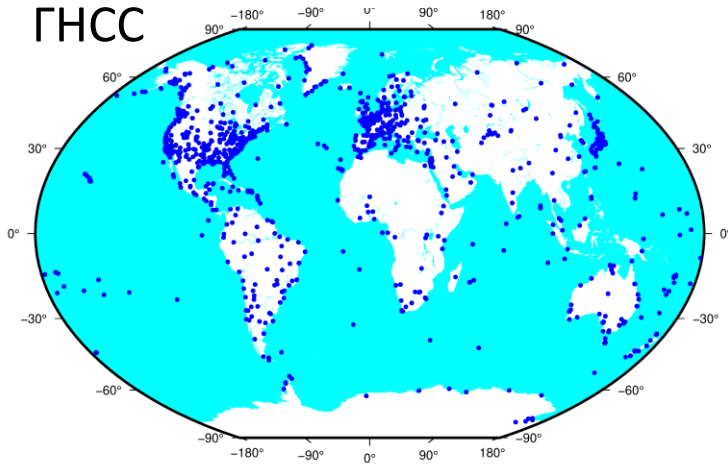


# Космическая геодезия: ГНСС

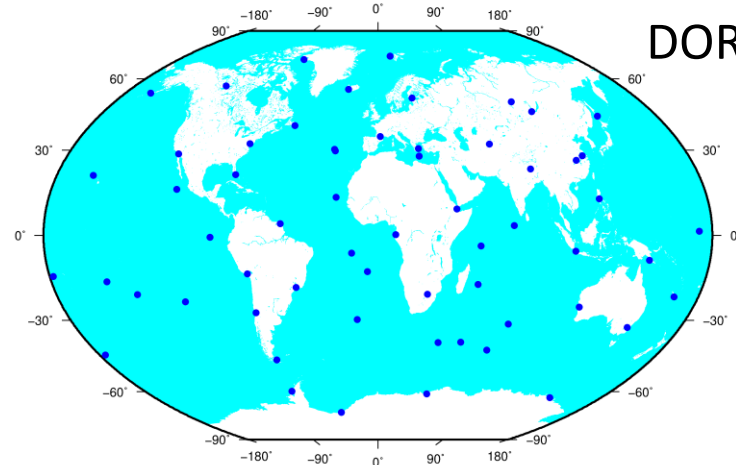


# Космическая геодезия: наземные сети

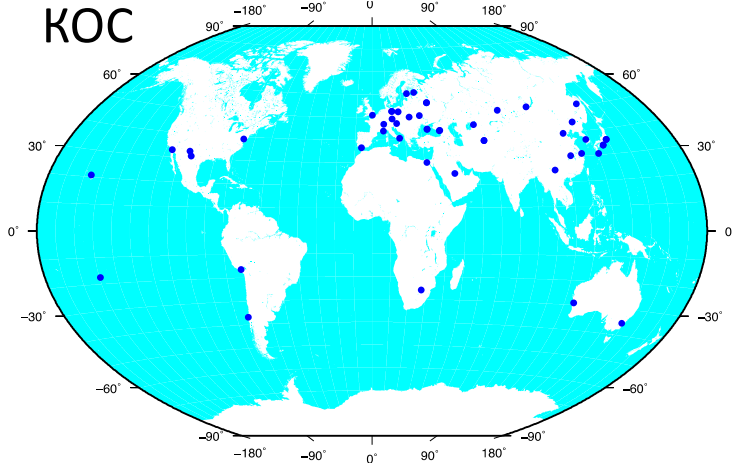
ГНСС



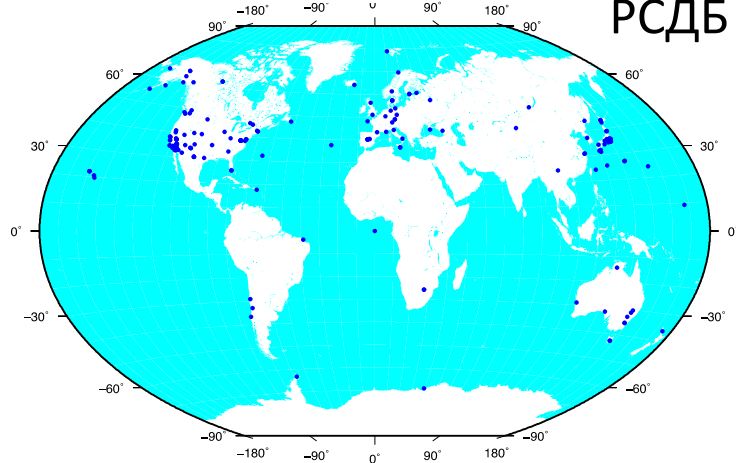
DORIS



КОС

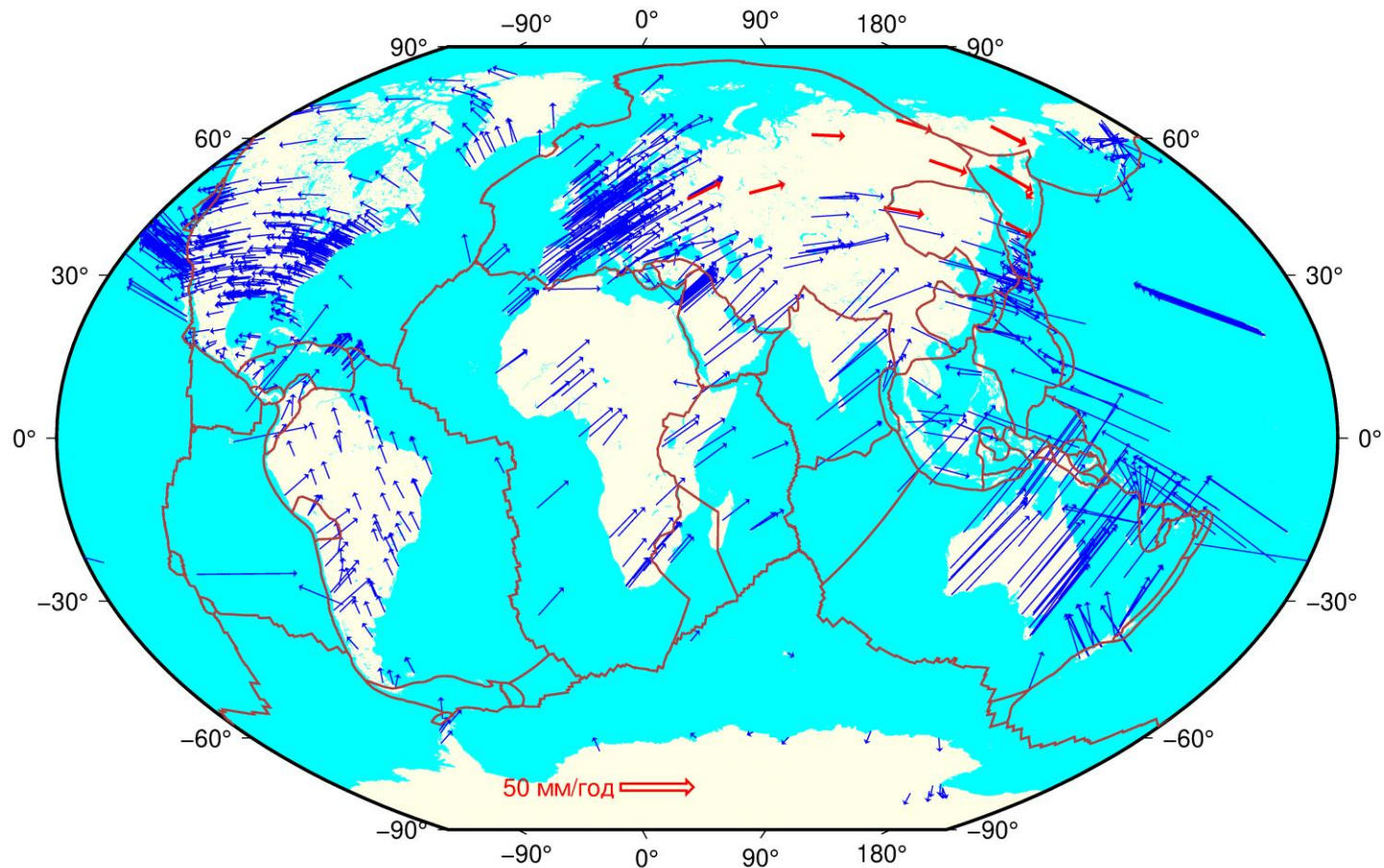


РСДБ





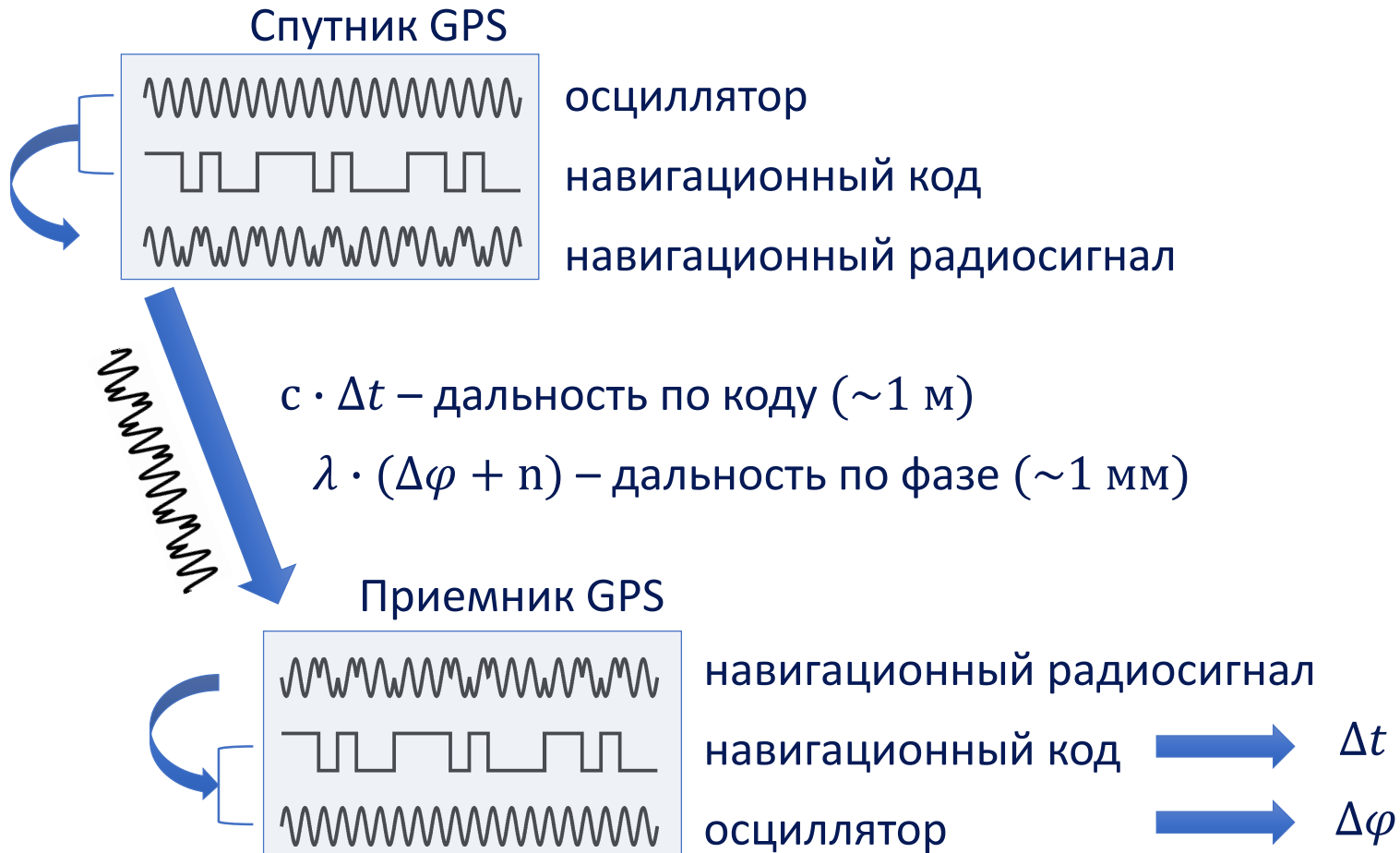
# Космическая геодезия: современные движения



Геоцентрическая безмоментная система отсчета



# Спутниковая навигация и геодезия



# Спутниковая геодезия: ГНСС

## Искажающие факторы:

- Задержки радиосигнала в ионизированной и нейтральной части атмосферы
- Погрешности орбитальной эфемеридной информации
- Вариации параметров вращения Земли
- Рассогласование временной шкалы бортовой и наземной аппаратуры
- Целочисленная неопределенность фазовых измерений
- Многолучевой прием сигнала
- Приливные смещения земной поверхности

## Коррекция ошибок:

- Моделирование искажающих факторов с известными физическими свойствами, совместной уравнивание параметров искажений с определяемыми координатами
- Фильтрация пространственно-коррелированных помех с помощью дифференциальной коррекции (переход от абсолютных определений к относительным)
- Сглаживание несмещенных возмущений путем осреднения во временной области

# Наблюдательные пункты опорной сети ГНСС по Северной Евразии

Станции GPS/ГЛОНАСС:

регистрирующая  
аппаратура



Станции GPS/ГЛОНАСС: антенны



mobn

Обнинск



artu

Арти



yakt

Якутск



mag0

Магадан



petp

Петропавловск-Камчатский



yssk

Южно-Сахалинск



nril

Норильск



tixi

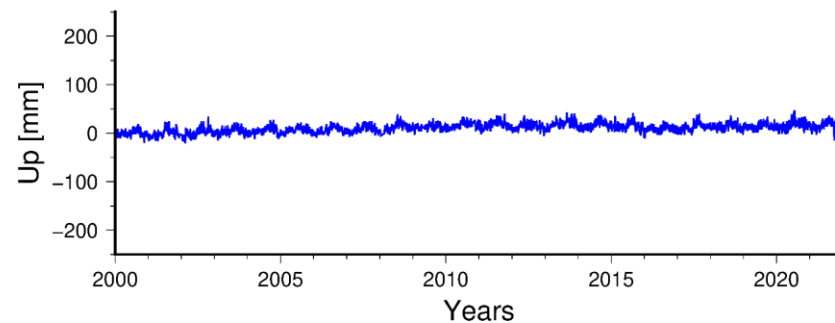
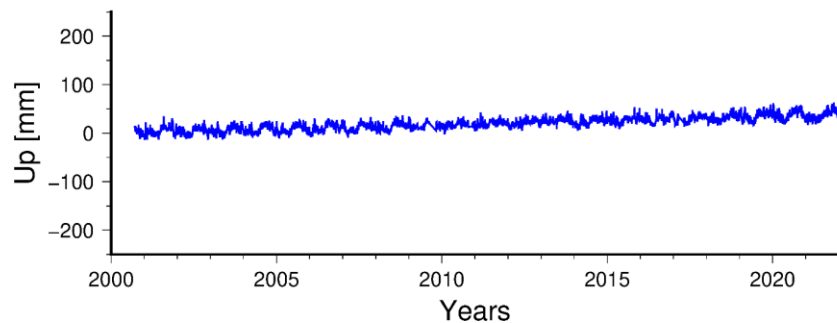
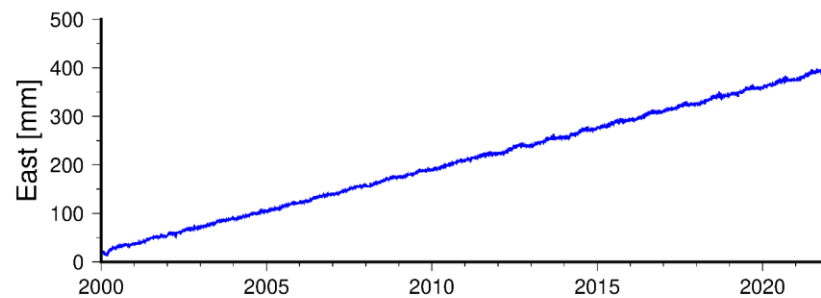
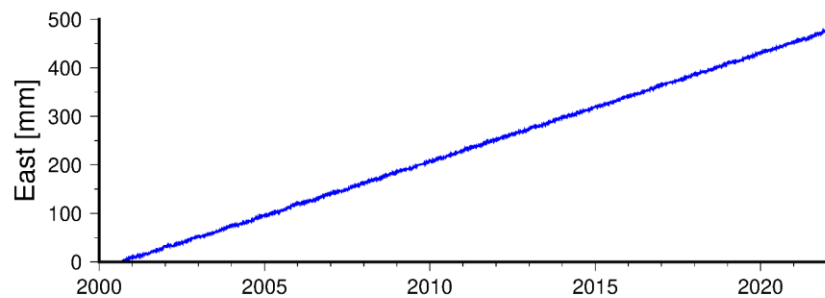
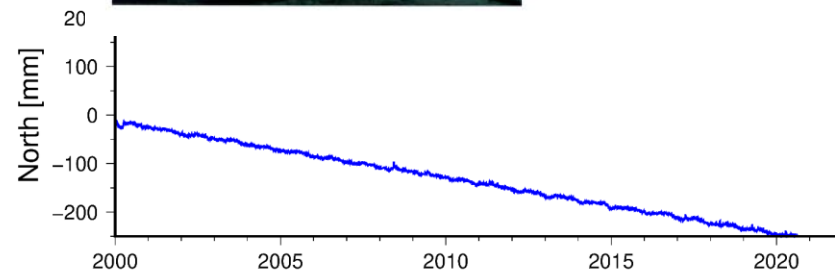
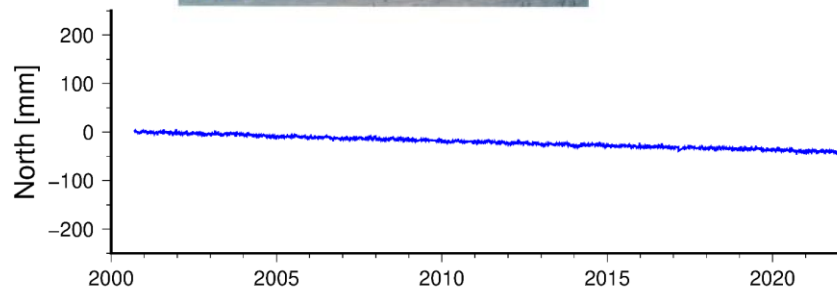
Тикси



bili

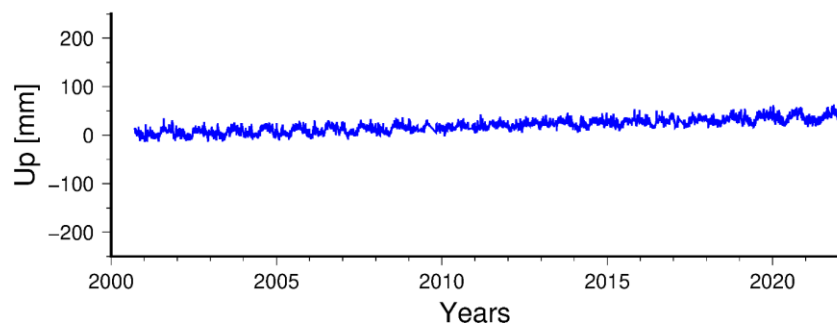
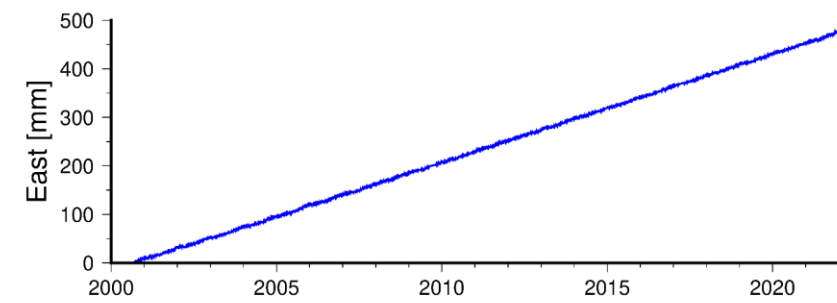
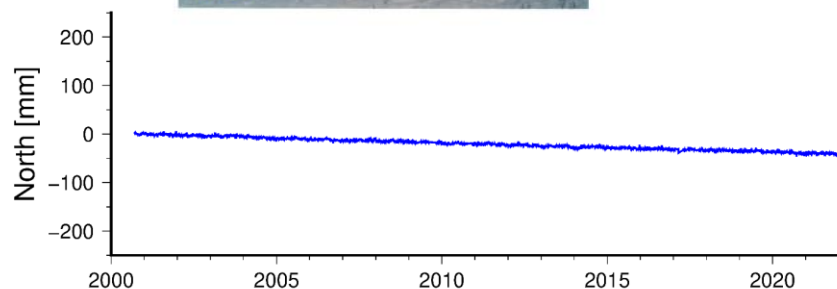
Билибино

# Спутниковая геодезия, ГНСС

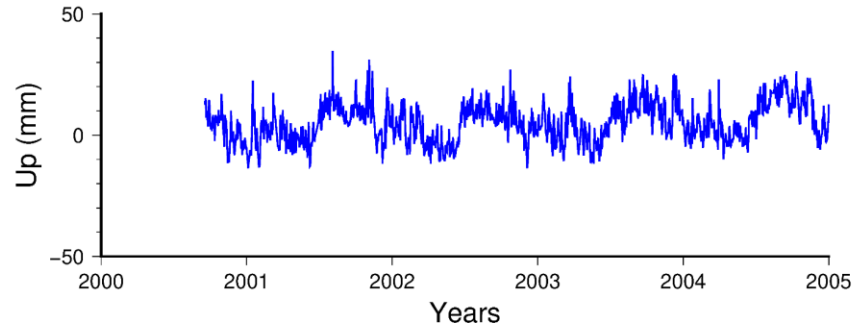
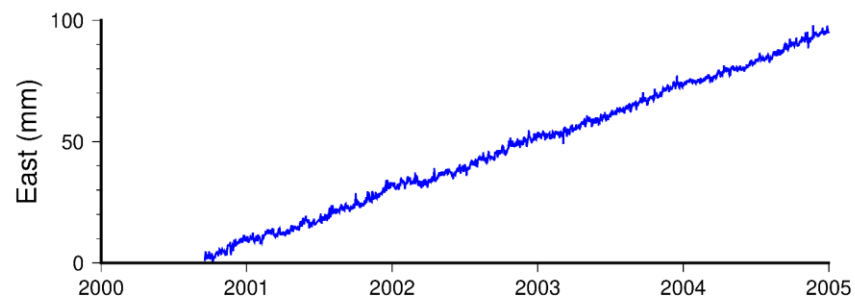
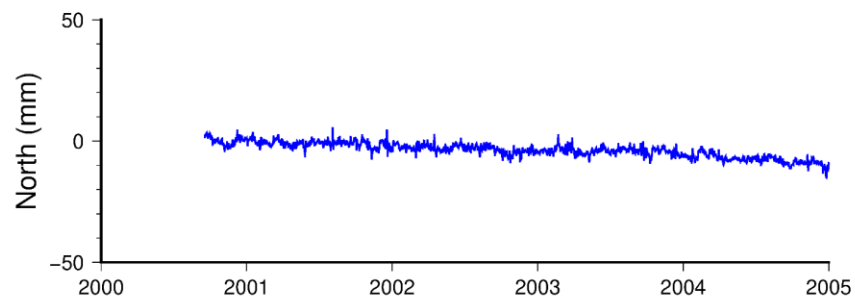




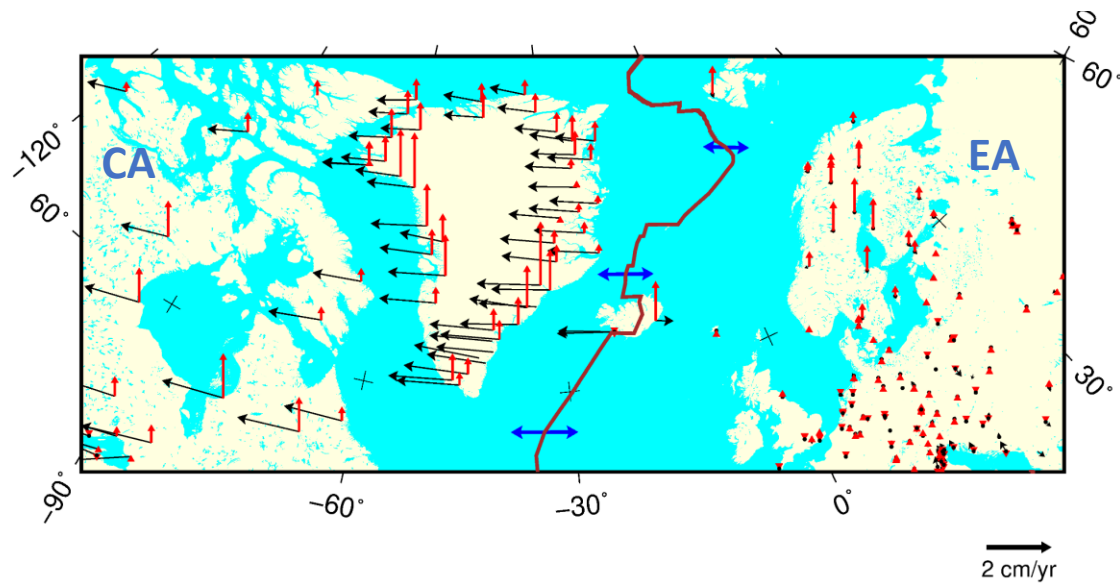
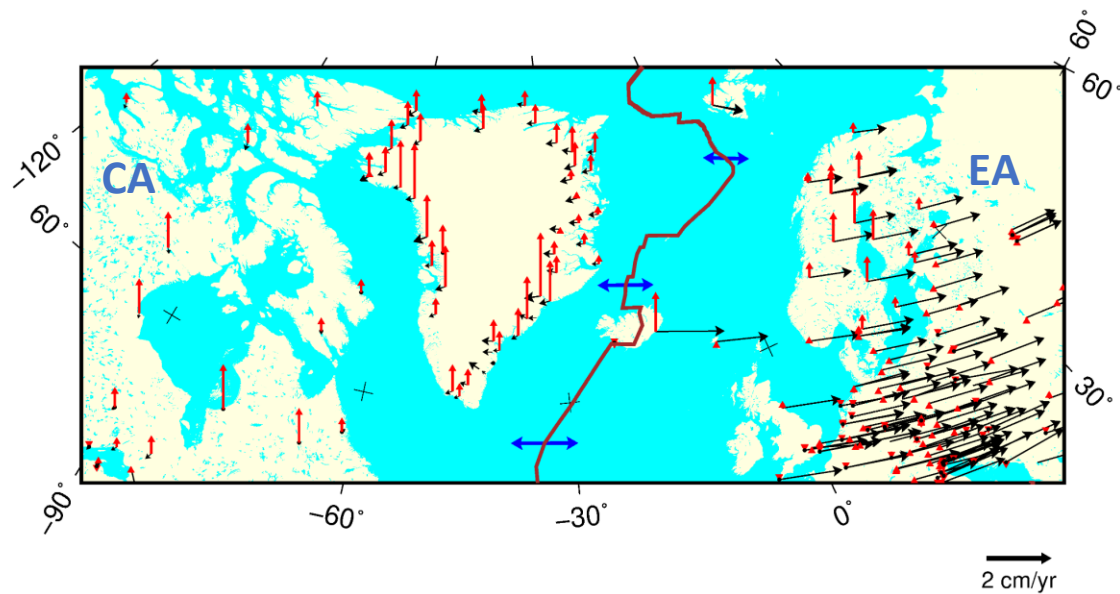
# Спутниковая геодезия, ГНСС



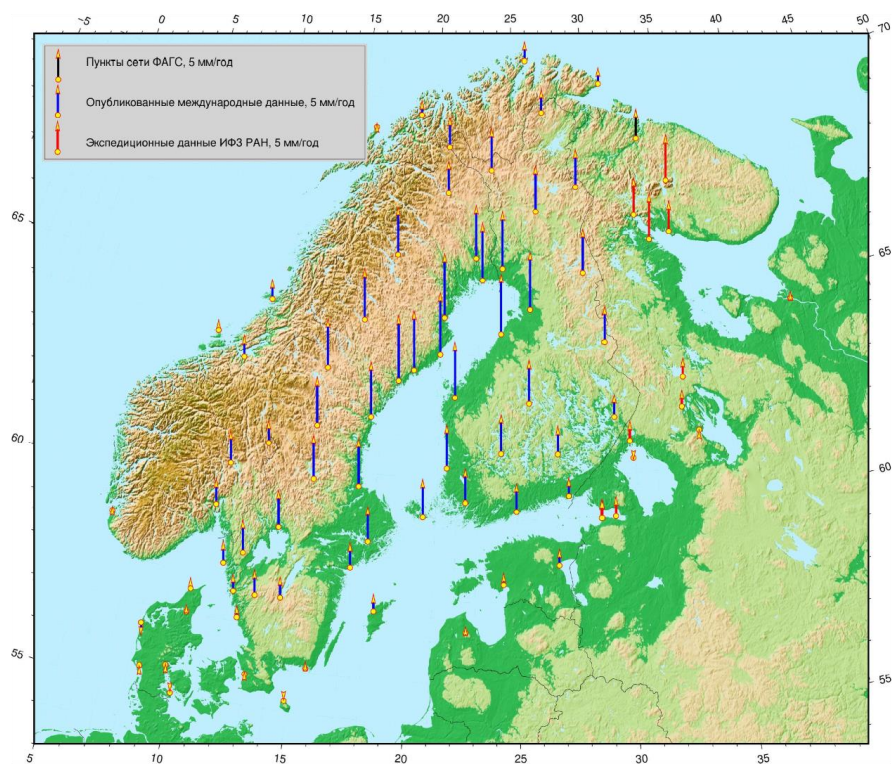
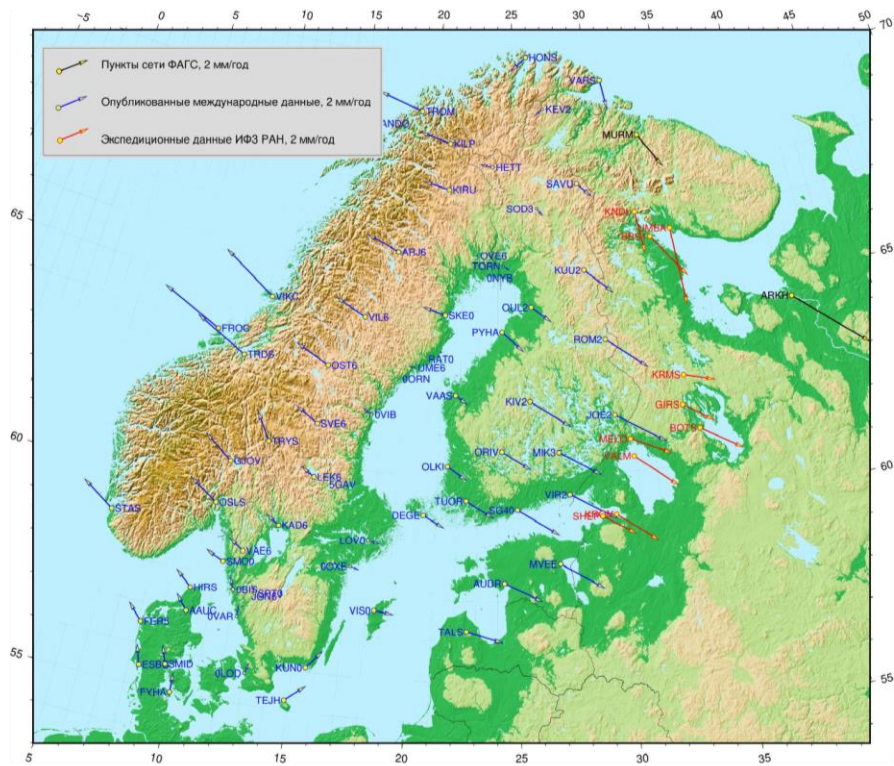
NRIL



# Относительные движения смежных плит: Евразийская (ЕА) и Североамериканская (СА)

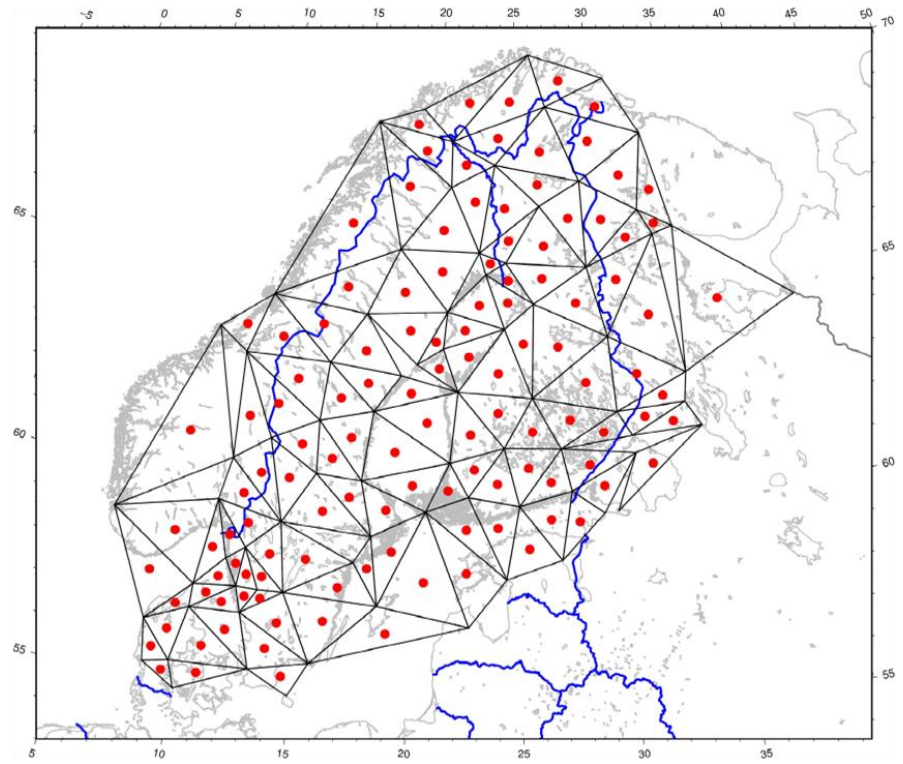
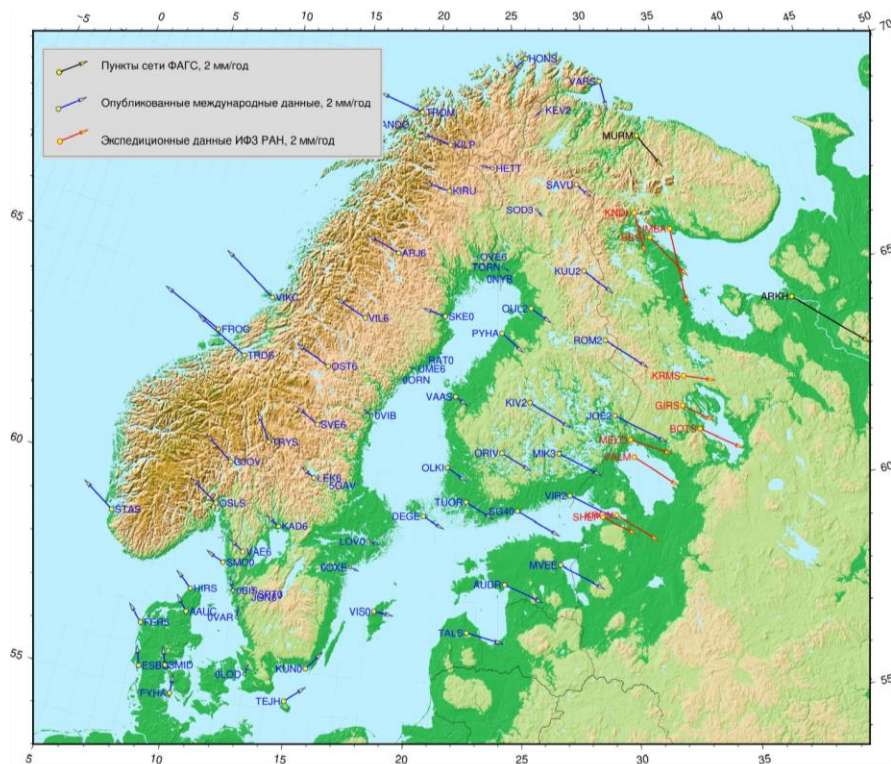


# Фенноскандия: постледниковая изостатическая компенсация





# Фенноскандия: постледниковая изостатическая компенсация

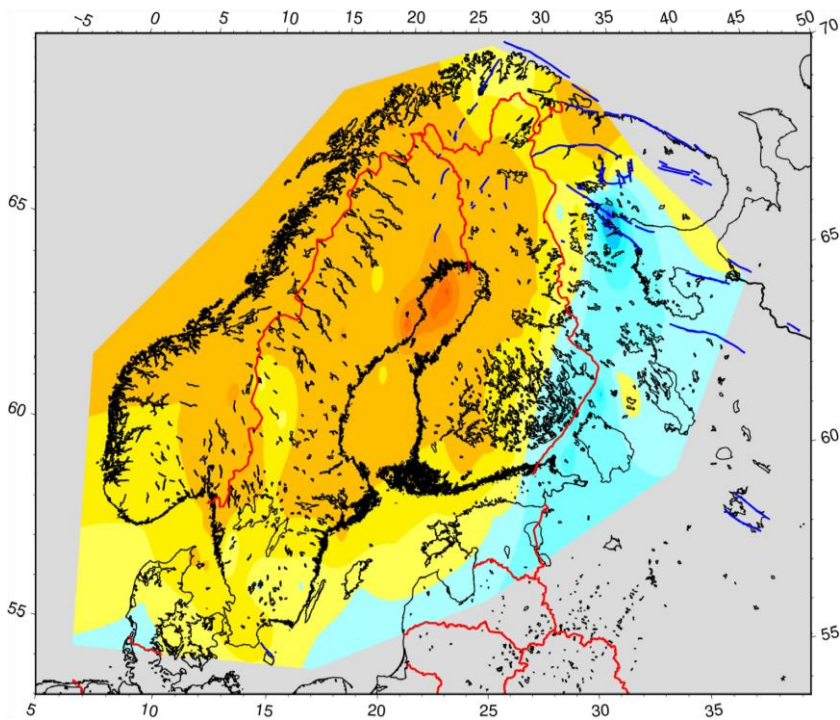


$$\begin{bmatrix} V_E \\ V_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{EE} & \varepsilon_{EN} - \Omega \\ \varepsilon_{EN} - \Omega & \varepsilon_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} E_0 \\ N_0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} t_E \\ t_N \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & -N_1 & E_1 & N_1 & 0 \\ 0 & 1 & E_1 & 0 & E_1 & N_1 \\ 1 & 0 & -N_2 & E_2 & N_2 & 0 \\ 0 & 1 & E_2 & 0 & E_2 & N_2 \\ 1 & 0 & -N_3 & E_3 & N_3 & 0 \\ 0 & 1 & E_3 & 0 & E_3 & N_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} t_E \\ t_N \\ \Omega \\ \varepsilon_{EE} \\ \varepsilon_{EN} \\ \varepsilon_{NN} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{E1} \\ V_{N1} \\ V_{E2} \\ V_{N2} \\ V_{E3} \\ V_{N3} \end{bmatrix} \quad \rightarrow \quad \dot{\delta} = \varepsilon_{EE} + \varepsilon_{NN}$$

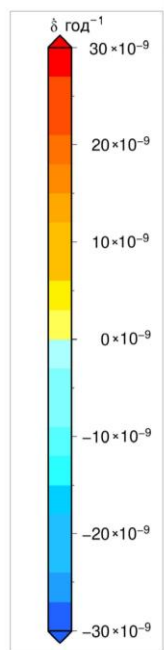
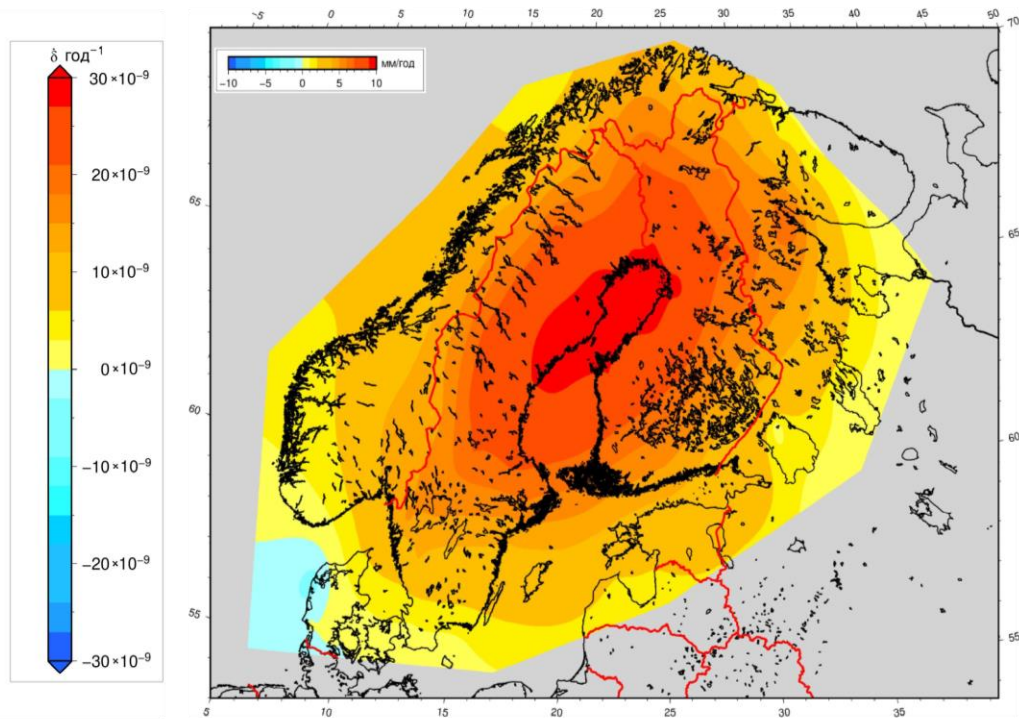


# Фенноскандия: постледниковая изостатическая компенсация

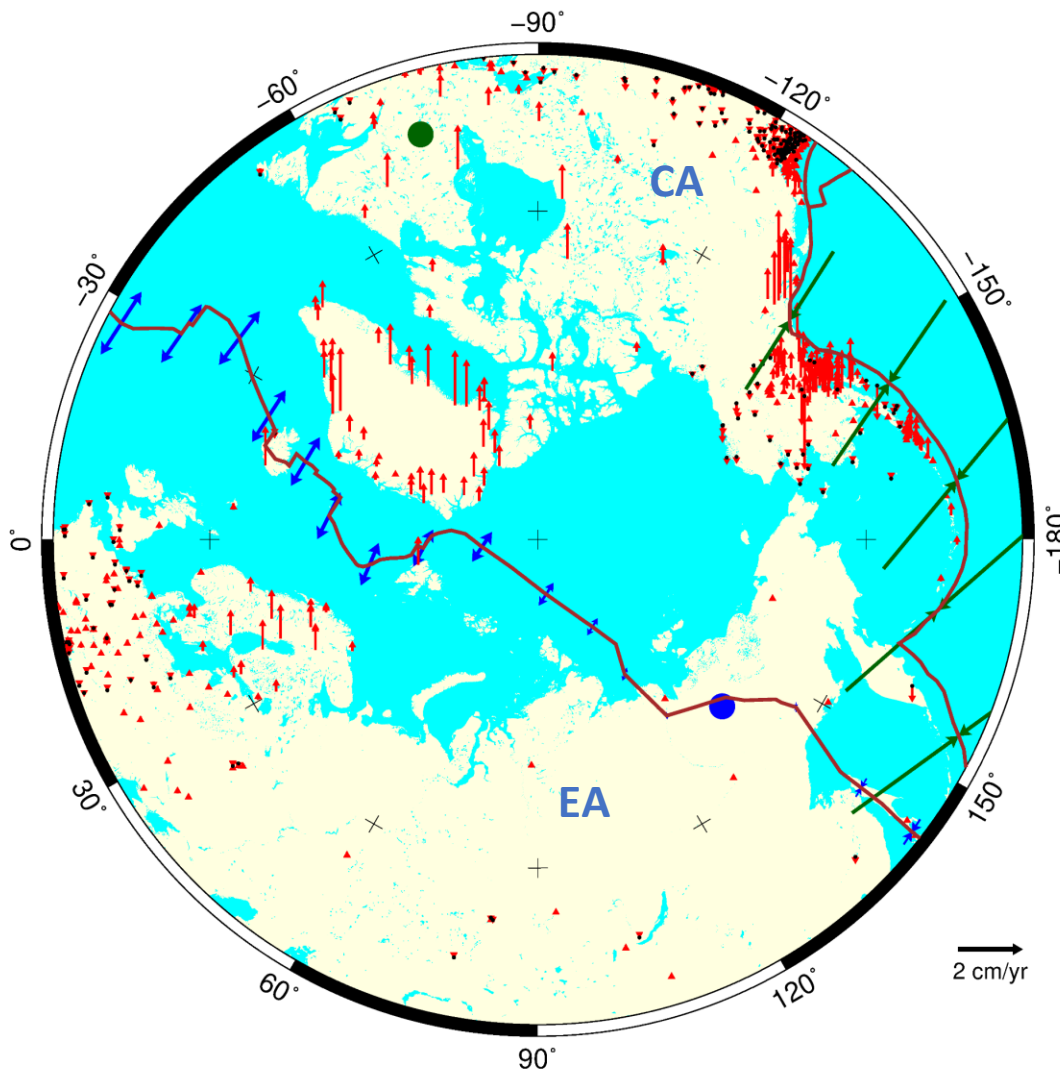
## Горизонтальная дилатация



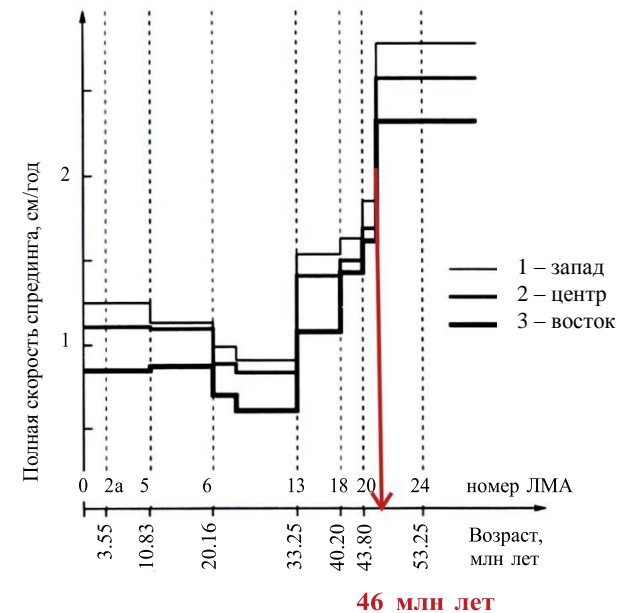
## Вертикальное поднятие



# Арктика: современная геодинамика



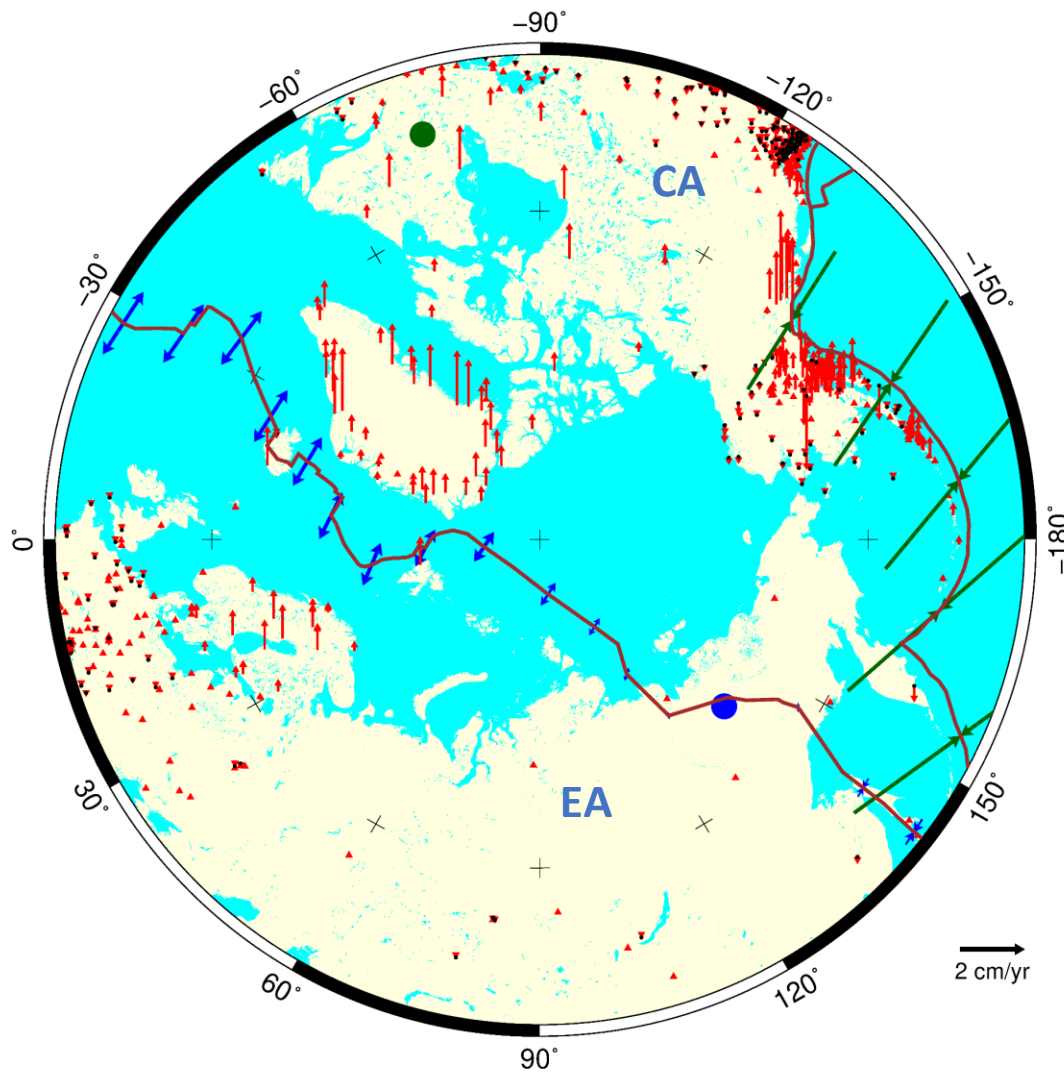
Средняя полная скорость спрединга Евразийского бассейна



Глебовский В.Ю., Каминский В.Д., Минаков А.Н., Меркурьев С.А., Чилдерс В.А., Брозина Д.М. ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЕВРАЗИЙСКОГО БАСЕЙНА СЕВЕРНОГО ЛЕДОВИТОГО ОКЕАНА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОИСТОРИЧЕСКОГО АНАЛИЗА АНОМАЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ // ГЕОТЕКТОНИКА. 2006. №. 2006, №4, с. 21–42.

М.В. Кононов, Л.И. Лобковский. ВЛИЯНИЕ ВЕРХНЕМАНТИЙНОЙ КОНВЕКТИВНОЙ ЯЧЕЙКИ И СВЯЗАННОЙ С НЕЙ СУБДУКЦИИ ТИХООКЕАНСКОЙ ПЛИТЫ НА ТЕКТОНИКУ АРКТИКИ В ПОЗДНЕМ МЕЛУ–КАЙНОЗОЕ // ГЕОТЕКТОНИКА, 2019, № 6, с. 27–45.

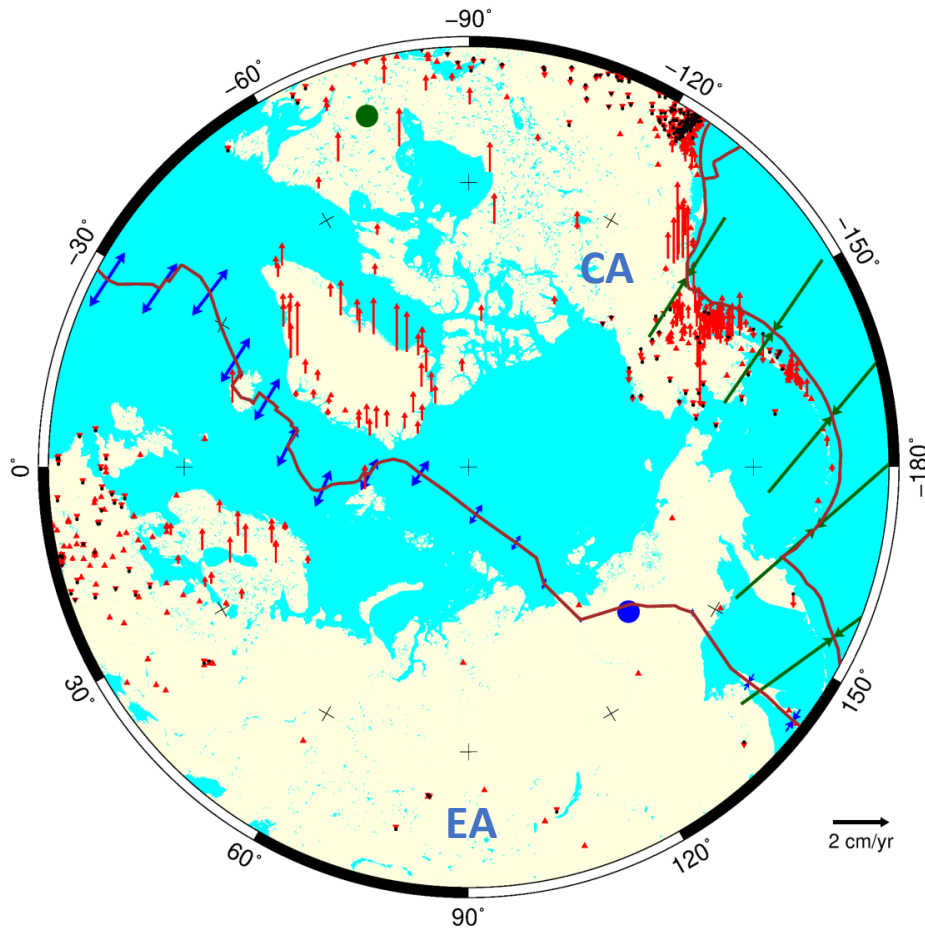
# Арктика: современная геодинамика



*Спасибо за внимание!*

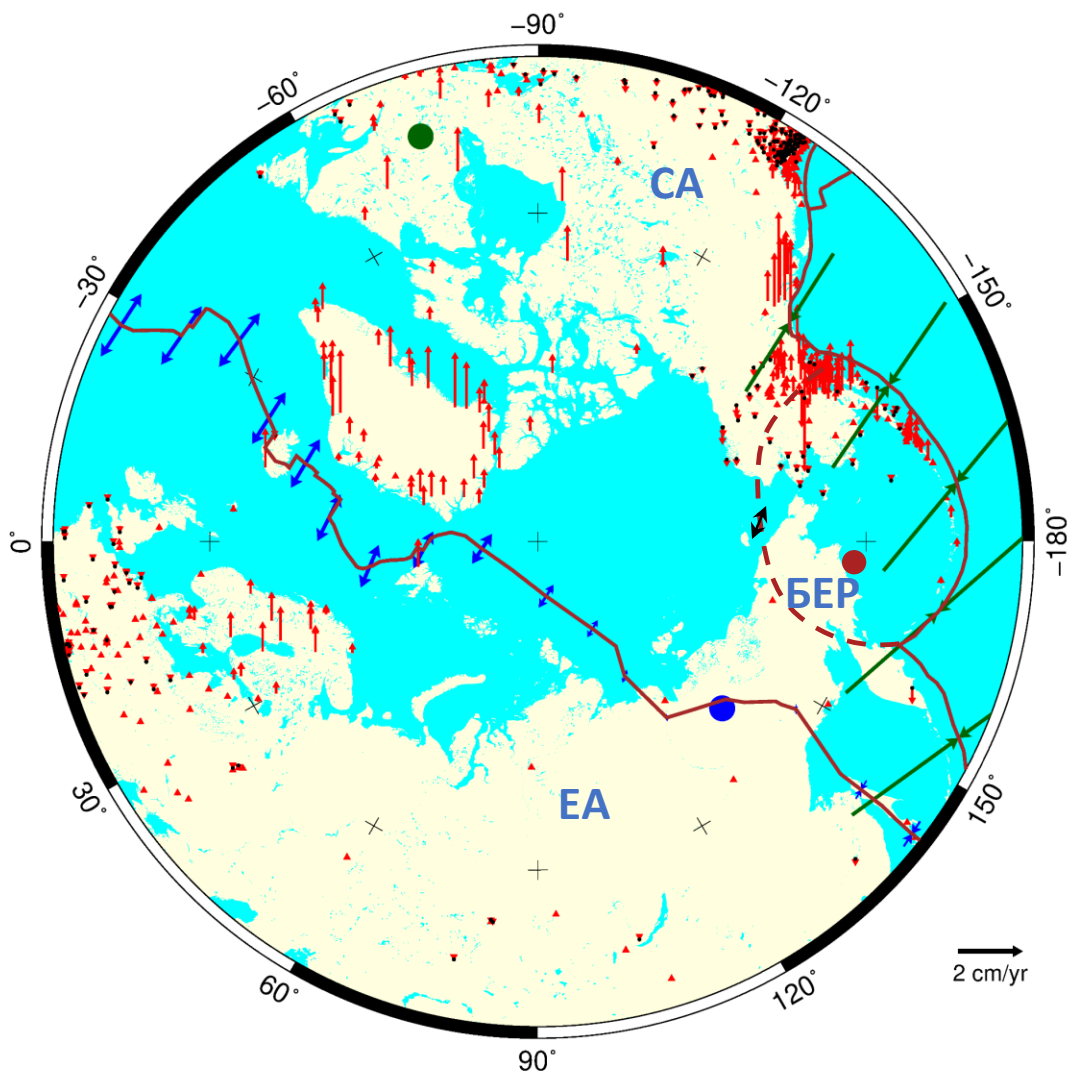


# Геодинамика Арктики по данным спутниковой геодезии

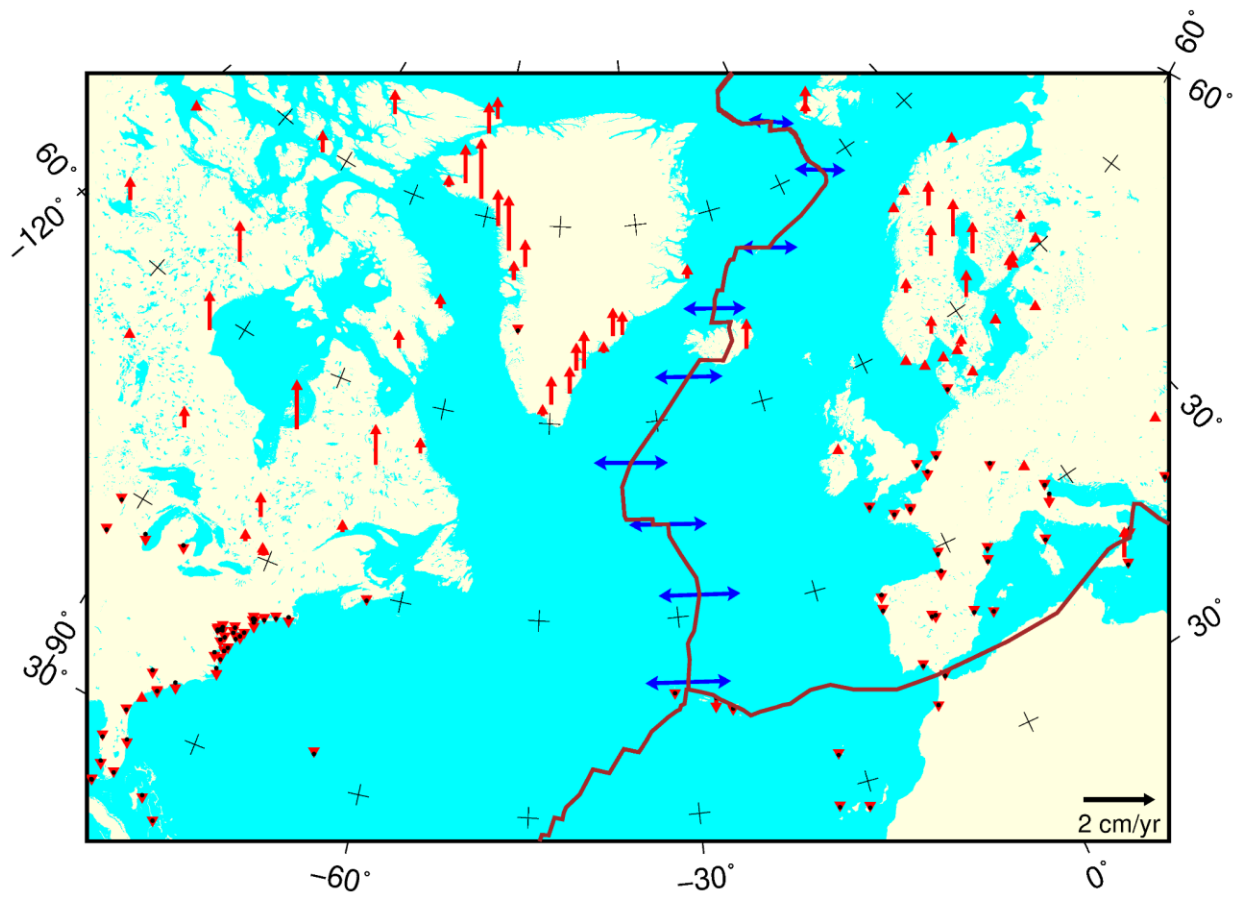


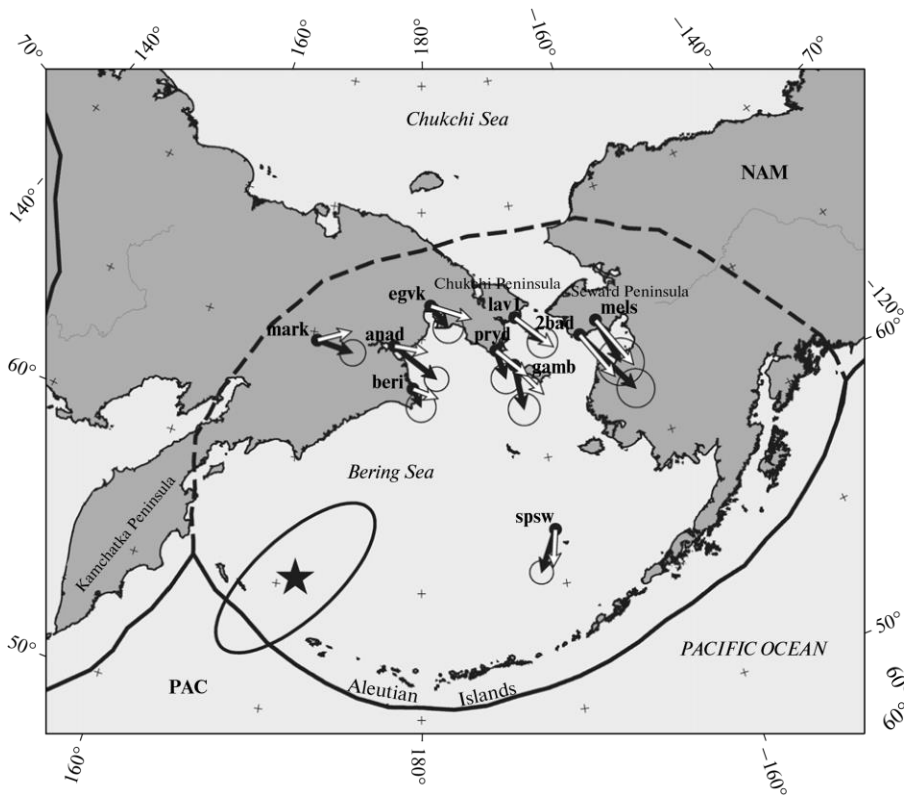
- Спрединг Евразийского бассейна (хребет Гаккеля, Книповича, Мона)
- Постледниковая изостатическая компенсация (Фенноскандия, Гренландия, Канадский щит)

*Спасибо за внимание*







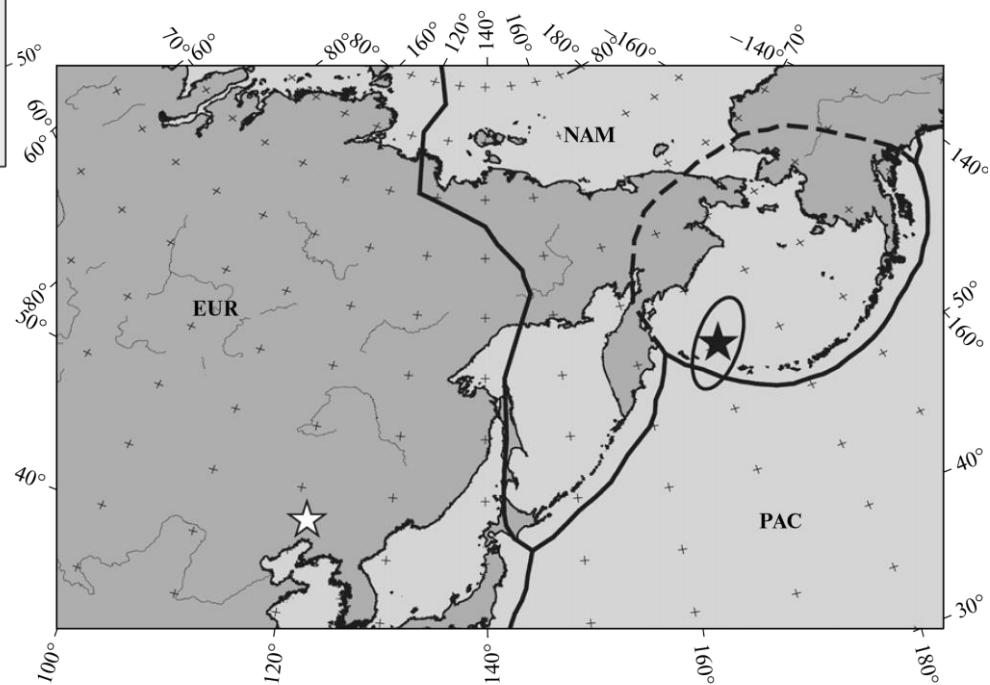


★ Euler pole (BER–NAM)

● Observation sites determining the Bering microplate

← 10 mm per year (model velocities)

← 10 mm per year (GPS velocities)



★ BER-NAM Euler pole, this study

☆ BERNAM Euler pole (Cross and Freymueller, 2008)

# Заключение

- Наблюдаемые современные движения:
  - Спрединг
  - Постледниковая изостазия
- Совокупность методов:
  - Геологические:
    - Морфоструктурный анализ
    - Палеомагнитные данные
  - Современные:
    - Сейсмичность
    - ГНСС

## **Стеблов Григорий Михайлович**

Профессор РАН, доктор физико-математических наук  
Заместитель директора по научной работе Института теории прогноза  
землетрясений и математической геофизики РАН

steblov@mitp.ru