

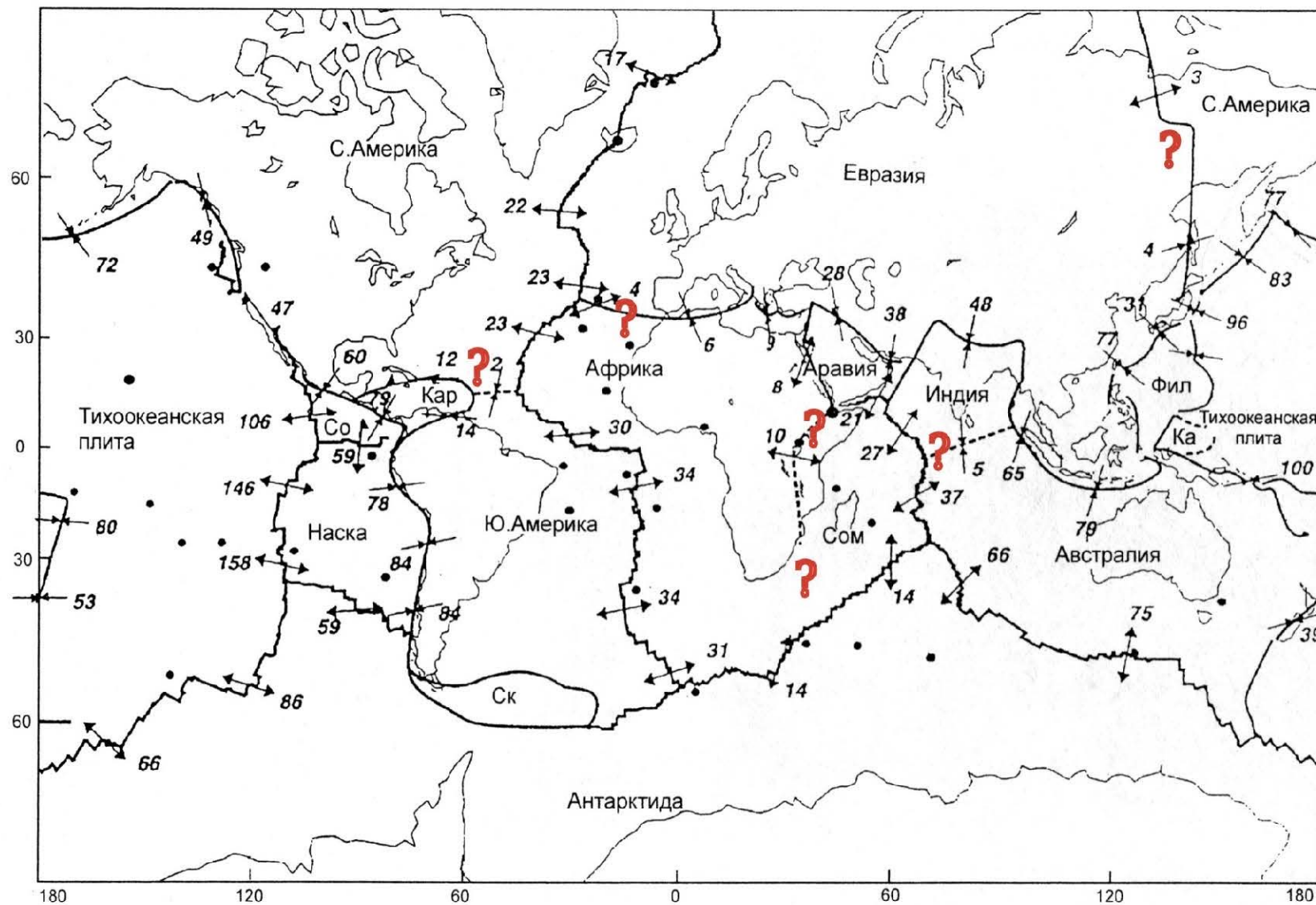
Баранов А.А., Лобковский Л.И., Чуваев А.В., Бобров А.М.

**ЧИСЛЕННАЯ МОДЕЛЬ СОВРЕМЕННОЙ ЗЕМЛИ – МОДЕЛИРОВАНИЕ
ПЛИТНОЙ ТЕКТониКИ для СЕВЕРНОЙ ЕВРАЗИИ**

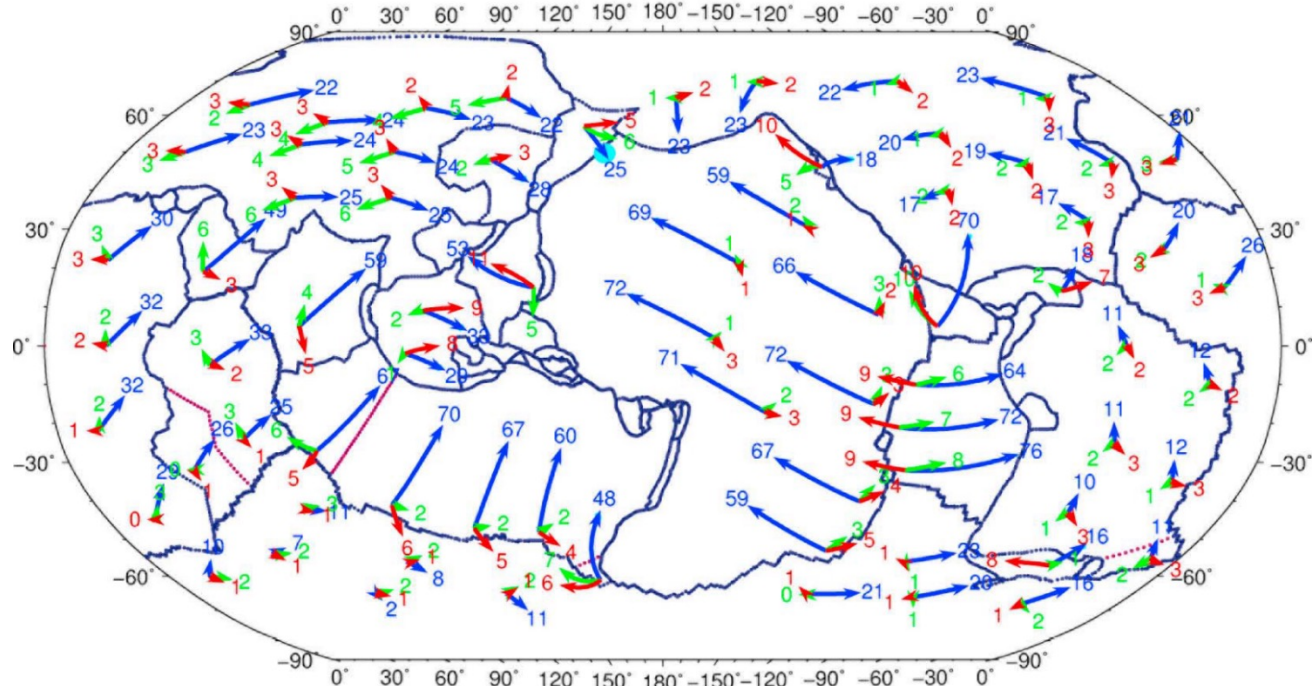
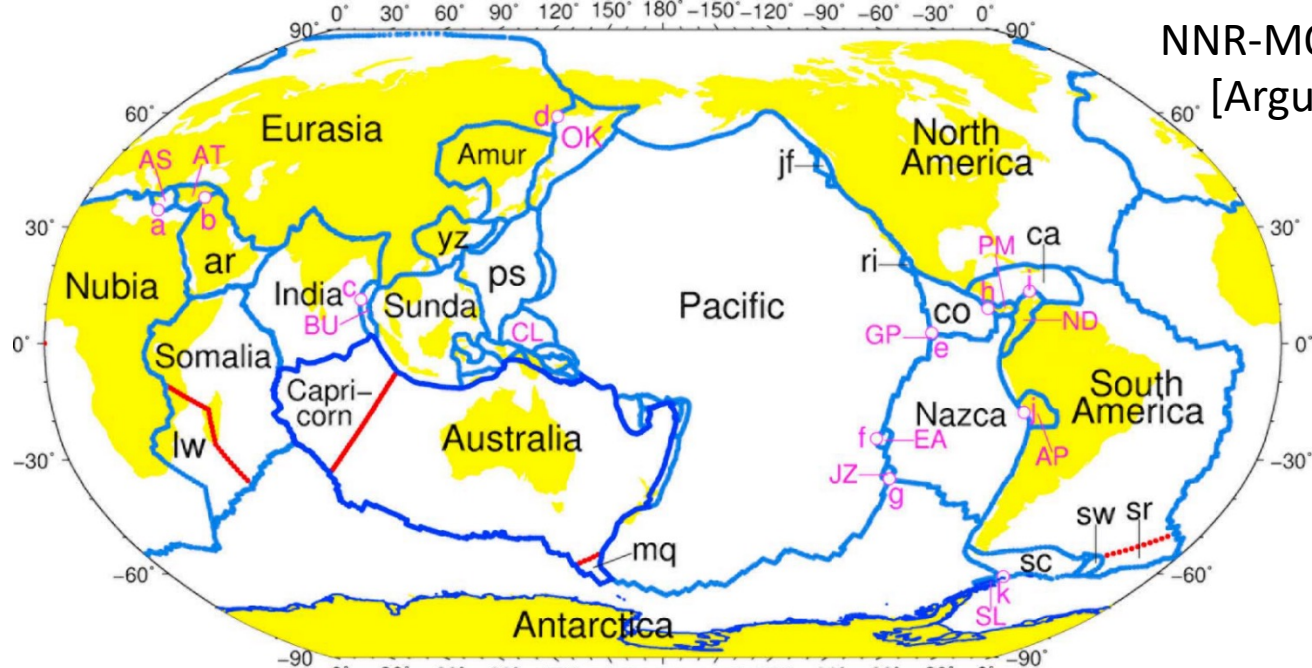
**СОВРЕМЕННЫЕ МЕТОДЫ ОЦЕНКИ СЕЙСМИЧЕСКОЙ ОПАСНОСТИ
И ПРОГНОЗА ЗЕМЛЕТРЯСЕНИЙ**

22-23 октября 2025 года
ИТПЗ РАН, Москва

Границы литосферных плит



NNR-MORVEL56 model
[Argus et al., 2011]



ТЕКТОНИКА ДЕФОРМИРУЕМЫХ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ И МОДЕЛЬ РЕГИОНАЛЬНОЙ ГЕОДИНАМИКИ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К АРКТИКЕ И СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ АЗИИ

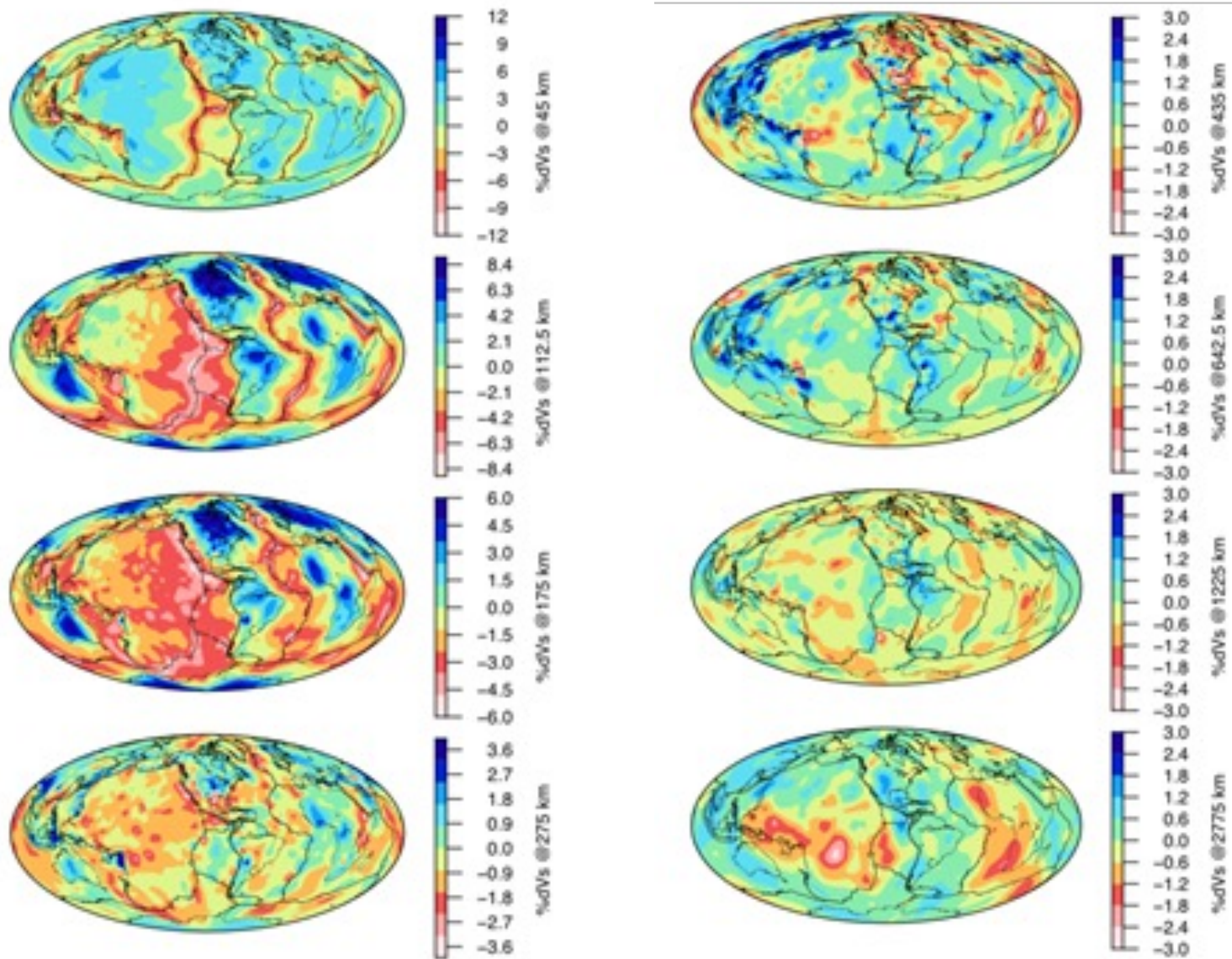
Л.И. Лобковский

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, 117997, Москва, Нахимовский просп., 36, Россия

Обсуждаются трудности и противоречия классической концепции тектоники плит. Проанализированы ее исходные положения (постулаты). Показано, что постулат о твердотельном вращении плит на поверхности Земли (так называемая теорема Эйлера), на котором основаны кинематические построения тектоники плит, далеко не всегда применим, в частности, при анализе меловых реконструкций Северной Атлантики и Арктики. Также не выполняется исходное положение о полной механической обособленности литосферных плит, эквивалентное допущению о замкнутости всех их границ. Предлагается обобщение классической теории тектоники плит, в котором последние рассматриваются как деформируемые тела — тектоника деформируемых литосферных плит. Обосновывается новая региональная геодинамическая модель, описывающая меловую и кайнозойскую эволюцию литосферы Арктики и Северо-Восточной Азии. Модель основывается на представлении о существовании горизонтально протяженной конвективной ячейки в верхней мантии, сопряженной с конвейерным механизмом субдукции тихоокеанской литосферы. В рамках предложенной модели находят свое естественное физическое объяснение такие известные тектономагматические процессы, как отступление островных дуг в сторону океана с образованием задуговых бассейнов, возникновение континентальных рифтовых зон и магматических провинций на значительных (более 1000 км) расстояниях от зон субдукции и т.д.

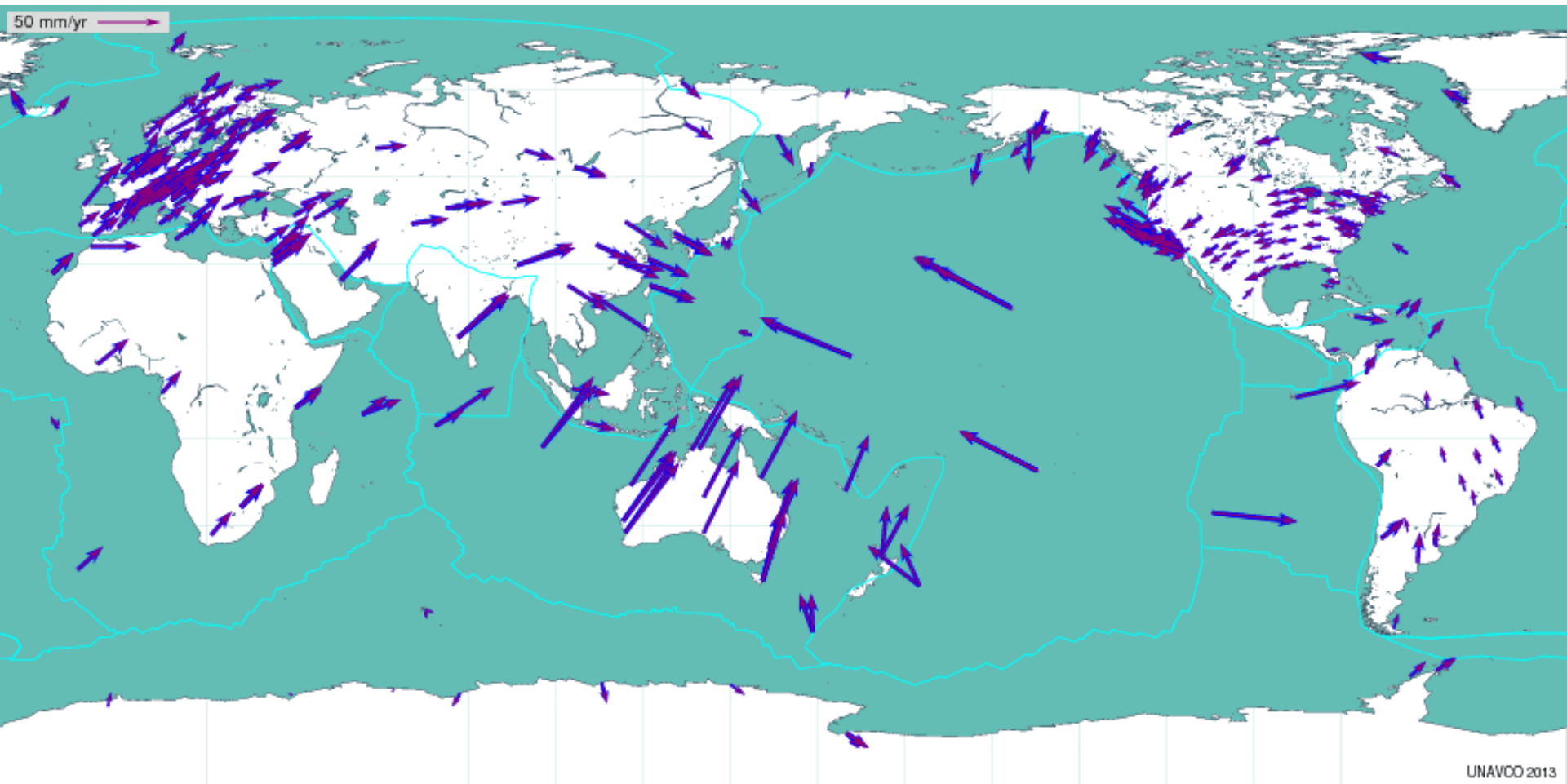
Постулаты тектоники плит, теорема Эйлера, деформируемые плиты, эволюция Арктики и Северо-Восточной Азии в мелу и кайнозое, верхнемантийная конвекция, сопряженная с субдукцией.

Сейсмическая томография Земли- модель SMEAN 2 (первая группа больших данных)



SMEAN 2 представляет собой 58 слоев с шагом по глубине в 50 км до границы ядром [Jackson et al., 2017].

ITRF model
Данные спутниковой геодезии
(вторая группа больших данных)



Синими стрелками показаны скорости из модели ITRF [Altamimi et al., 2017].

Mantle convection

- energy equation governs planetary heat loss
- introduces time-dependence and non-linearity (coupling between velocity and temperature)
- can time reverse advection, but not diffusion

conservation of momentum $\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = -Ra\tilde{T}\delta_{ir} - Ra_C\tilde{C}\delta_{ir}$

constitutive law $\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + 2\eta(\sigma, T, d, H_2O, \varepsilon)\dot{\varepsilon}_{ij}$

conservation of mass $\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0$

conservation of energy $\frac{\partial T}{\partial t} = \underbrace{-v_i \frac{\partial T}{\partial x_i}}_{\text{advection}} + \underbrace{\kappa \frac{\partial^2 T}{\partial x_j \partial x_j}}_{\text{diffusion}} + \underbrace{H}_{\text{heat generation}}$

Мгновенная плотностная модель Земли

Моделирование глобальной мантийной конвекции в рамках гидродинамики сильно вязкой жидкости с переменной вязкостью проводится на основе уравнения Стокса с использованием данных сейсмической томографии, отражающих внутреннее строение Земли. Для расчета мантийной конвекции осуществляется перевод вариаций сейсмических скоростей в температурное поле в два этапа. Сначала вариации сейсмических скоростей в мантии Δv_s пересчитываются в вариации плотности вещества по соотношению: $\Delta \rho = \text{scaling} \times \Delta v_s$. Скейлинг-фактор зависит от глубины, химического состава среды и других факторов [Lee et al., 2011]. Для простоты обычно принимают скейлинг-фактор, ступенчато зависящим от глубины, например, согласно [Megnin, Romanowicz, 2000] значения скейлинга распределяются следующим образом: 0,05 - для литосферы 0-100 км; 0,1 - для верхней мантии 100-660 км; 0,2 - для нижней мантии 660-2500 км; 0,1 - для слоя D'' 2500-2900 км. Полученные вариации плотности переводятся в вариации температур в мантии по формуле теплового расширения $\Delta T = - (1/\alpha) \times (\Delta \rho/\rho)$. При этом коэффициент теплового расширения α меняется с глубиной по зависимости $\alpha = (3-4.44 \times (1-r)) \times 10^{-5}$, где r – безразмерный радиус Земли, от 3×10^{-5} на поверхности Земли до 1×10^{-5} на дне мантии. Далее к вариациям температуры необходимо добавить адиабатическую и среднюю наадиабатическую температуру и таким образом перейти к полной температуре в мантии Земли [Schubert et al., 2001].

Моделирование течений в мантии Земли осуществляется в приближении Буссинеска в трехмерной сферической геометрии.

Для верхней мантии до глубины 660 км размерная вязкость определяется эмпирической формулой: $\eta = 2 \times 10^9 \times \exp(17 \times T_{\text{melting}} / ((\text{Temp} \times 3327) + 273))$, где Temp – безразмерная полная температура от 0 до 1, а T_{melting} температура плавления вещества определяется формулой $T_{\text{melting}} = 2100 + 1.4848 \times \text{depth} - (0.0005 \times \text{depth} \times \text{depth})$ [Paulson et al., 2005; McNamara et al., 2003].

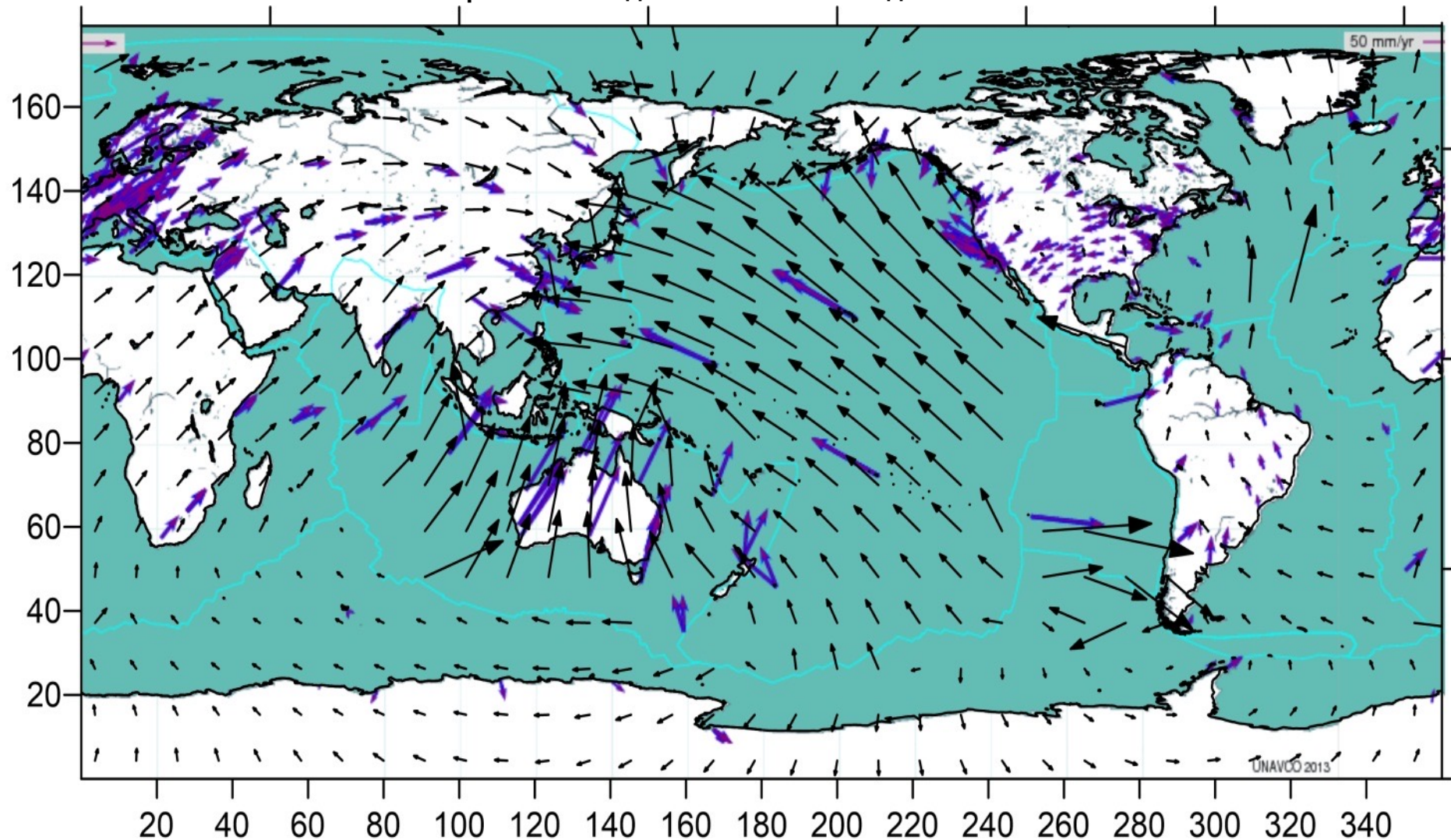
Для нижней мантии глубже 660 км:

$$\eta = 1.2 \times 10^{13} \times (\exp(10 \times T_{\text{melting}} / ((\text{Temp} \times 3327) + 273))),$$

а $T_{\text{melting}} = 2916 + 1.25 \times \text{depth} - (0.000165 \times \text{depth} \times \text{depth})$ где depth – глубина в километрах [Paulson et al., 2005; McNamara et al., 2003].

Число Рэлея в нашей модели равно $Ra = 1.2 \times 10^8$. Скачок плотности на границе 410 км $dr_{410}/r_0 = 0.07$, наклон кривой фазового равновесия $\gamma_{410} = 1.6$ МПа/К, на границе 660 км $dr_{660}/r_0 = 0.09$, а $\gamma_{660} = -1.3$ МПа/К [Fei et al., 2004]. При этих значениях параметров число Рэлея составляет $Ra_{ph410} = dr_{410} g D^3 / (k r n_0) \approx 1.4 \times 10^8$, а $Ra_{ph660} = dr_{660} g D^3 / (k r n_0) \approx 1.8 \times 10^8$.

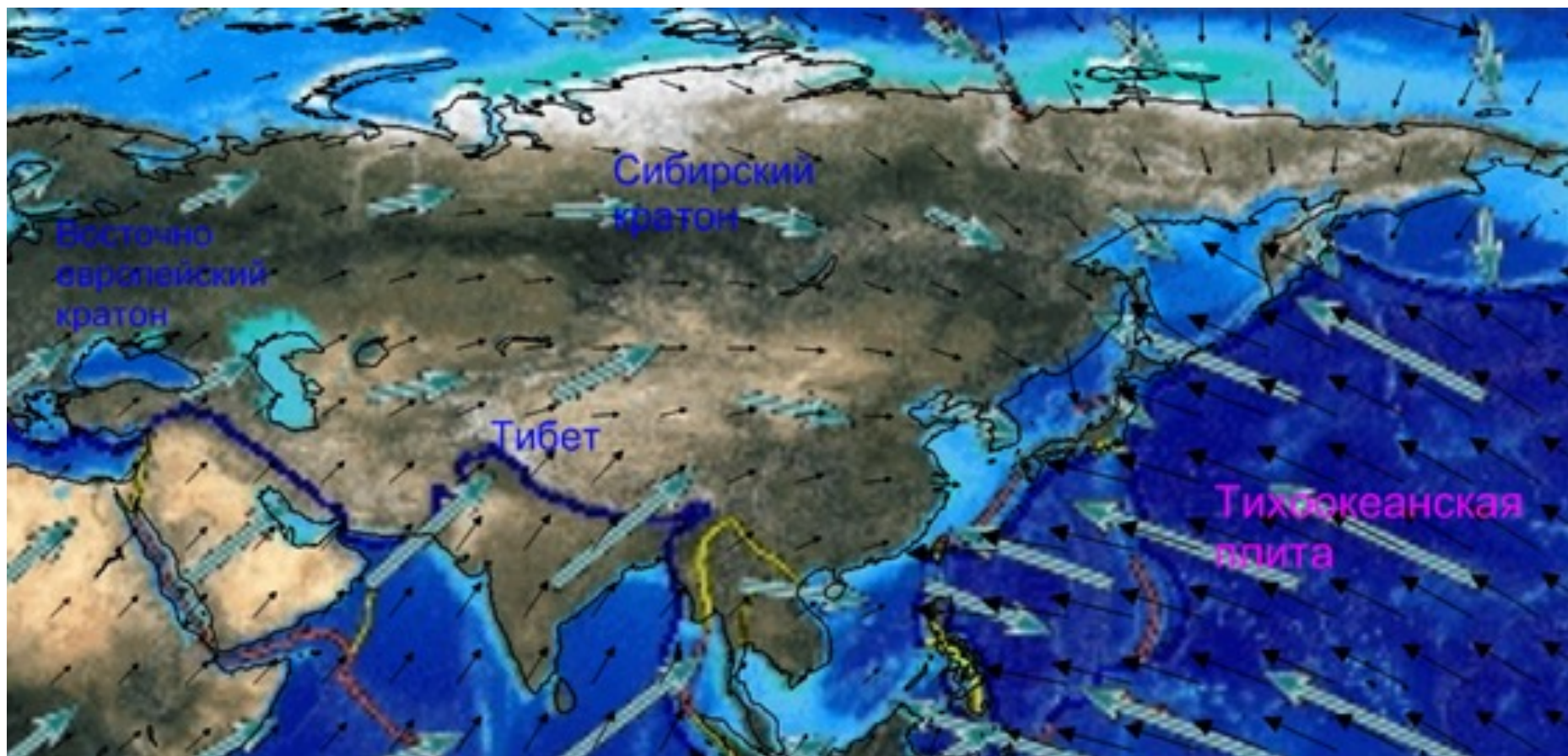
Сравнение рассчитанных скоростей на поверхности Земли и скоростей из модели ITRF на основе данных ГНСС



Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками [Лобковский, Баранов, Бобров, 2025]. Синими стрелками показаны скорости из модели ITRF [Altamimi et al., 2017]. Черной линией показаны контуры континентов. Голубой линией показаны границы плит.

Плиты делятся на 2 типа: относительно жесткие – Тихоокеанская, Наска, Африканская, Австралийская, Индийская; с большими внутриплитными деформациями т.е. скорости меняют направление внутри плит – Евразийская, Антарктическая, Южно и Североамериканская?.

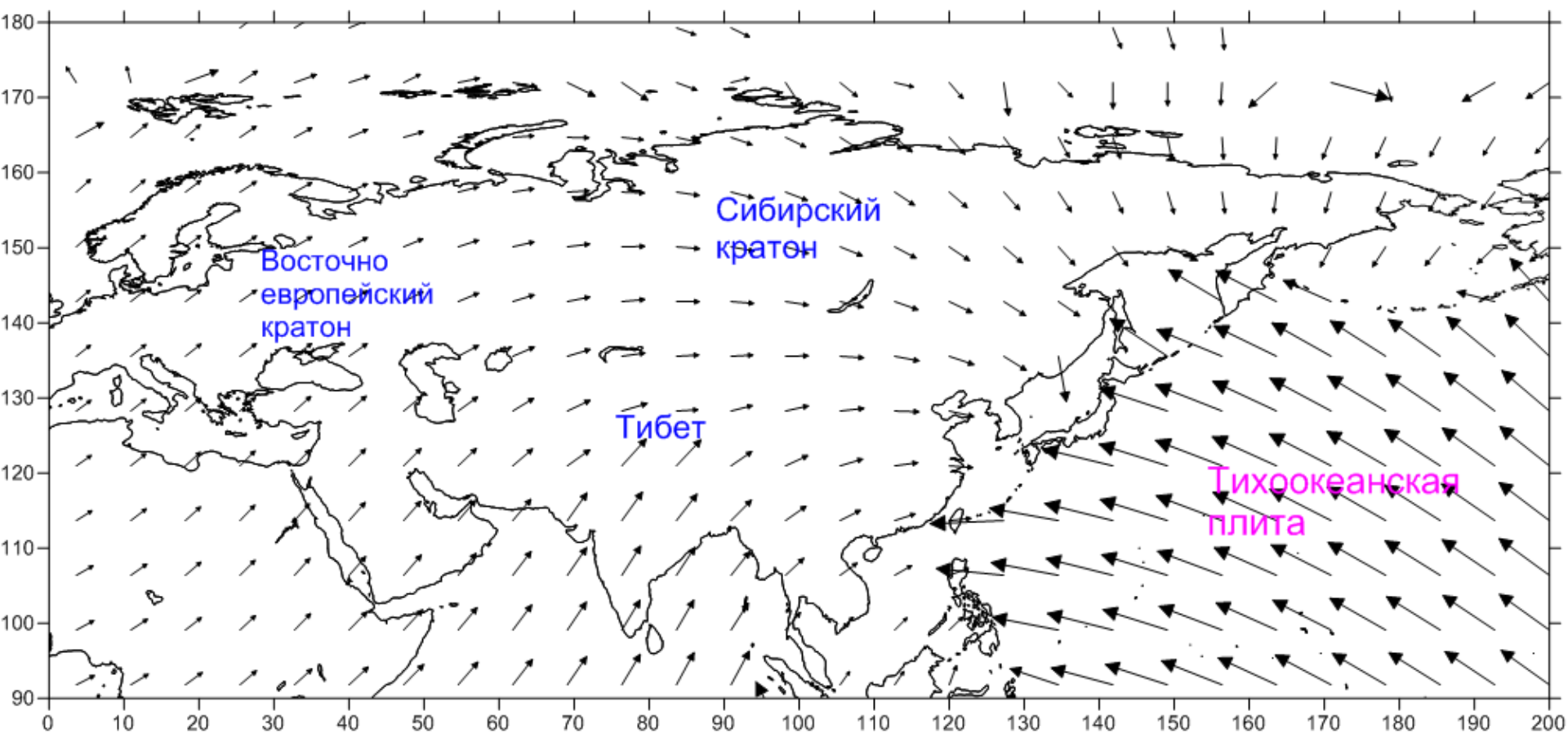
**Сравнение рассчитанных скоростей на поверхности Земли
и скоростей из кинематической модели NNR Nuvel для Северной Евразии и окружающих регионов**



Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками [Лобковский, Баранов, Бобров, 2025]. Голубыми стрелками показаны скорости из модели Nuvel [Argus and Gordon, 1991]. Черной линией показаны контуры континентов. Плиты делятся на 2 типа:

1. Относительно жесткие – Тихоокеанская, Индийская, Африканская, Аравийская.
2. С большими внутриплитными деформациями т.е. скорости меняют направление внутри плит – Евразийская.

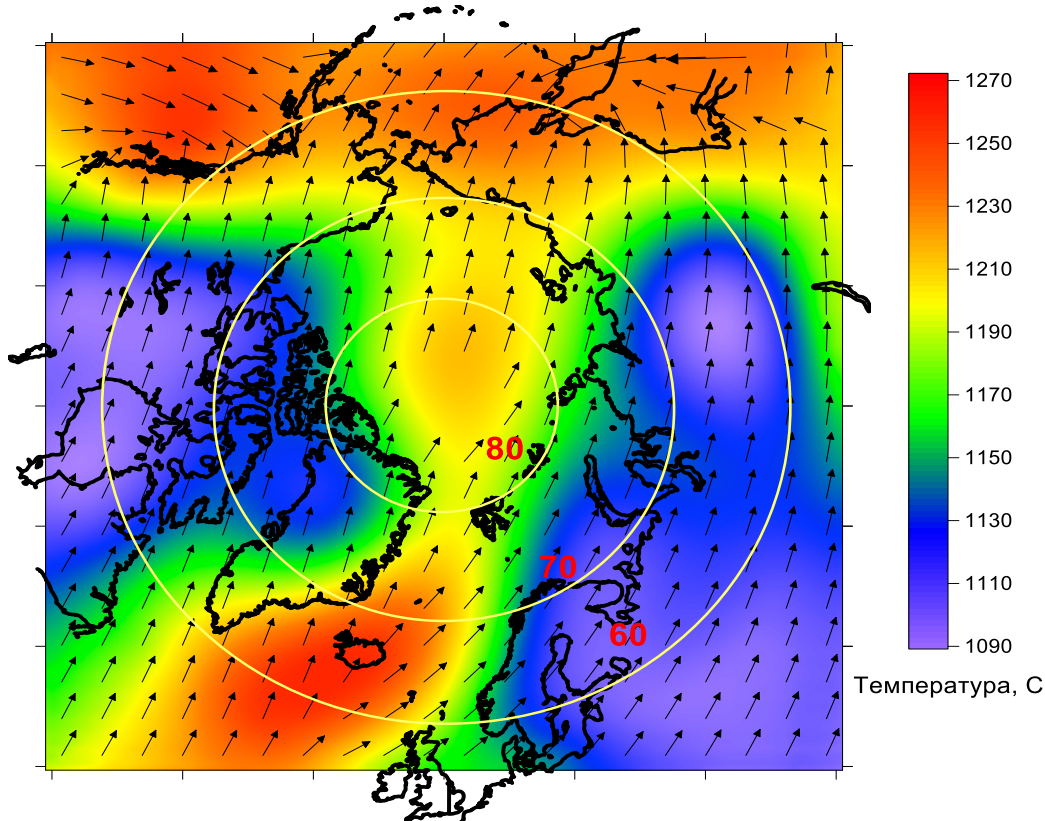
Рассчитанные скорости на поверхности Земли



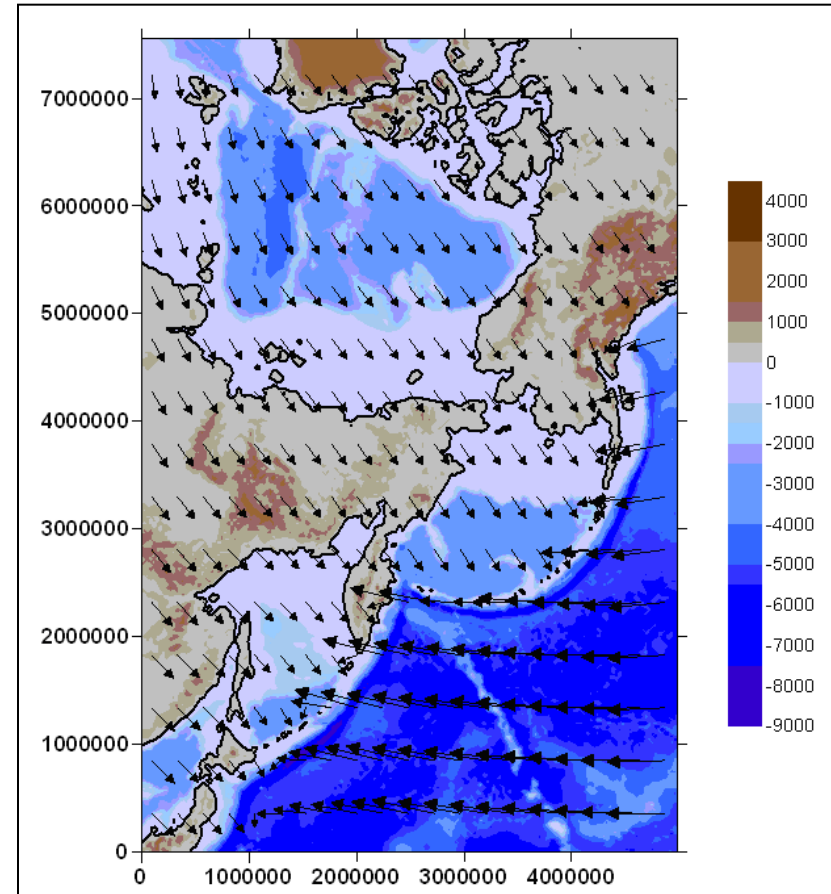
Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности Земли показано черными стрелками [Лобковский, Баранов, Бобров, 2025].

Арктика

Расчетные скорости движения

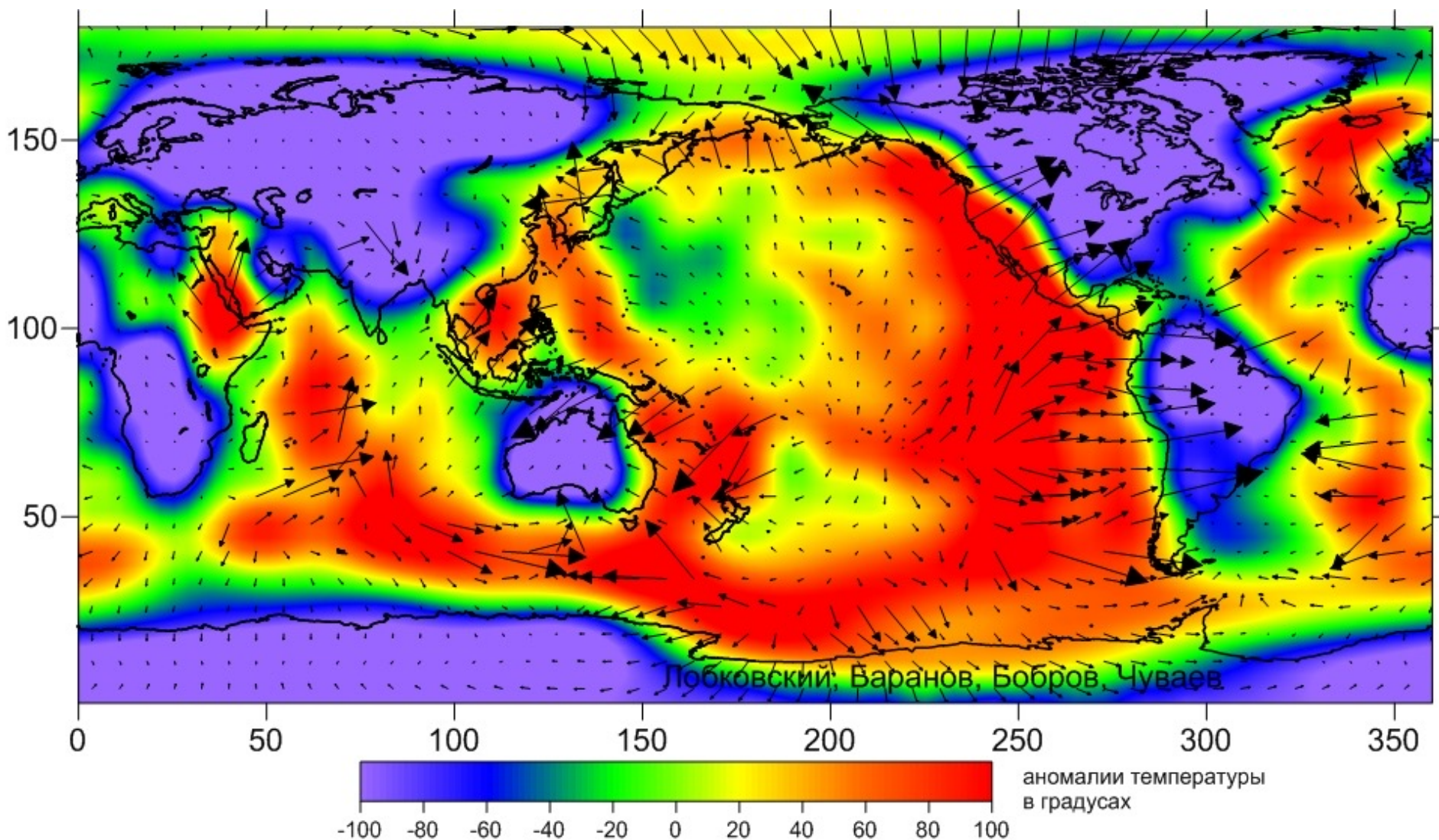


Модель движения плит NNR NUVEL 1A



Сферическая эквидистантная проекция с центром в Северном полюсе.
Цветной шкалой показана полная температура в мантии на глубине 100 км,
черными линиями показаны контуры континентов.
Векторное поле рассчитанных скоростей на поверхности показано черными стрелками.

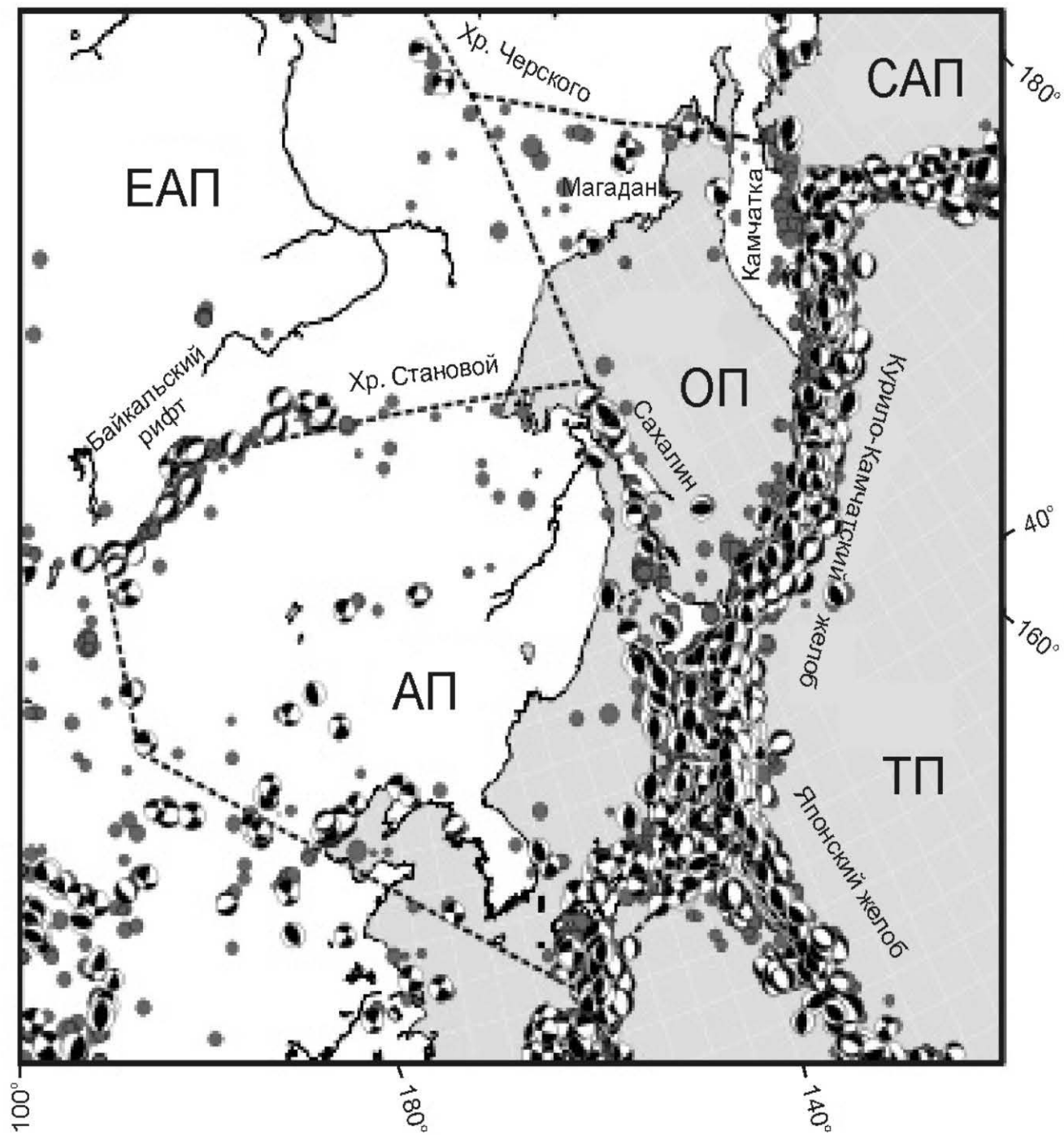
Распределение аномалий температуры и скоростей течений в мантии на глубине 150 км.



Плитная структура исчезла. Скорости течений для регионов с положительными аномалиями температуры на порядок больше чем на поверхности [Лобковский, Баранов, Бобров, 2025].

Выводы по плитной тектонике

- 1. Построена 3D модель термоденситной конвекции в сферическом мантийном слое с неньютоновской реологией, включая зависимость вязкости от температуры и других параметров среды. Модель описывает современную трехмерную картину течений в мантии, отвечающую существующей трехмерной картине плотностных неоднородностей, полученных из данных сейсмической томографии. Течения в мантии на поверхности дают плитную тектонику.**
- 2. Построенная 3D модель мантийных течений хорошо описывает горизонтальные движения поверхности Земли, которые наблюдаются по данным космической геодезии.**
- 3. Концепция академика Л. И. Лобковского о тектонике деформируемых литосферных плит подкрепляется численным моделированием.**
- 4. Часть плит (Тихоокеанская, Африканская, Австралийская, Индийская и др.) являются квазижесткими вдали от краев, для них применима теорема Эйлера о вращении на сфере.**
- 5. Евразийская плита не является квазижесткой, испытывает большие деформации и не движется как единое целое.**
- 6. Также Североамериканская плита не является квазижесткой. Поэтому палеорекострукции в Арктике на основе теоремы Эйлера неверны.**
- 7. Четкая граница между Евразийской и Североамериканской плитой в Северо-восточной Азии отсутствует.**
- 8. Наличие и границы Амурской плиты ставится под сомнение.**

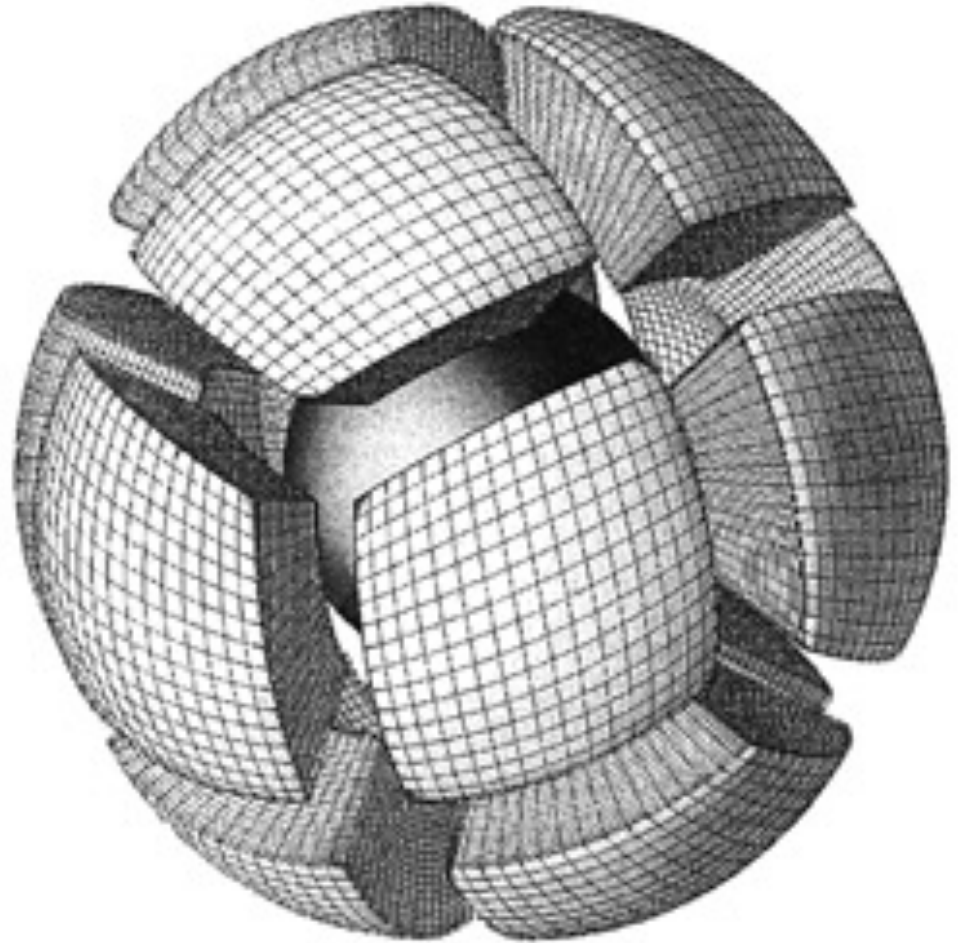


Программа для расчета сферической конвекции CitcomS

Для численного моделирования мы использовали модифицированную программу CitcomS [Zhong et al., 2000].

Данные о вариациях V_s скоростей из модели сейсмической томографии SMEAN2 были разложены по сферическим гармоникам, чтобы не зависеть от расчетной сетки. На входе программа CitcomS считывает 58 файлов, содержащих вариации сейсмических скоростей в Земле на различных глубинах, и переводит их в температуру в каждой точке сетки согласно используемому методу.

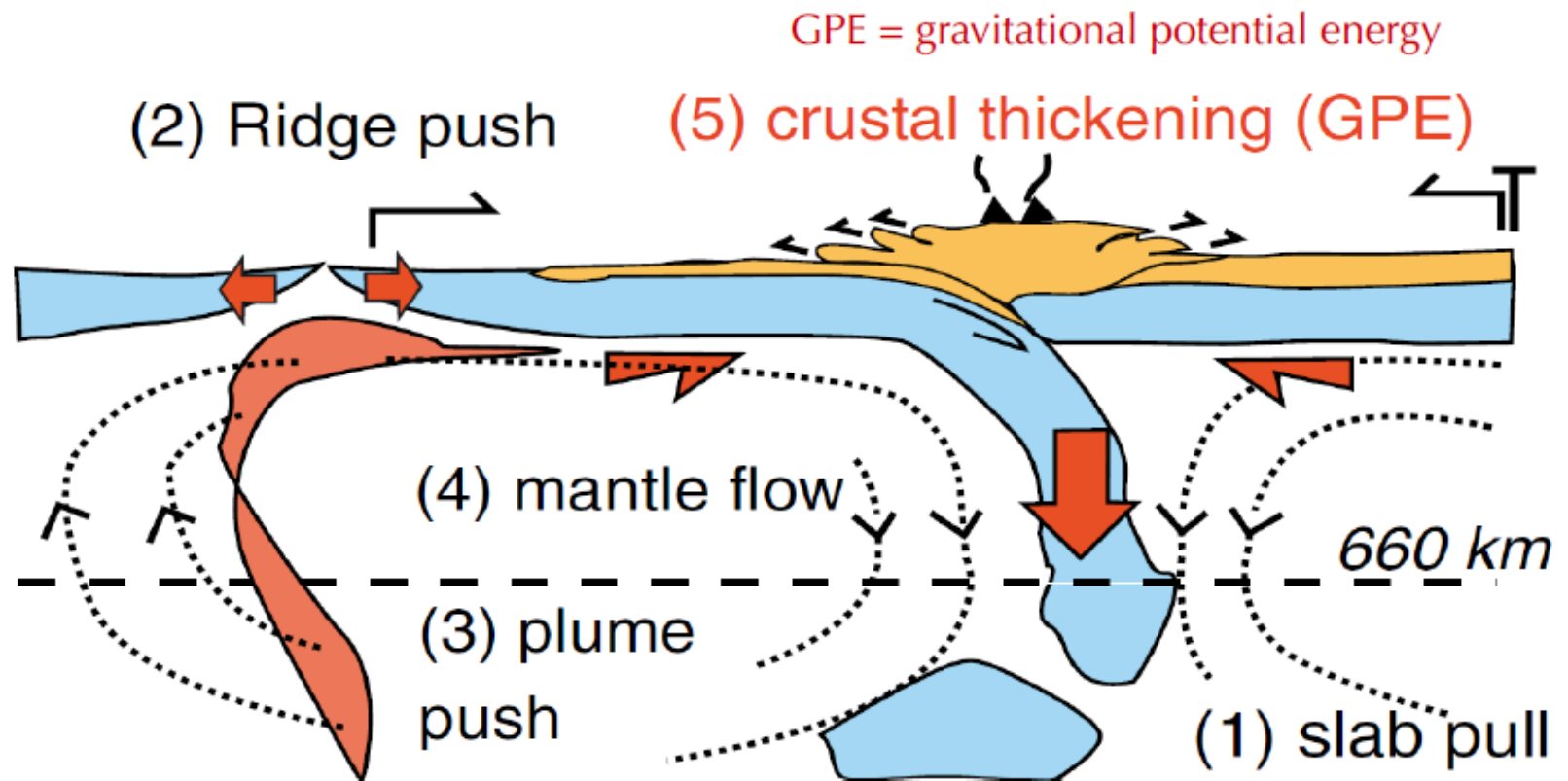
Затем решается уравнение переноса импульса (уравнение Стокса) для скоростей течений в естественных переменных скорость–давление конечно-элементным методом с помощью алгоритма Узавы, что позволяет получить решение даже тогда, когда вязкость вещества меняется на много порядков [Баранов и др., 2023]. Расчеты уравнения переноса импульса для скоростей течений производились на сетке $170 \times 170 \times 59$ узлов по углам и глубине, соответственно, с равномерным шагом по глубине в 50 км, сетка по углам неравномерная и состоит из 12 сферических сегментов без сингулярностей в полярных областях [Чуваев и др., 2020].



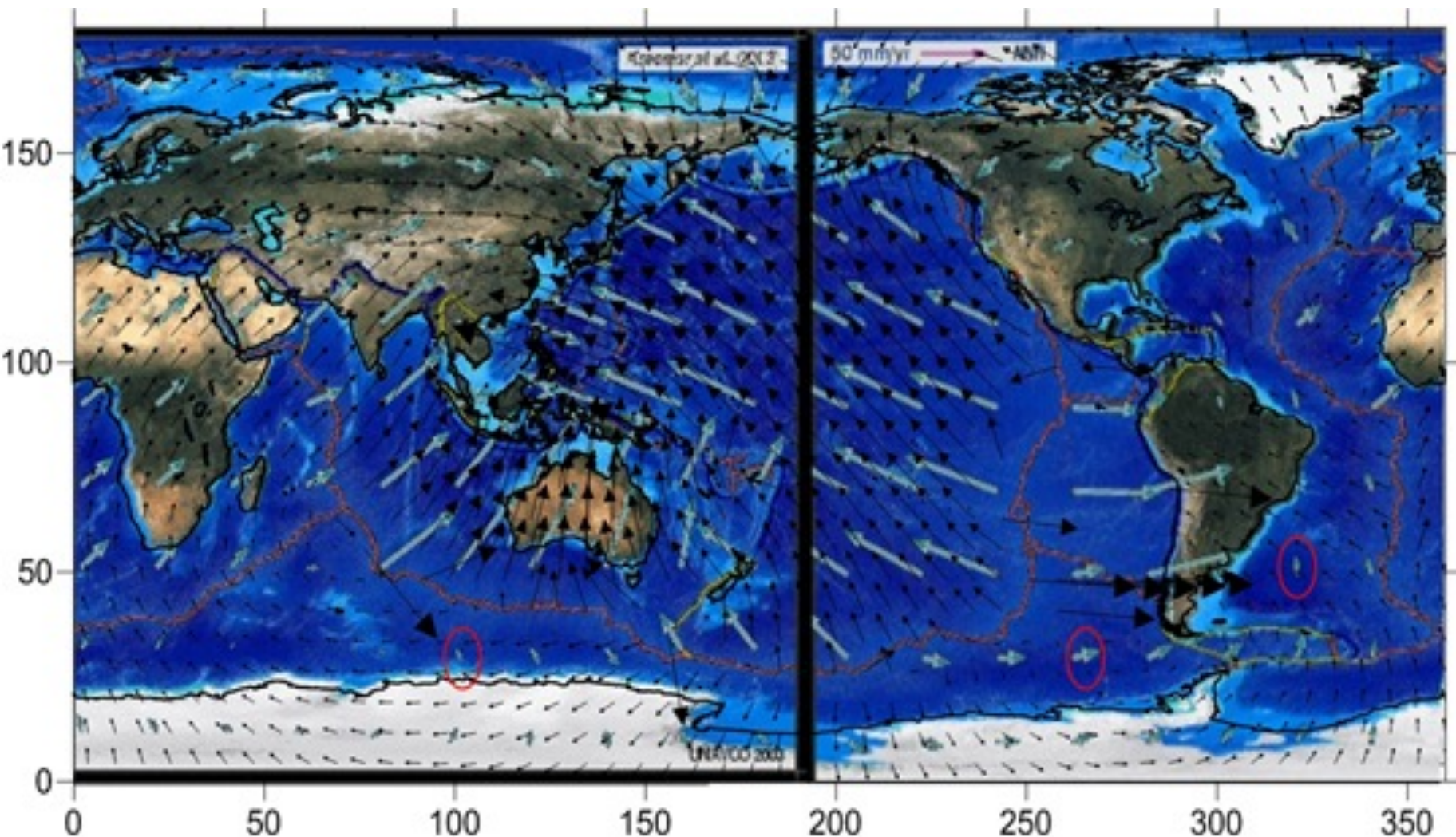
ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В качестве общей теоретической платформы развития современной глобальной геодинамики, включающей основные принципы тектоники плит, предлагается разработанная 3D-модель мантийной конвекции для современной Земли, основанная на данных сейсмической томографии, определяющих её внутреннее строение. Модель автоматически учитывает все основные силы, действующие в мантии и на поверхности Земли. Построенная 3D- модель мантийных течений даёт картину горизонтальных движений поверхности Земли, которая хорошо согласуется с данным космической геодезии. Она представляет количественную основу для анализа особенностей региональных геологических и геодинамических процессов, протекающих в современную эпоху и в позднем кайнозое. Фактически создается своеобразный атлас глубинной геодинамики на основе разрезов ее трехмерной структуры. Таким образом конвективная 3D-модель современной глобальной геодинамики может рассматриваться как реальное обобщение тектоники литосферных плит для современного этапа развития Земли.

Plate driving forces: Integrals over components of thermo-chemical convection



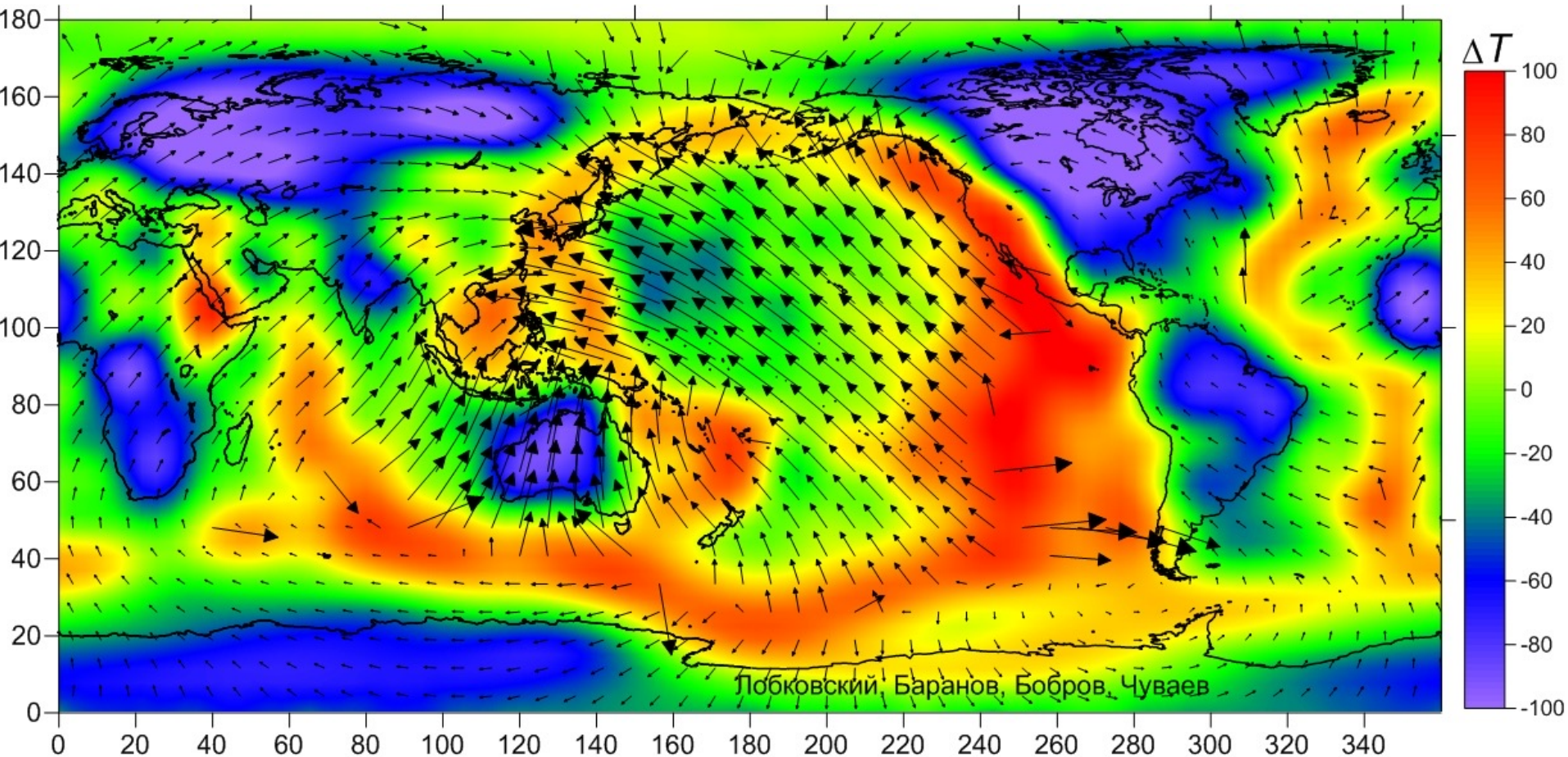
Сравнение рассчитанных скоростей на поверхности Земли и скоростей из модели ITRF на основе данных ГНСС



линией показаны контуры континентов. Голубой линией показаны границы плит.

Плиты делятся на 2 типа: относительно жесткие – Тихоокеанская, Наска, Африканская, Австралийская, Индийская; с большими внутриплитными деформациями т.е. скорости меняют направление внутри плит – Евразийская, Антарктическая, Южно и Североамериканская.

Атлас глубинной геодинамики, основанный на серии плоскостных и меридиональных разрезов, на которых показаны рассчитанные температурные аномалии и скорости течений в мантии Земли



Распределение аномалий температуры в мантии на глубине 100 км. Черной линией показаны контуры континентов. Черными стрелками показаны рассчитанные скорости на поверхности Земли (1-8 см/год) [Лобковский, Баранов, Бобров, Чуваев, 2025].