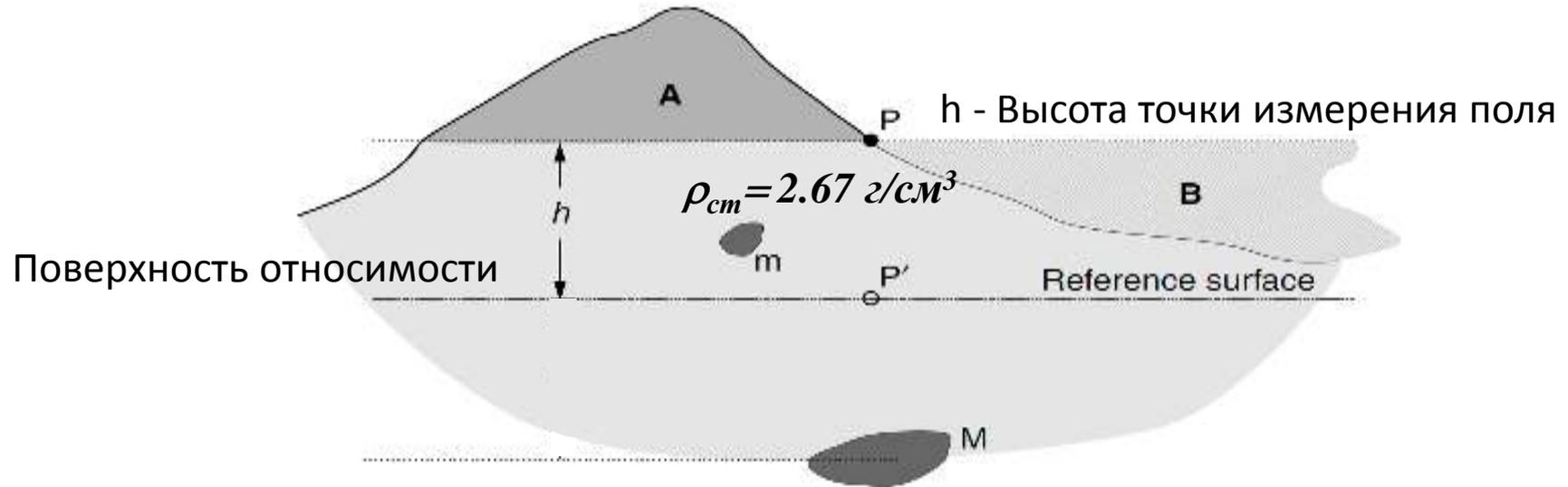


Ак. Добрецов Н.Л, чл.к. Кулаков И.Ю., Василевский А.Н.
(ИНГГ СО РАН)

Спутниковые данные по гравитационному полю Земли и их применение в геологии

1. Спутниковые базы данных гравитационного поля (сл. 18-21)
2. Эволюция структур на Камчатке, Байкальском регионе, Скандинавии (сл. 22-47)
3. Возможные предложения по программе «GLONASS Program» (сл. 48-51)

Аномалии силы тяжести в редукции в свободном воздухе (Фая) и Буге



Аномалии Фая: Учет высоты точки измерения и вычитание нормального поля

$$\Delta g_{\text{Фая}} = g_{\text{изм}} - (g_{\text{норм}} - dg/dh \cdot h)$$

$$\Delta g_{\text{Фая}} = g_{\text{изм}} - (g_{\text{норм}} - 0.309 \cdot h)$$

- из измеренных значений силы тяжести убирается нормальное поле Земли и учитывается его изменение с высотой

Аномалии Буге: ввод коррекции Буге

Континент: вычитание притяжения рельефа, $\rho = 2.67 \text{ г/см}^3$

Океан: добавление недостающей плотности, $\rho = 1.645 \text{ г/см}^3$

$$\Delta g_{\text{Буге}} = \Delta g_{\text{Фая}} - 2\pi G \rho h$$

$$\Delta g_{\text{Буге}} = \Delta g_{\text{Фая}} - 0.042 \rho h$$

Для расчетов используют стандартные значения плотности (континент) или недостающие до стандартных (океан)

: G – гравитационная постоянная

: $[g(\text{мГал}), \rho(\text{г/см}^3), h(\text{м})]$

Низкоорбитальные спутники для измерений параметров ГПЗ

	CHAMP	GRACE	GOCE	GRACE-FO
Дата запуска	2000	2002	2009	≈2018
Количество спутников	1	2	1	2
Высота орбиты (км)	450-350	450-300	250	500
Масса (кг)	400	430	1100	600
Наклонение орбиты (град)	87,3	89,5	96,6	—
Точность акселерометра (м/с ²)	$3 \cdot 10^{-9}$	$1 \cdot 10^{-10}$	$1 \cdot 10^{-12}$	—
Точность измерения взаимного расстояния (μм)	—	10 (дальномер К-диапазона)	—	0,5 (лазерный дальномер)

Классификация глобальных моделей гравитационного поля

- **Чисто спутниковые модели (статические)**
EIGEN-6S4, GOCO5s, GO_CONS_GCF_2_SPW_R5, ITSG-Grace2014s
- **Комбинированные решения (+ наземные/поверхностные данные)**
EGM96, GGM02C, EIGEN-05C, **EGM2008 ($L_{max} = 2160$)**, EIGEN-6C4, GECO
- **Чисто спутниковые модели (переменные во времени)**
GRACE time series of GFZ,JPL,CSR, GRGS, IGG with monthly, 10- day, or weekly resolution or continuous in time by splines ($L_{max} \sim 20 \dots 120$)
- **«Морские» модели гравитационного поля серии DTU**
DTU10, DTU13, DTU15 - для акваторий морей и океанов, основа - спутниковая альтиметрия

Для чисто спутниковых моделей – максимальная степень гармоник < 360

Для комбинированных моделей - $L_{max} = 2190$

Глобальная модель **EGM2008** включает наземные гравиметрические данные, осредненные по сетке $5' \times 5'$ – основа всех современных детальных моделей

К концу 2019 года – выход более точной модели **EGM2020 ($L_{max} = 2190$)**

XGM2016 – экспериментальная комбинированная модель ($L_{max} = 720$) на базе новых наземных гравиметрических данных

Пример схемы сочетаний данных для глобальной модели (EIGEN-6C4)

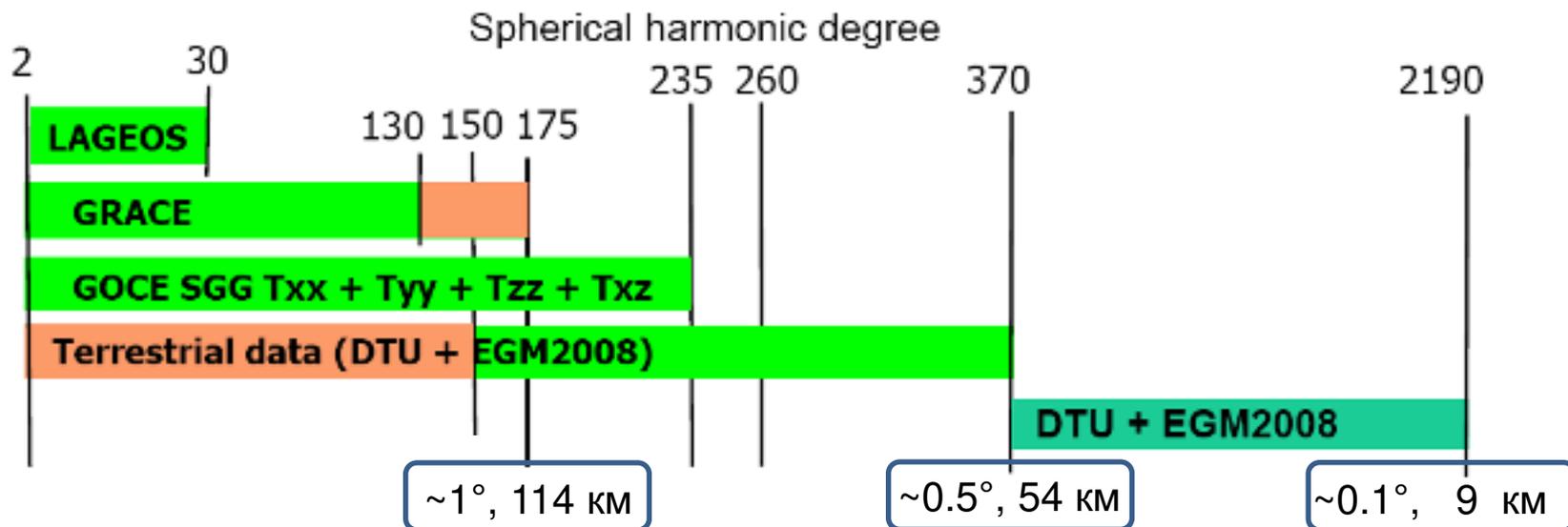
Accumulation of a **full normal matrix** up to d/o 370:

~200.000 parameters, ~ 250 GByte

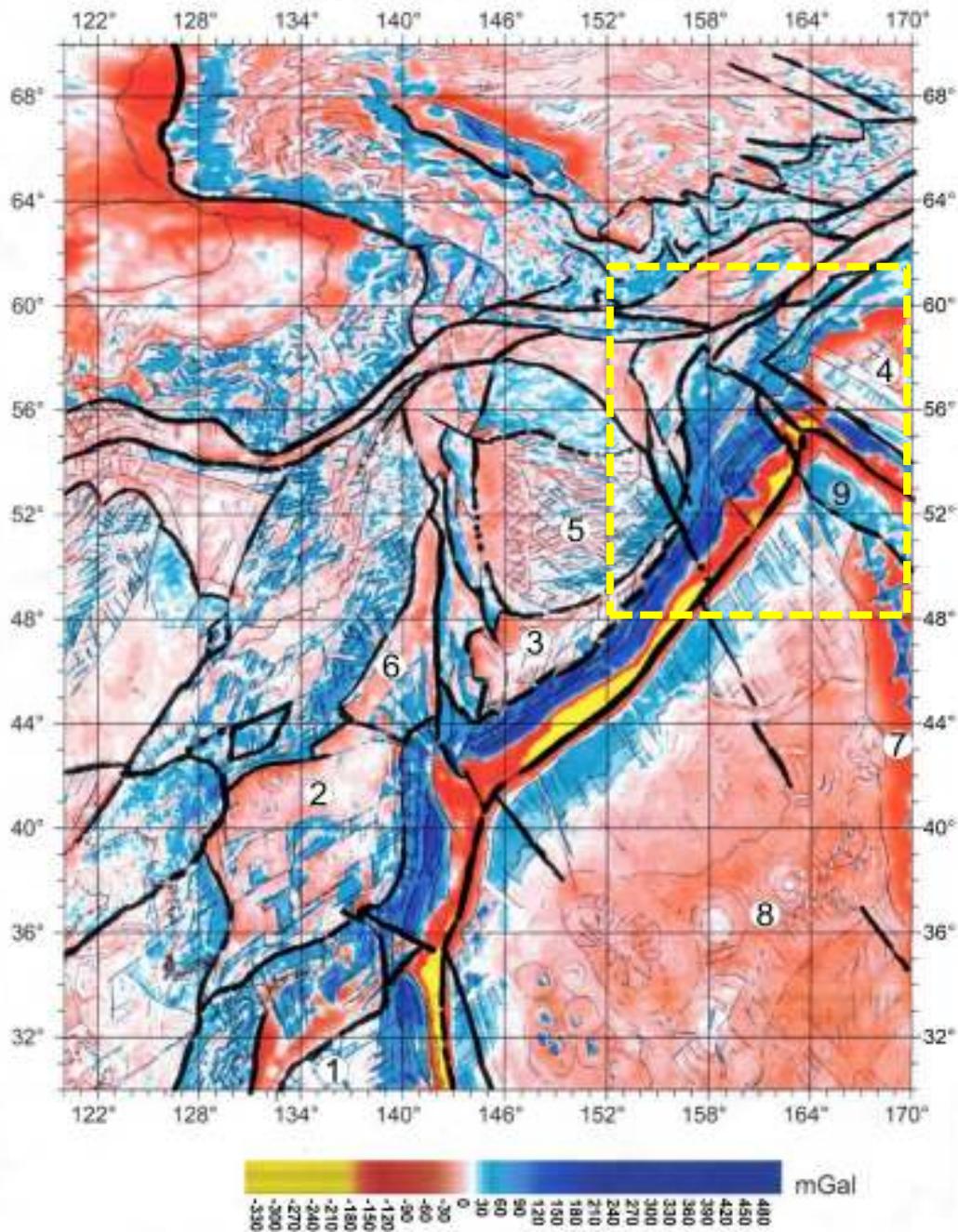
contribution to the solution EIGEN-6C4:

eliminated beforehand (block matrix reduction):

Separate block diagonal solution:



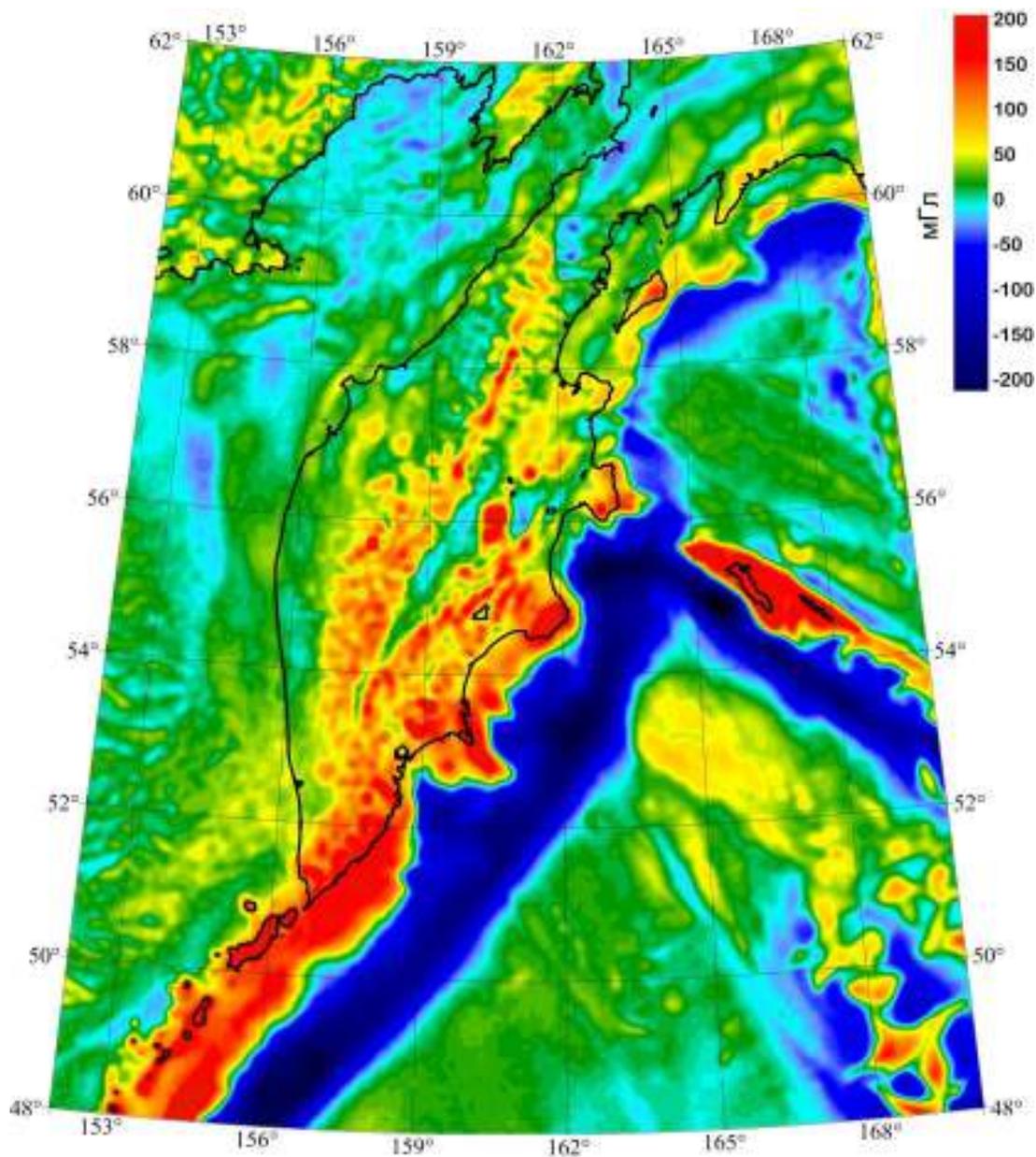
Gravity Free Air Anomaly (DNSC08)



Северо-западное обрамление Тихоокеанской плиты

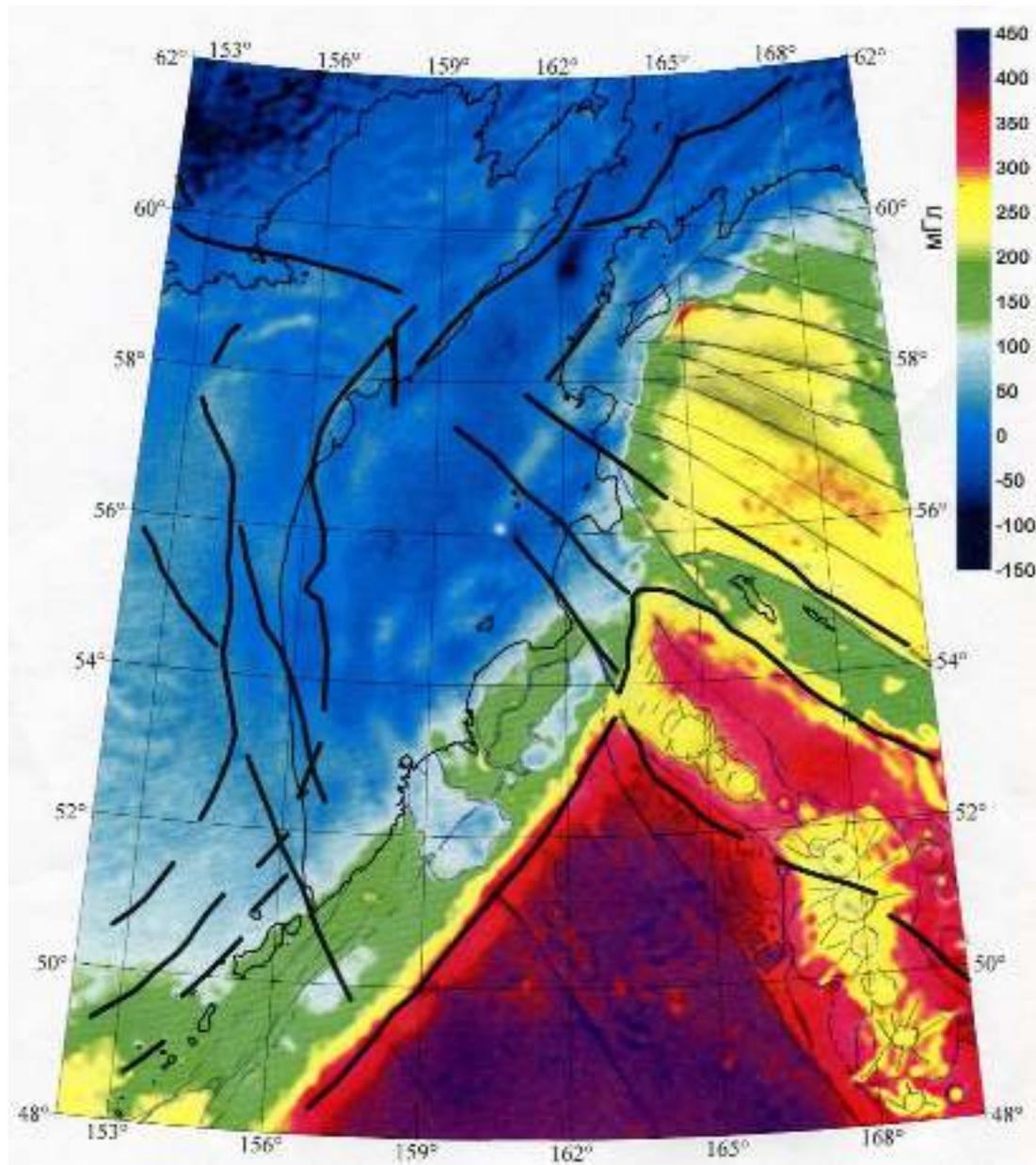
1. Мощные осадочные отложения в желобах
2. Деформационные особенности края океанической плиты и задуговых блоков
3. Структура океанических поясов на океанической плите

Аномалии Фая региона Камчатки



модель DTU15

Аномалии Буге региона Камчатки



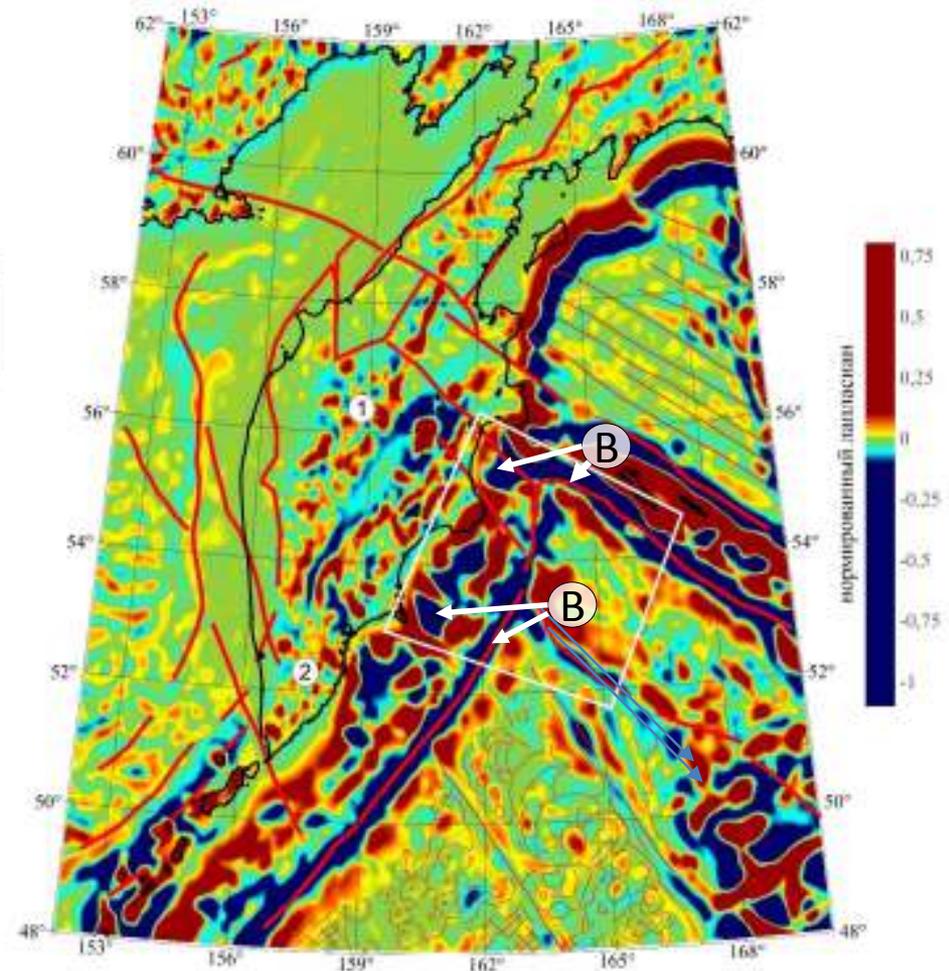
Хорошо видны
структуры
океанической
плиты и желоба

модель EIGEN-6C4

Детальная структура северной части Камчатского желоба



Двумерный лапласиан рельефа



(Ломтев, 2017)

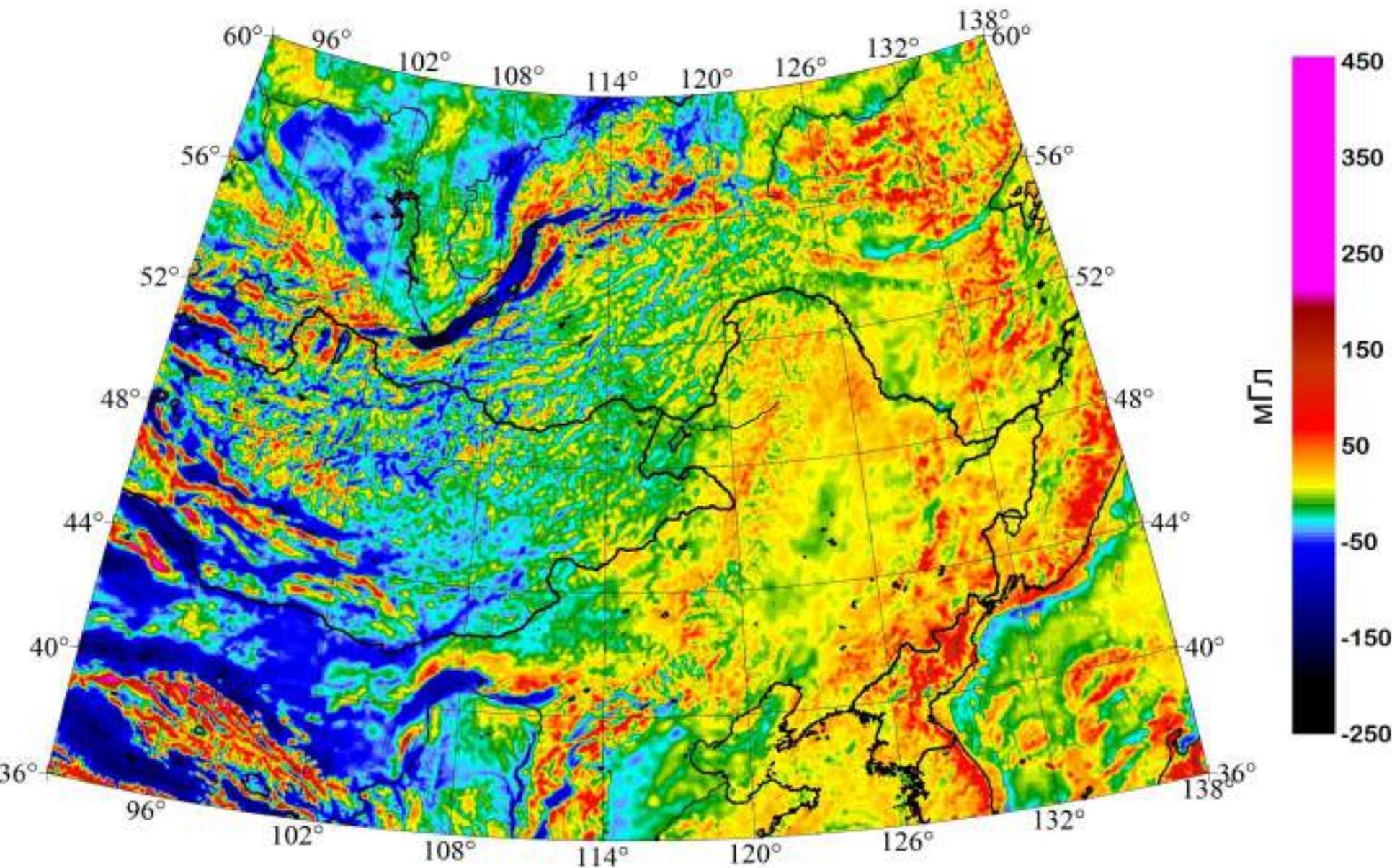
ⓑ - Впадины, заполненные осадками и совпадающие с реальным рельефом

Пример модификации рельефа

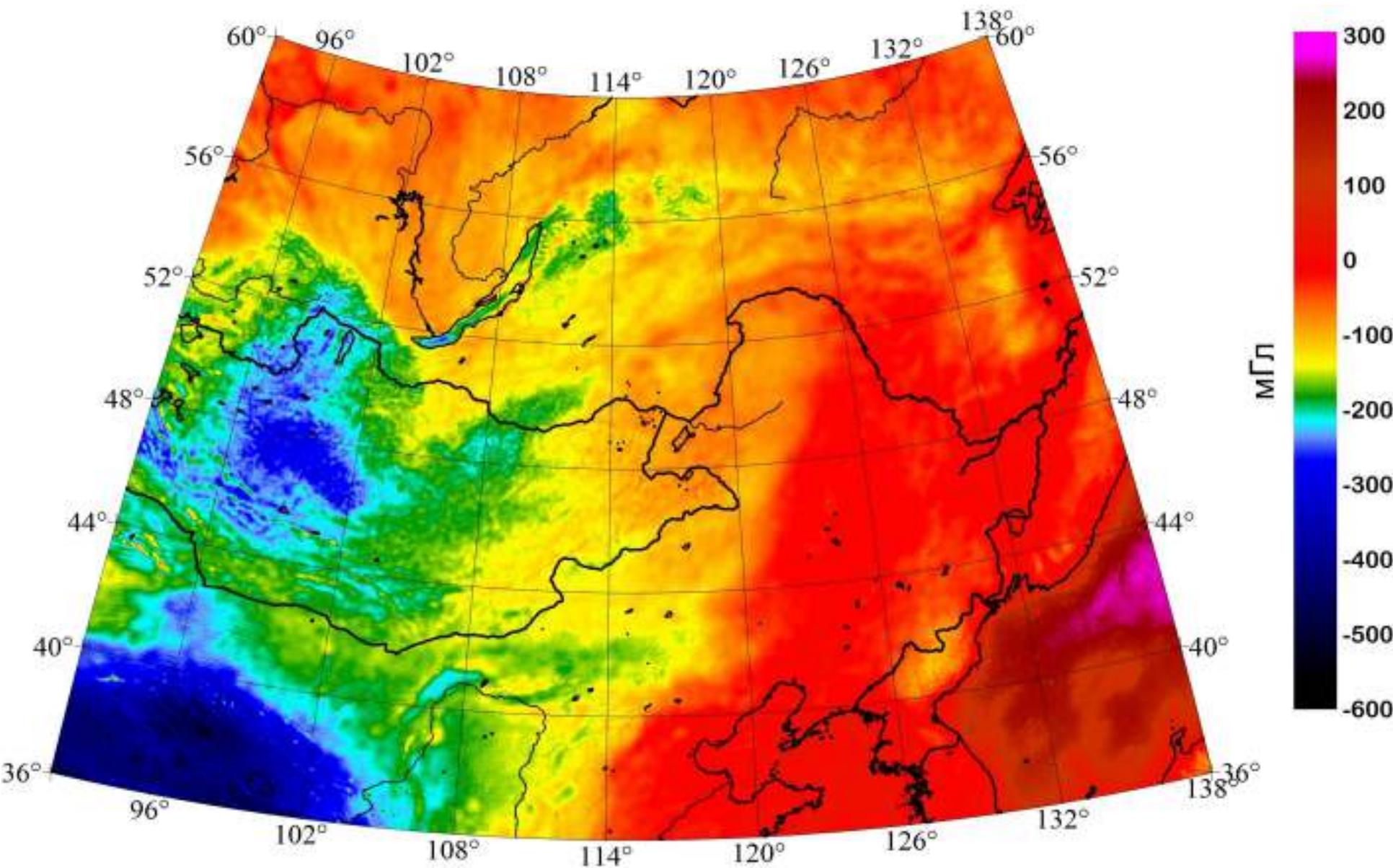


Структурные особенности района
Томторского месторождения по данным
обработки и дешифрирования
космоснимков.

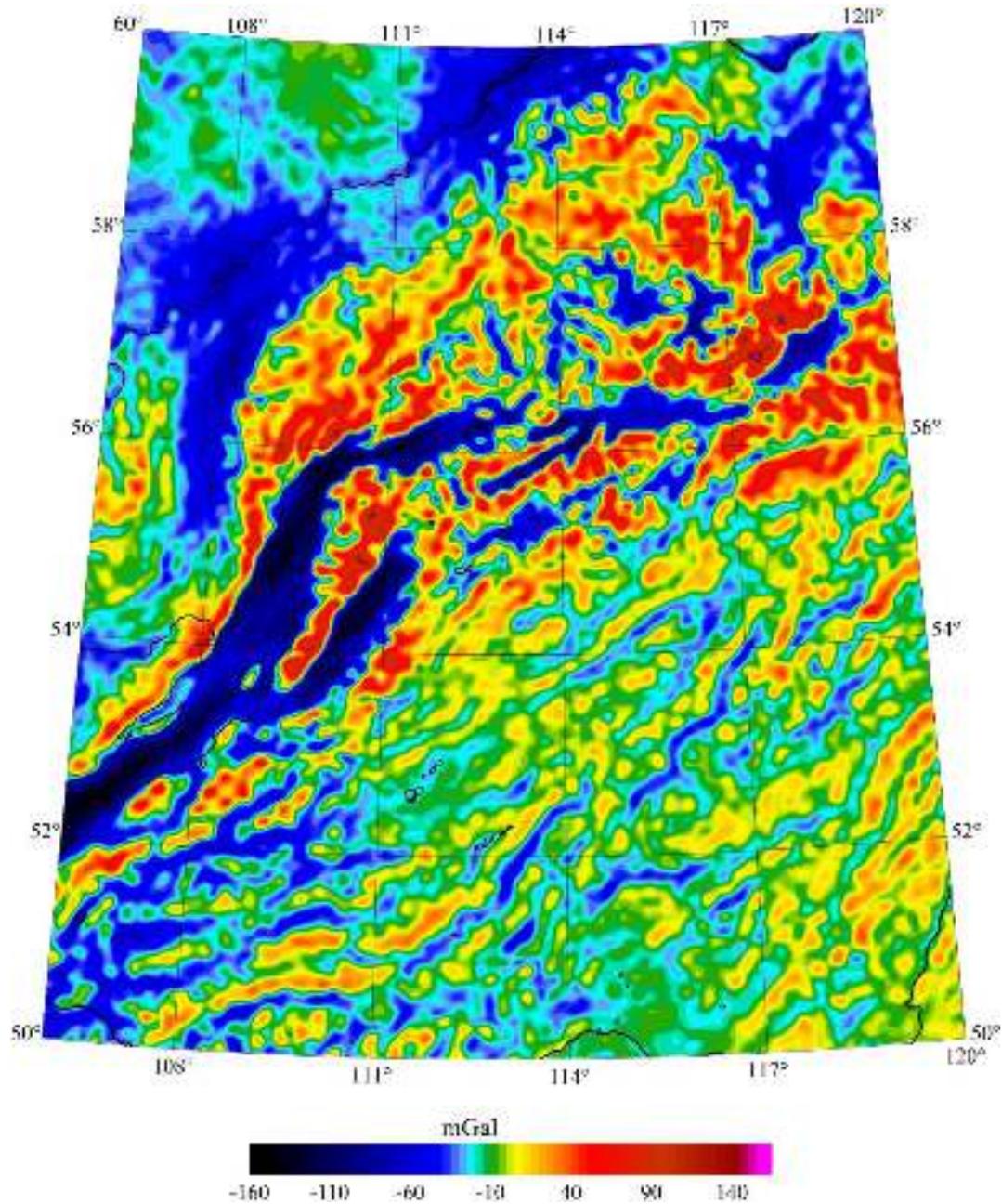
Аномалии Фая Дальневосточного региона



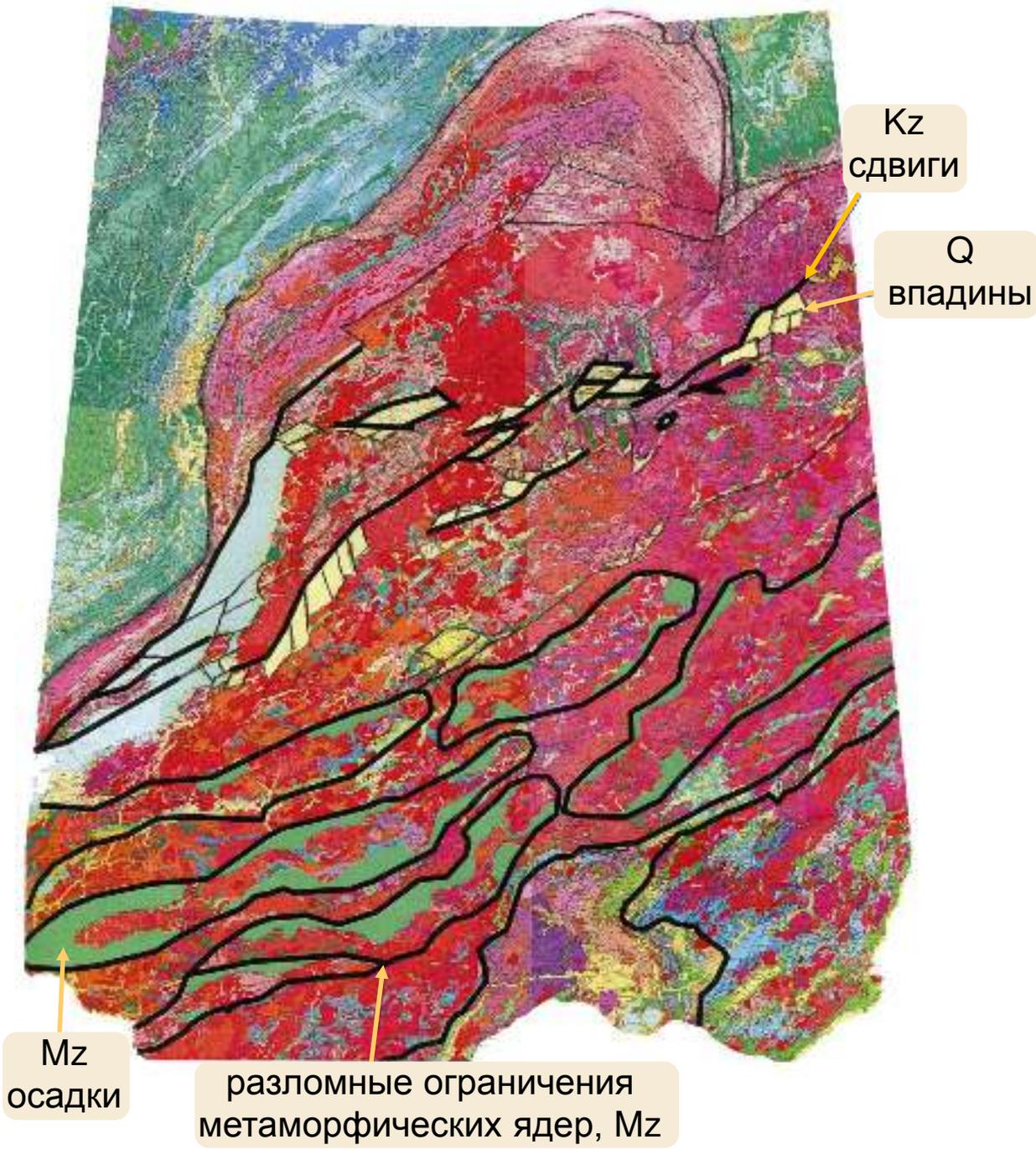
Аномалии Буге Дальневосточного региона



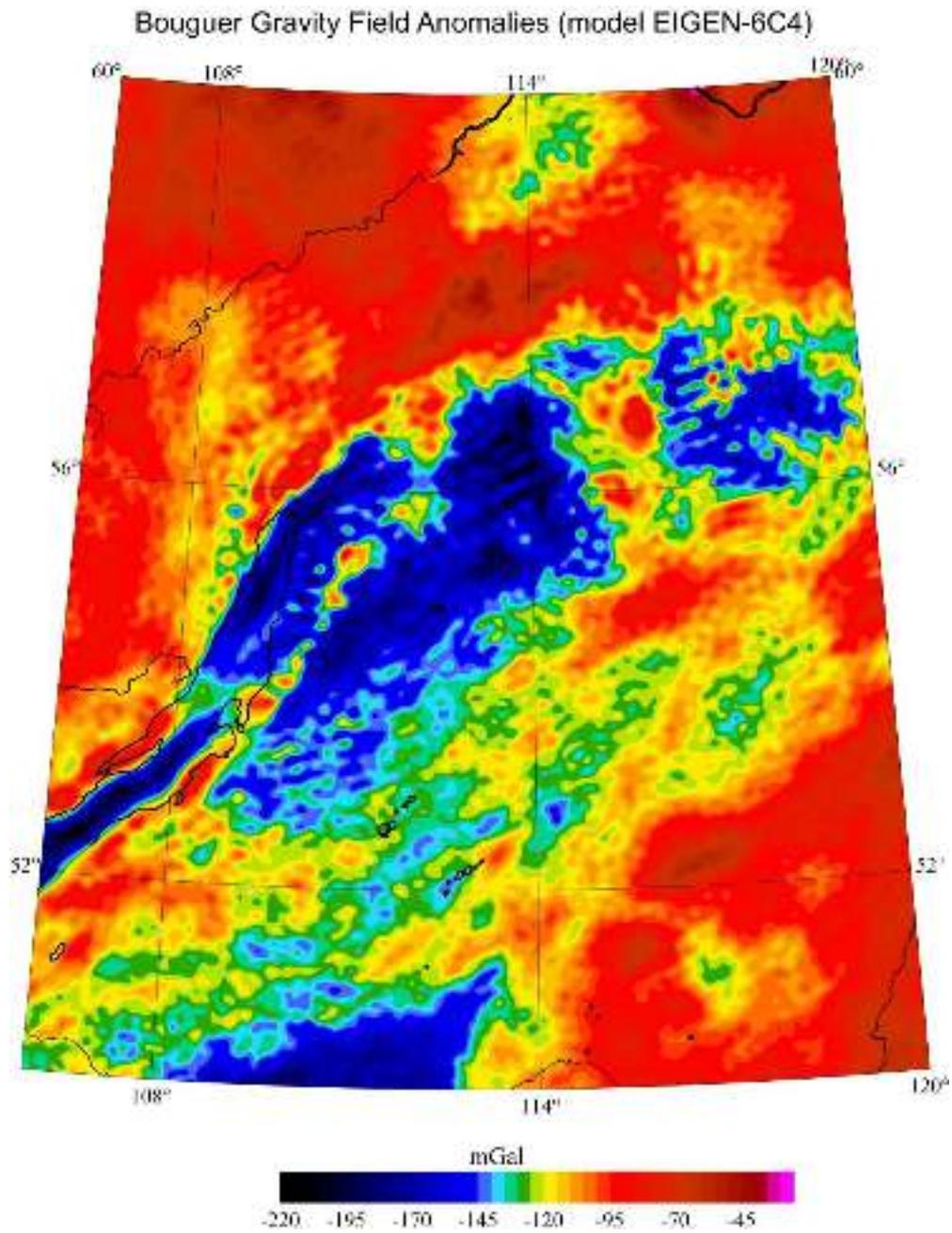
Аномалии Фая района оз. Байкал



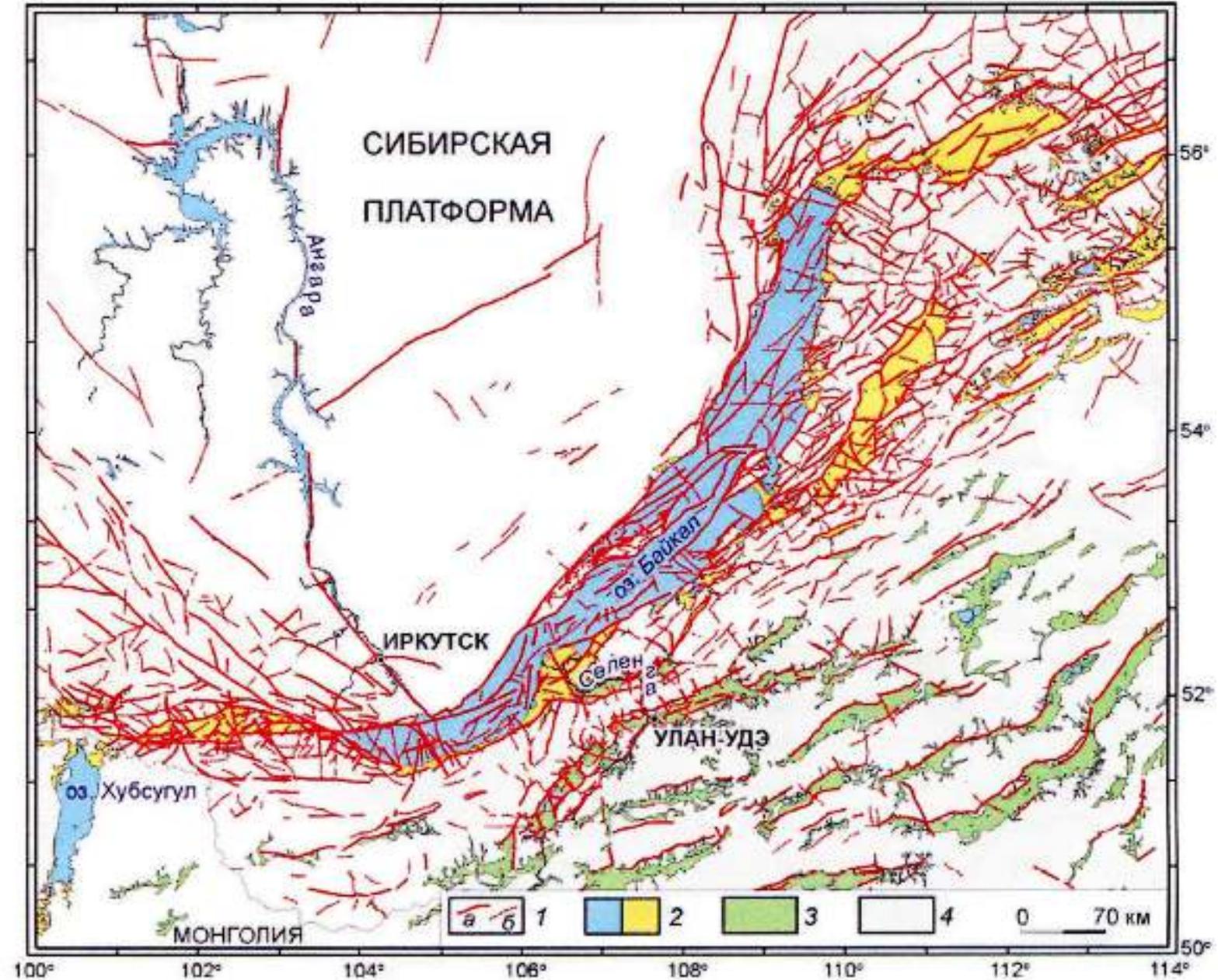
Забайкалье Геологическая карта



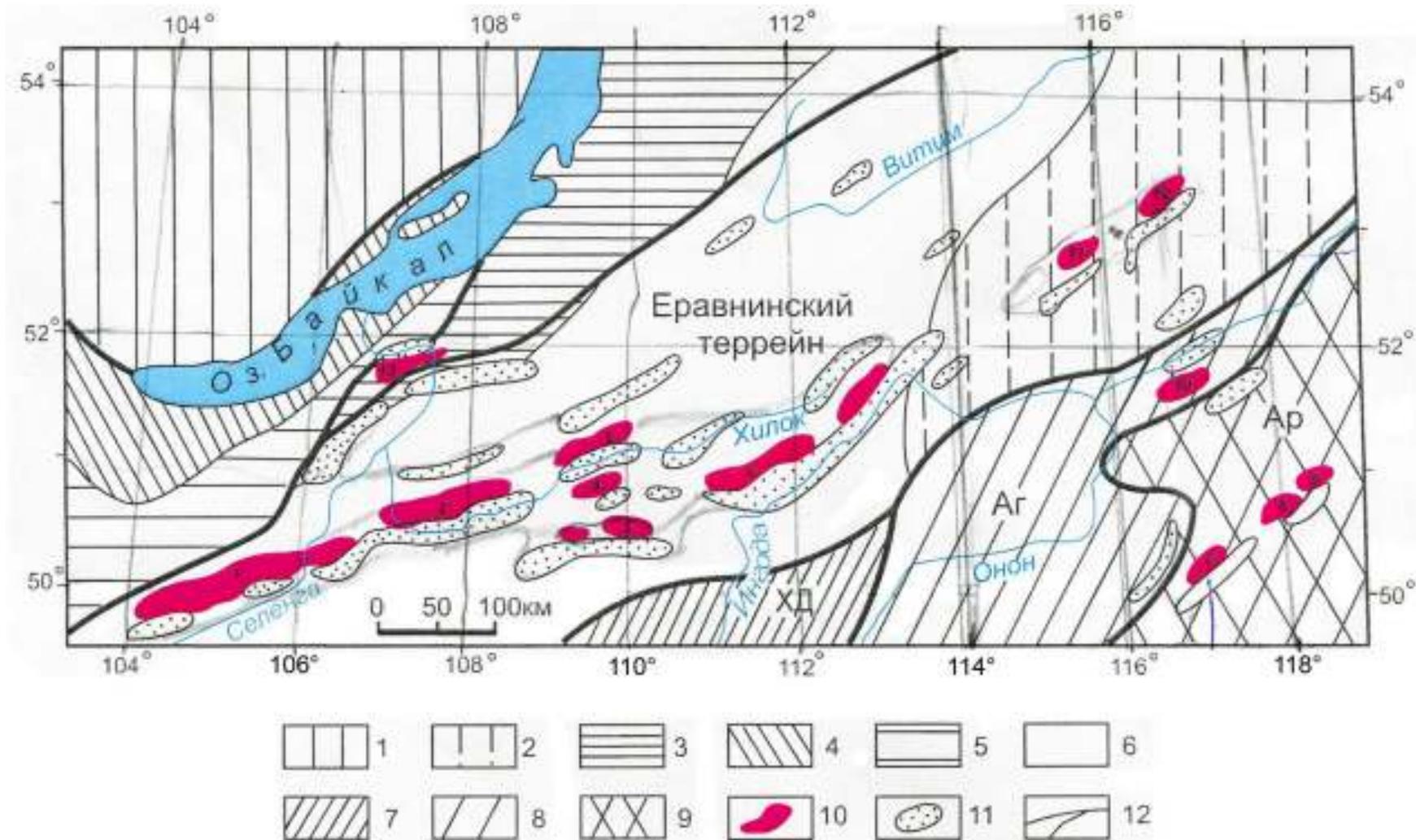
Аномалии Буге района оз. Байкал



Активные разломы Прибайкалья

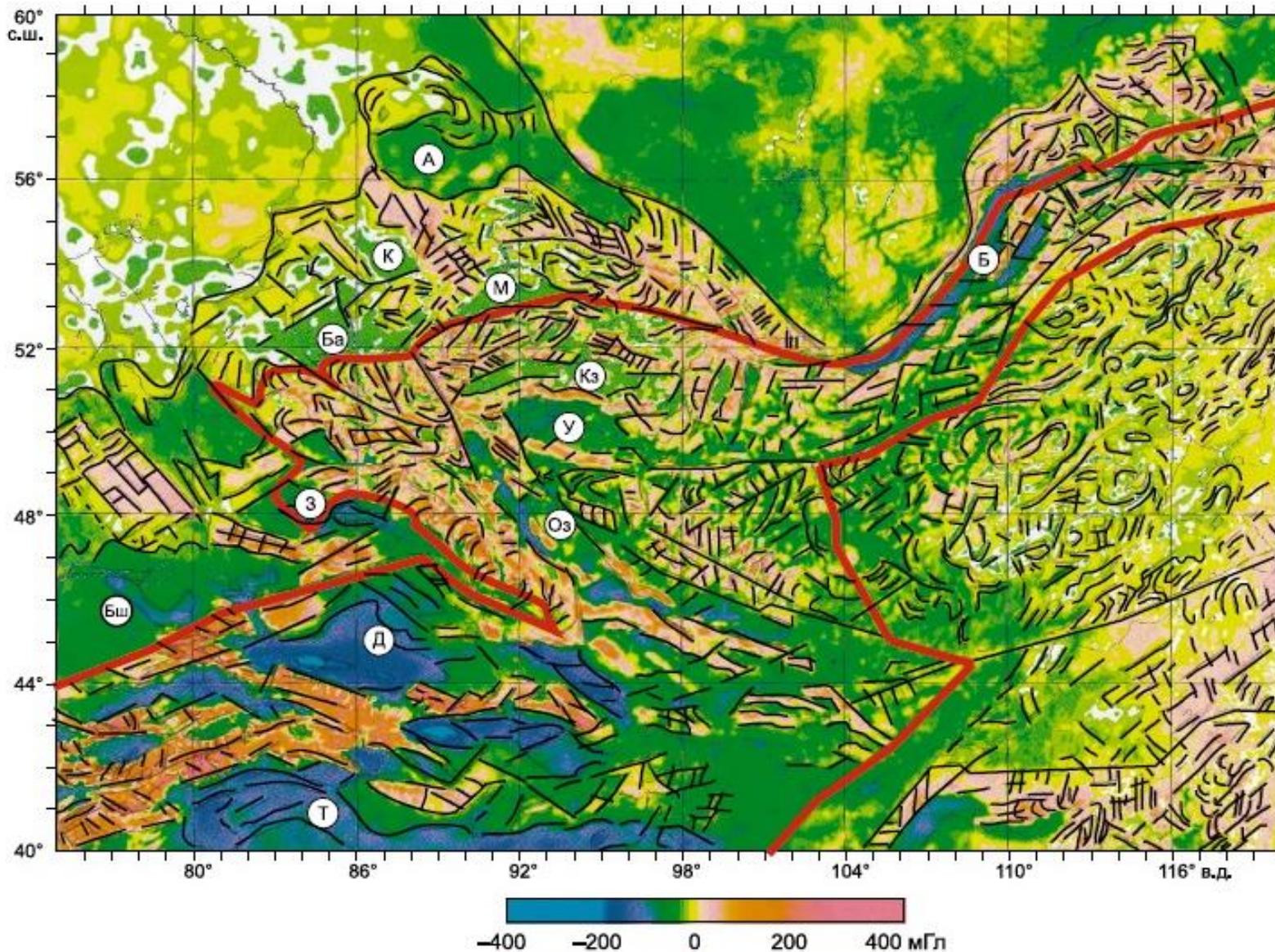


Расположения комплексов метаморфических ядер в структуре Забайкалья



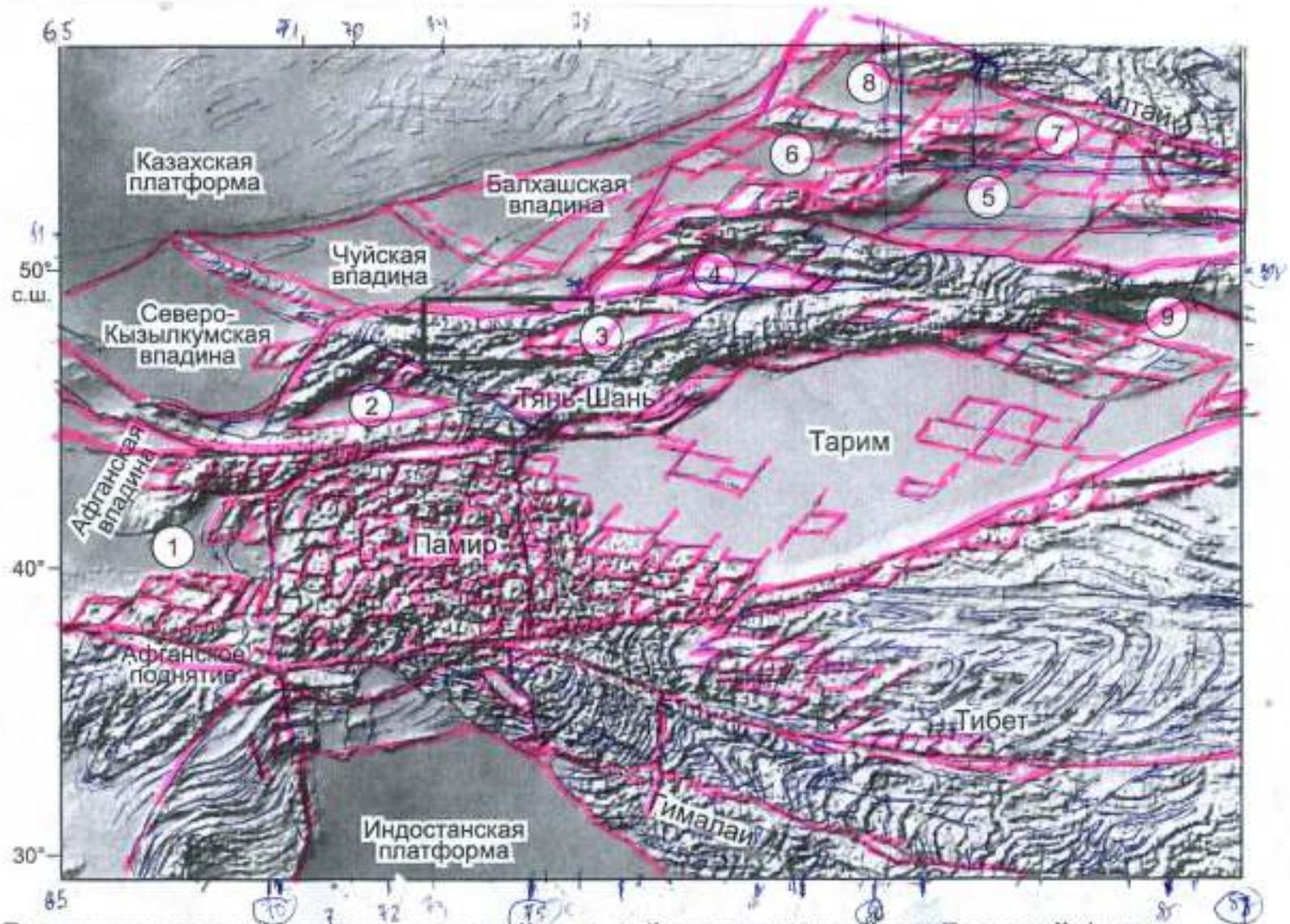
1 – плита Сибирского кратона; 2 – Становая зона; 3-6 – структуры Забайкалья;
 7-8 – структуры Монголо-Охотского складчатого пояса; 9 – Аргунский микроконтинент;
 10 – комплексы метаморфических ядер; 11 – раннемеловые впадины; 12 – основные разломы

Гравитационные аномалии Центральной Азии и юга Сибирской платформы



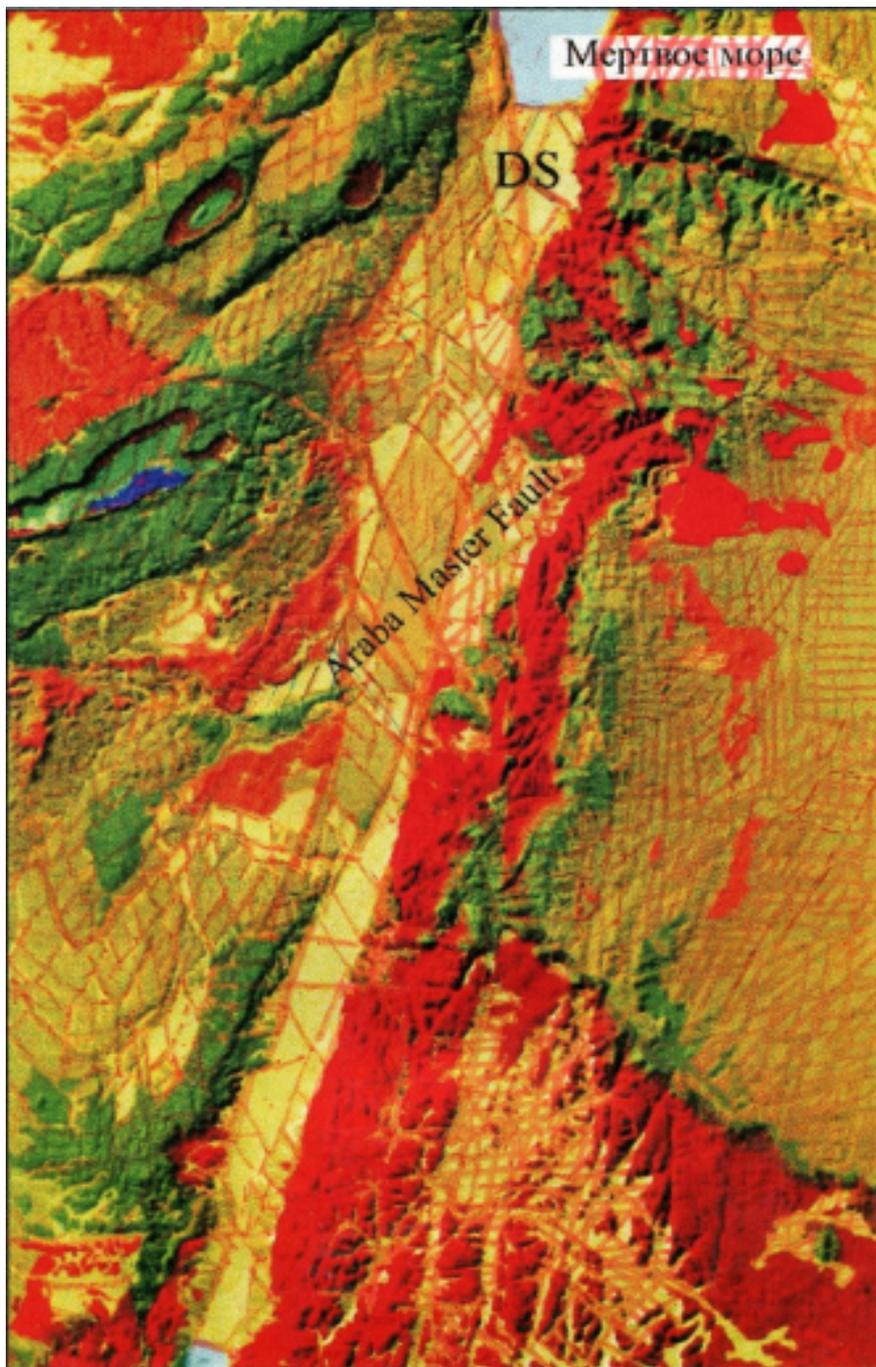
Впадины:

- Т – Таримская
- Д – Джунгарская
- Бш – Балхашская
- З – Зайсанская
- Оз – Озерная
- У – Убсунурская
- Кз – Кызыльская
- Ба – Барнаульская
- М – Минусинская
- А – Ачинская
- Б - Байкальская



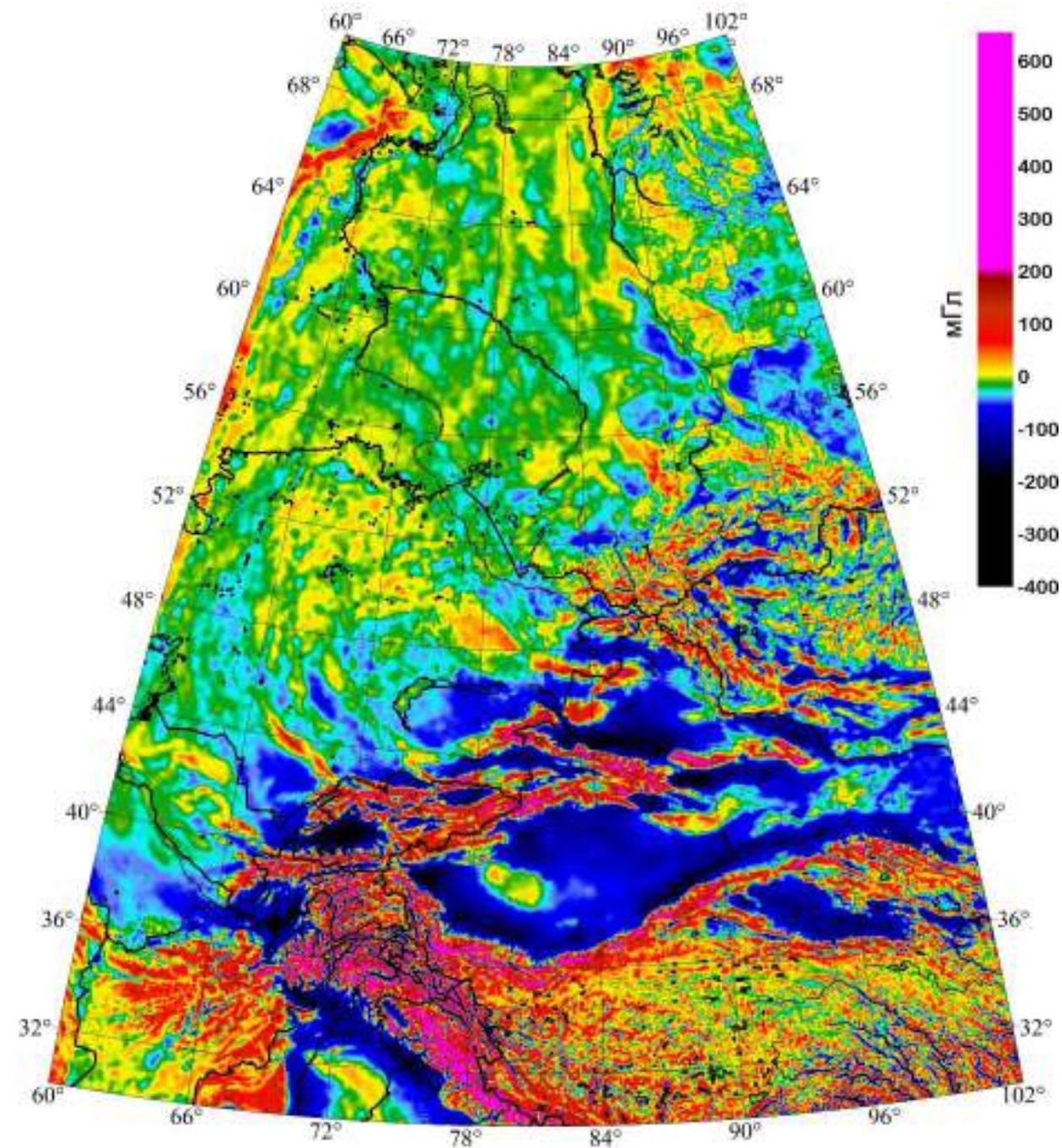
Расположение района исследований в общей структуре района Высокой Азии.

Впадины: 1 — Таджикская, 2 — Ферганская, 3 — Иссык-Кульская, 4 — Илийская, 5 — Джунгарская, 6 — Алакульская, 7, 8 — Зайсанская, 9 — Турфанская.

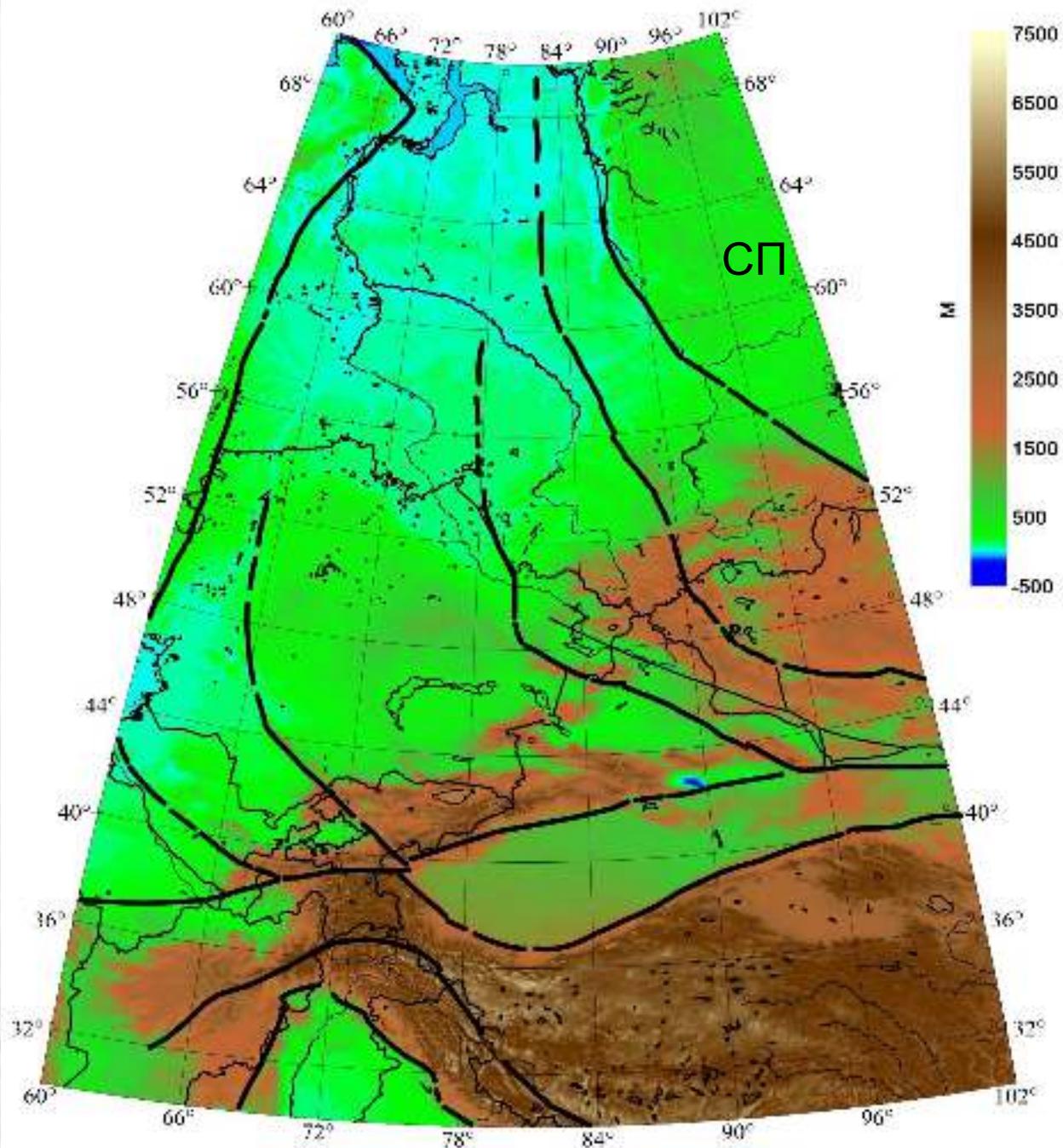


**Реконструкция
космического снимка
южной части долины пра-
Иордана (к югу от Мертвого
моря)**

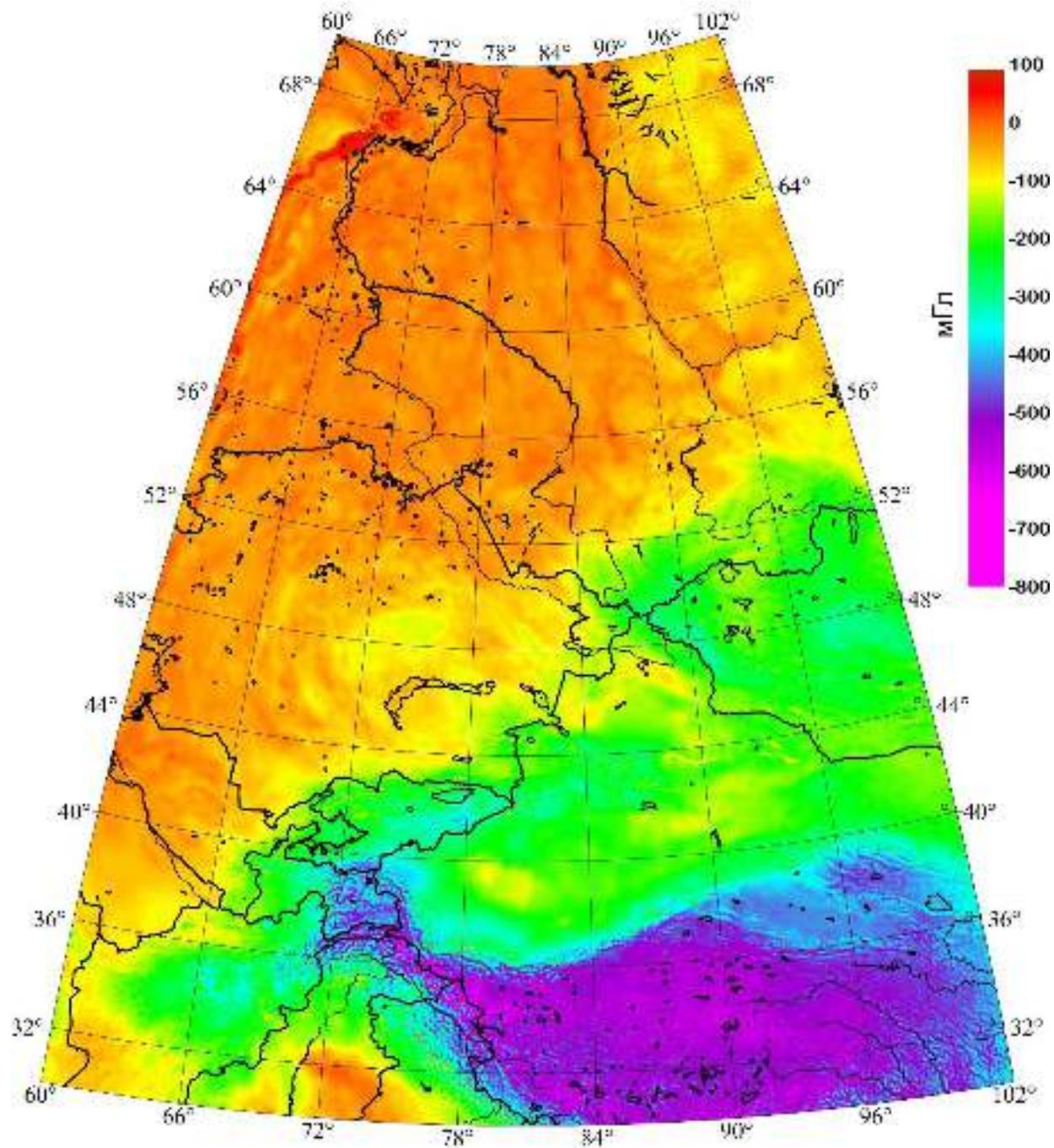
Аномалии Фая



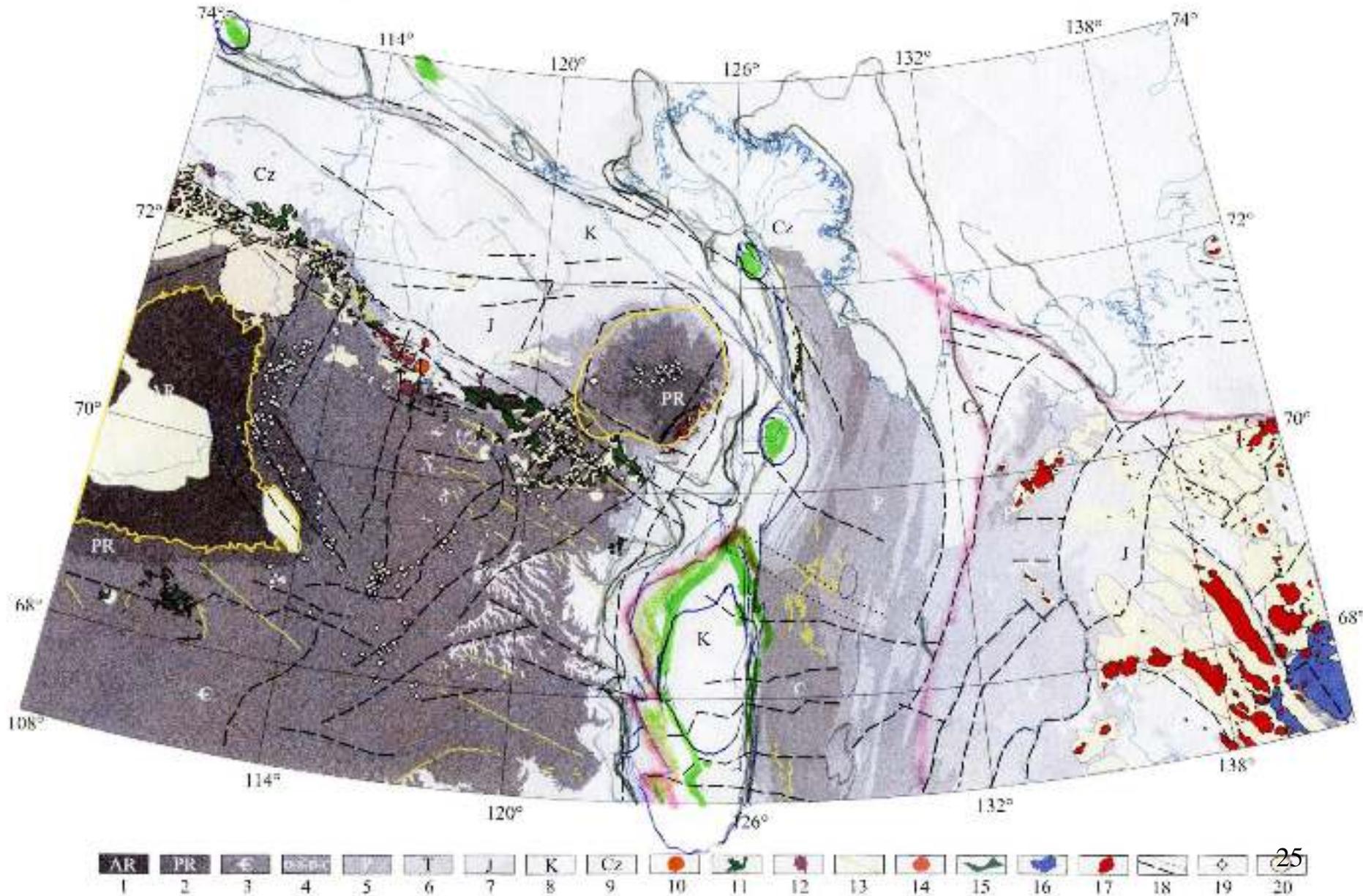
Рельеф дневной поверхности



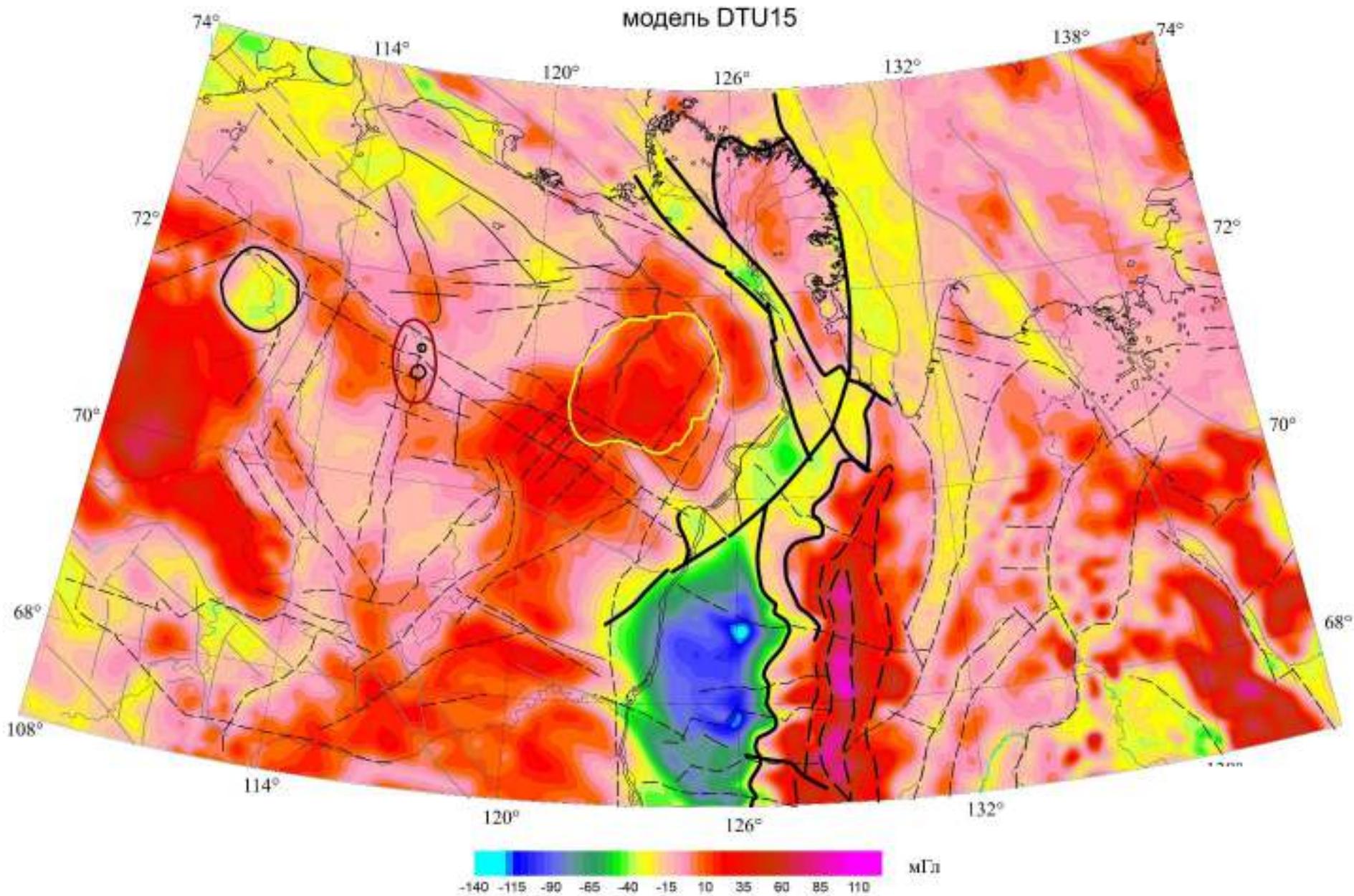
Аномалии Буге

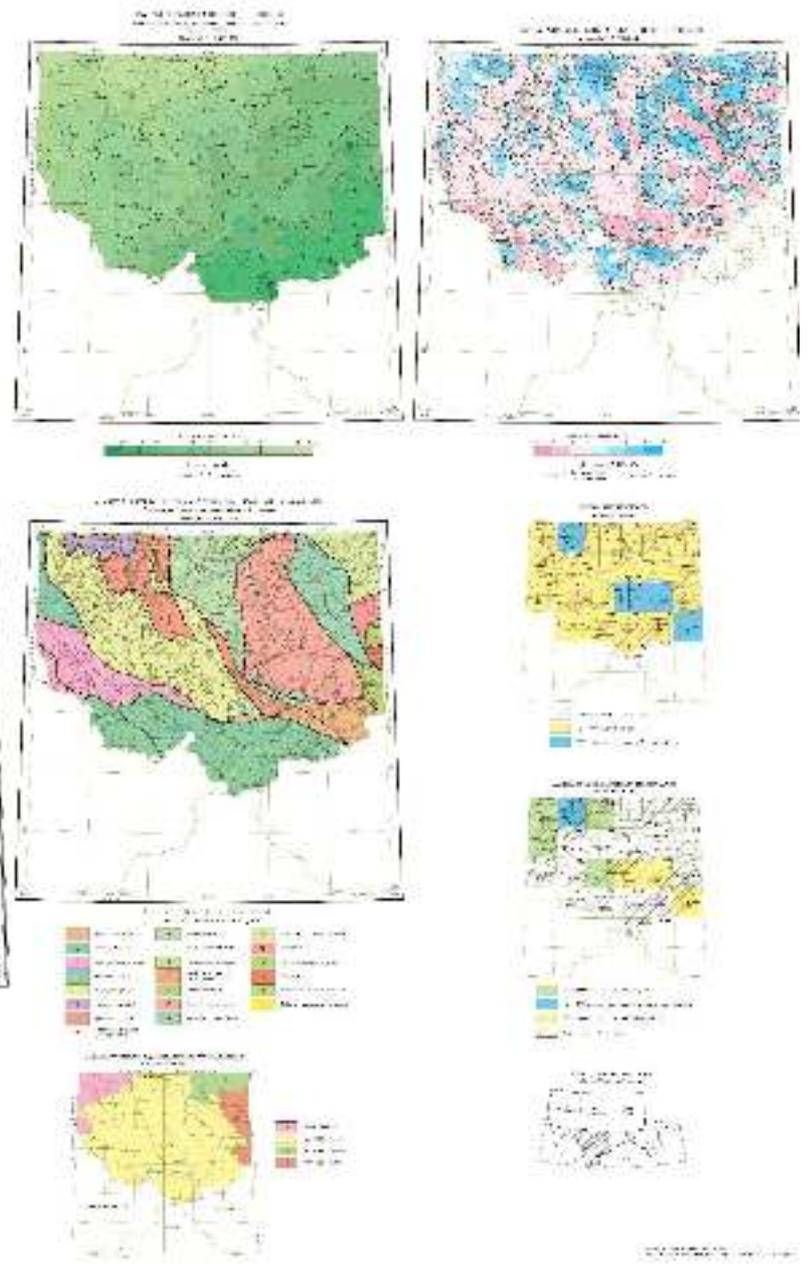
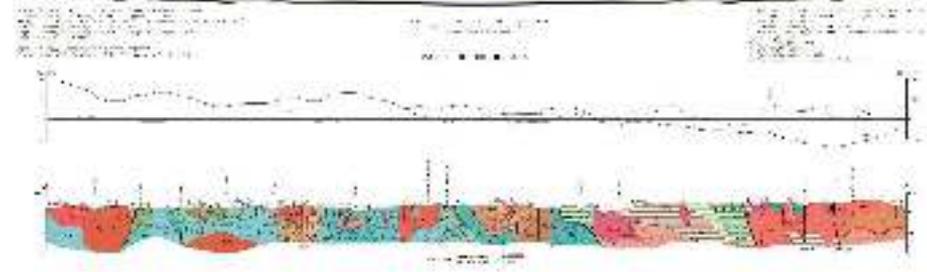


Геологическая карта северо-восточной части Сибирской платформы

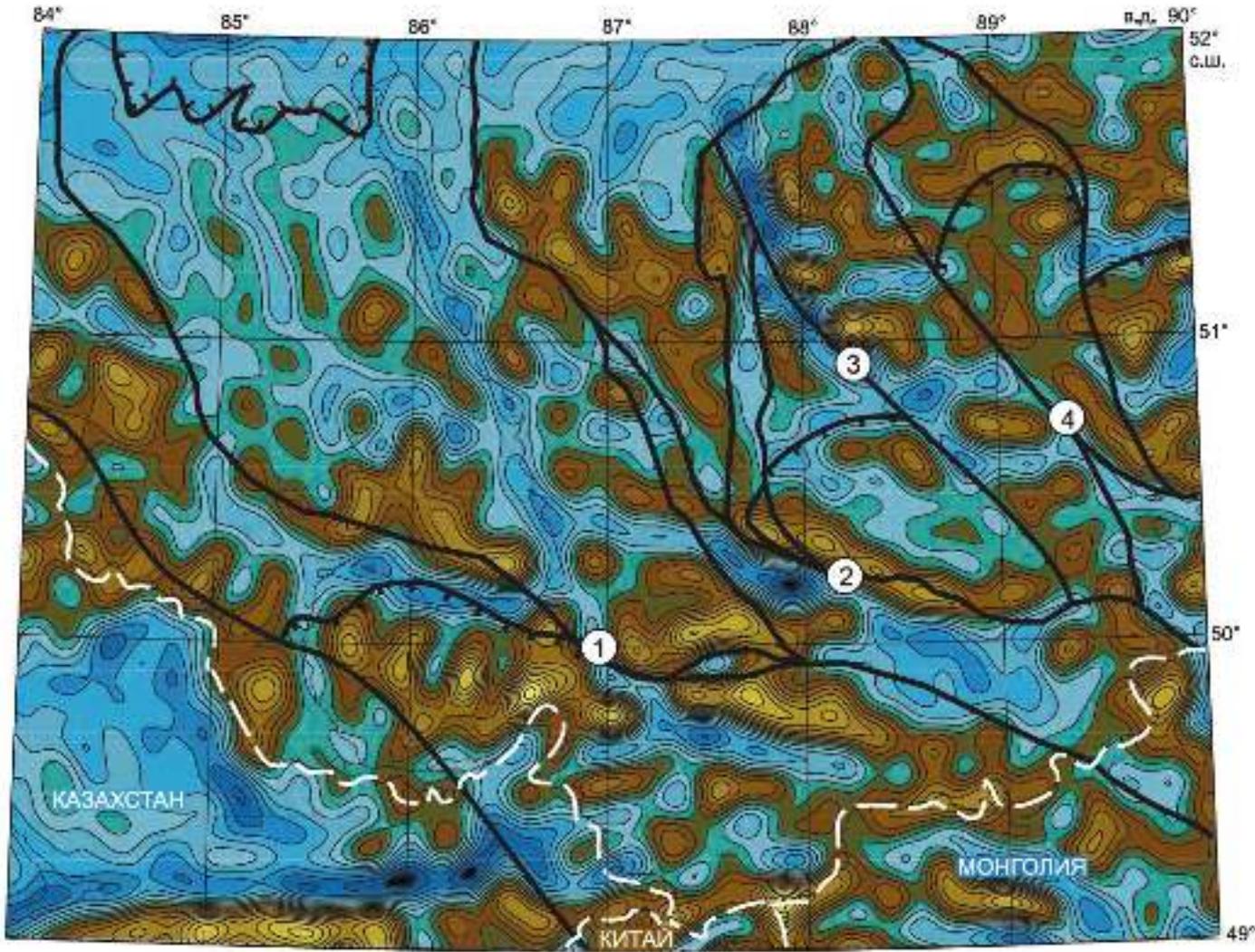


Аномалии Фая северо-восточной части Сибирской платформы



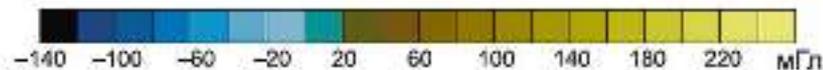


Фрагмент карты гравитационных аномалий Горного Алтая по данным модели DNSC14 (Andersen et al., 2014).



Региональные
позднепалеозойские
сдвиги:

- 1-Чарышско-Теректинский,
- 2-Курайский,
- 3-Телецко-Башкауский,
- 4-Шапшальский

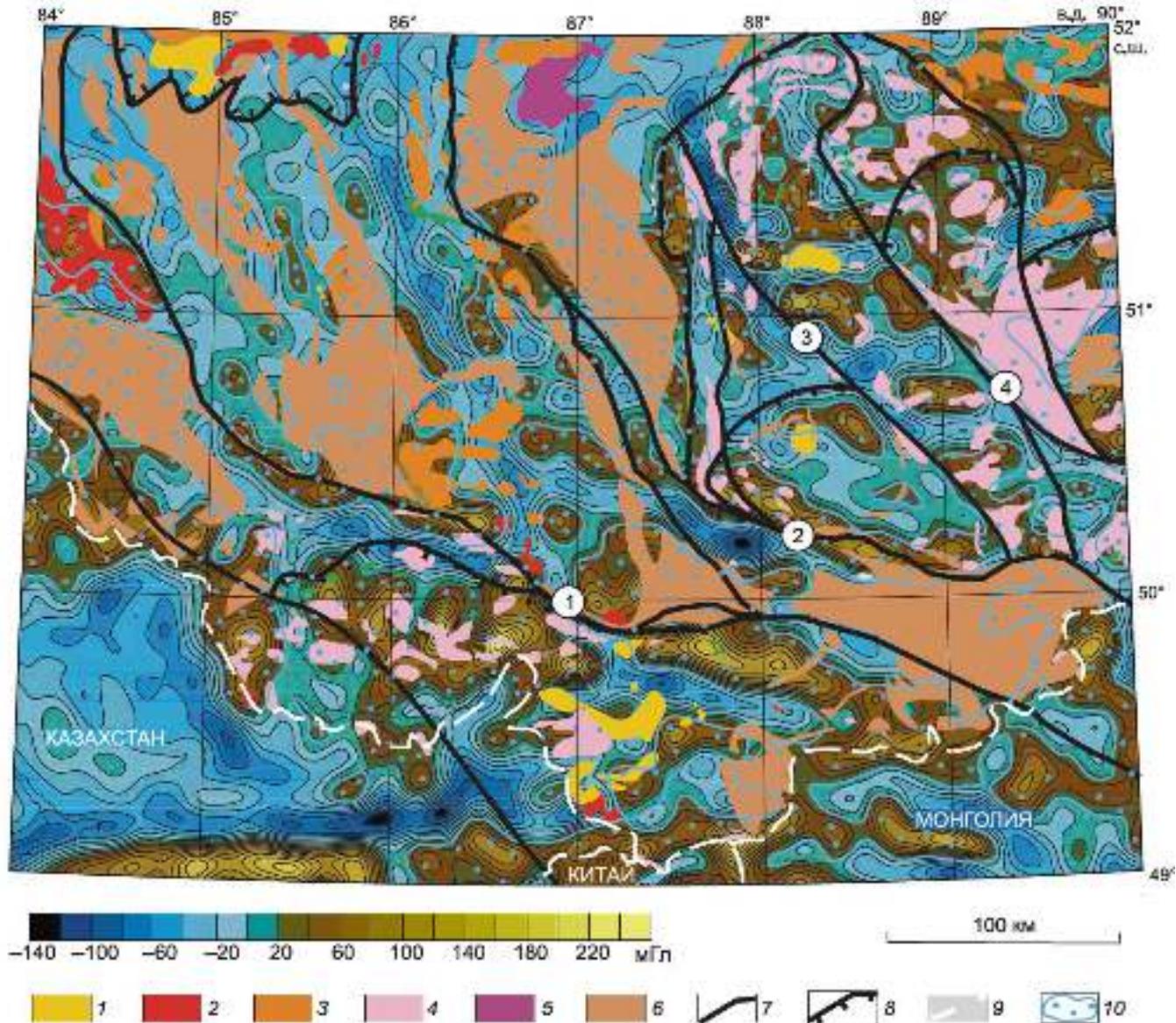


100 км

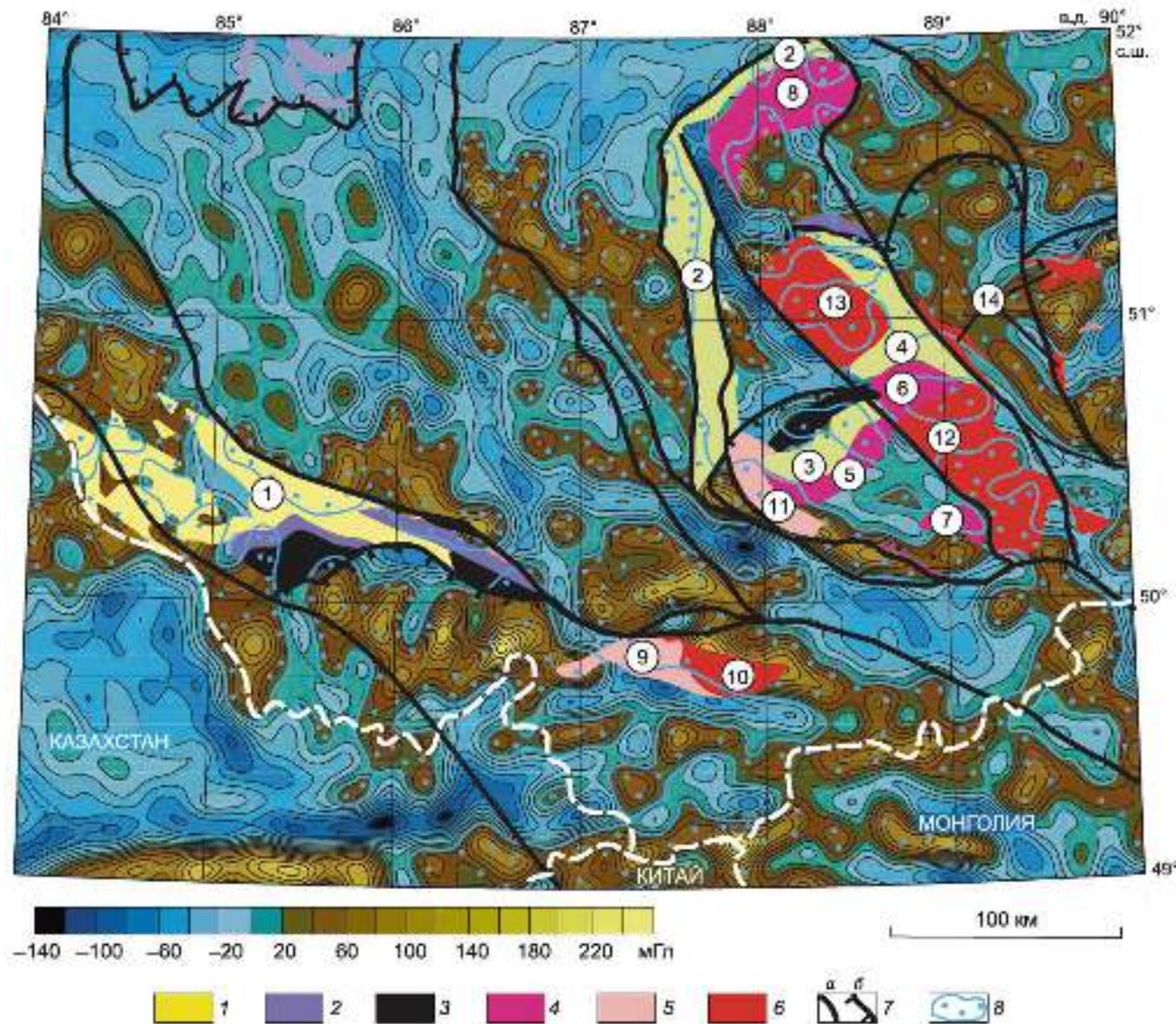


1-региональные позднепалеозойские сдвиги;
2-ранне-позднепалеозойские надвиги;
3-линии государственных границ

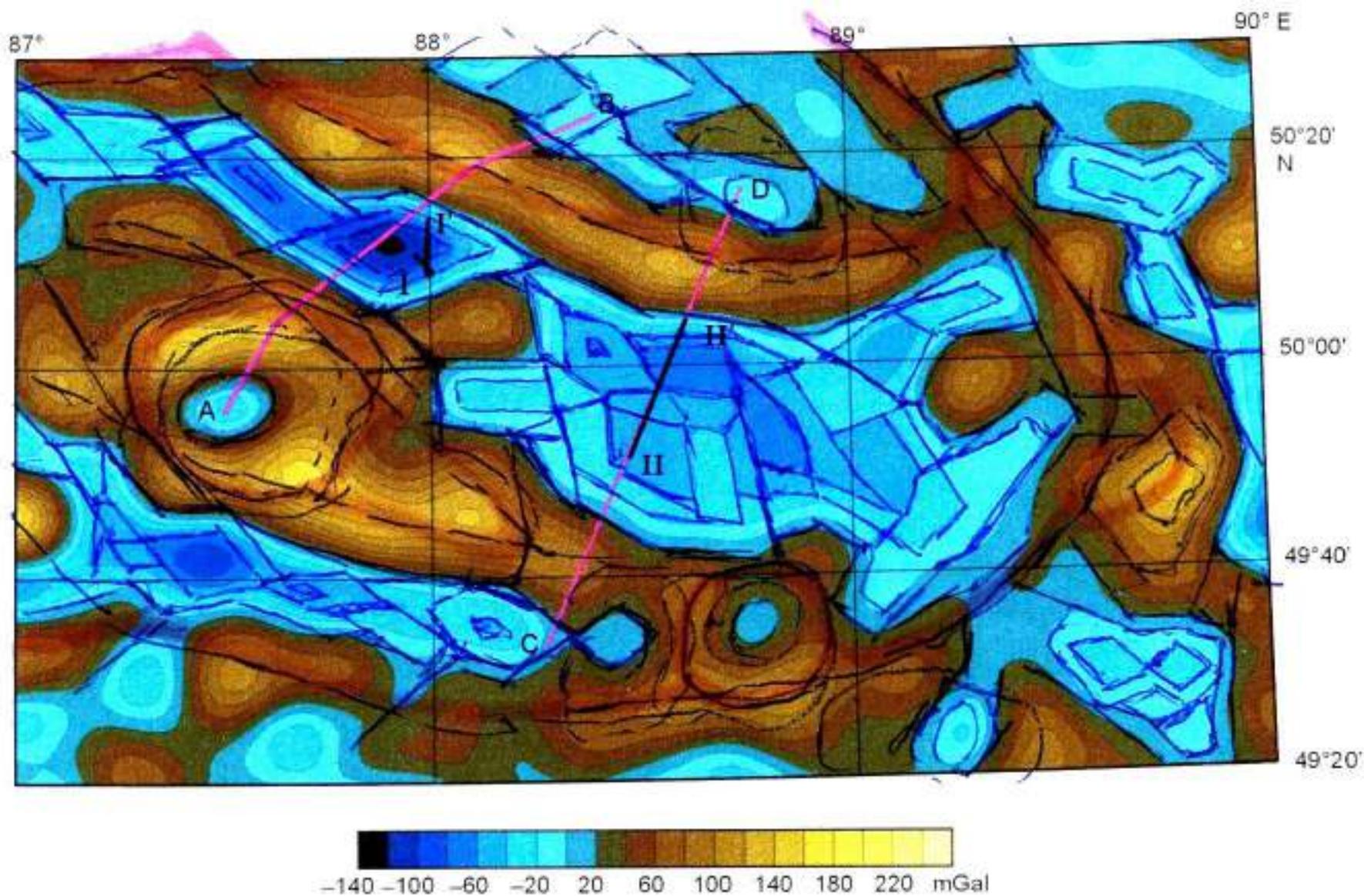
Размещение магматических и девонских вулканогенно-осадочных пород на карте гравитационных аномалий Горного Алтая по данным модели DNSC14 (Andersen et al., 2014)



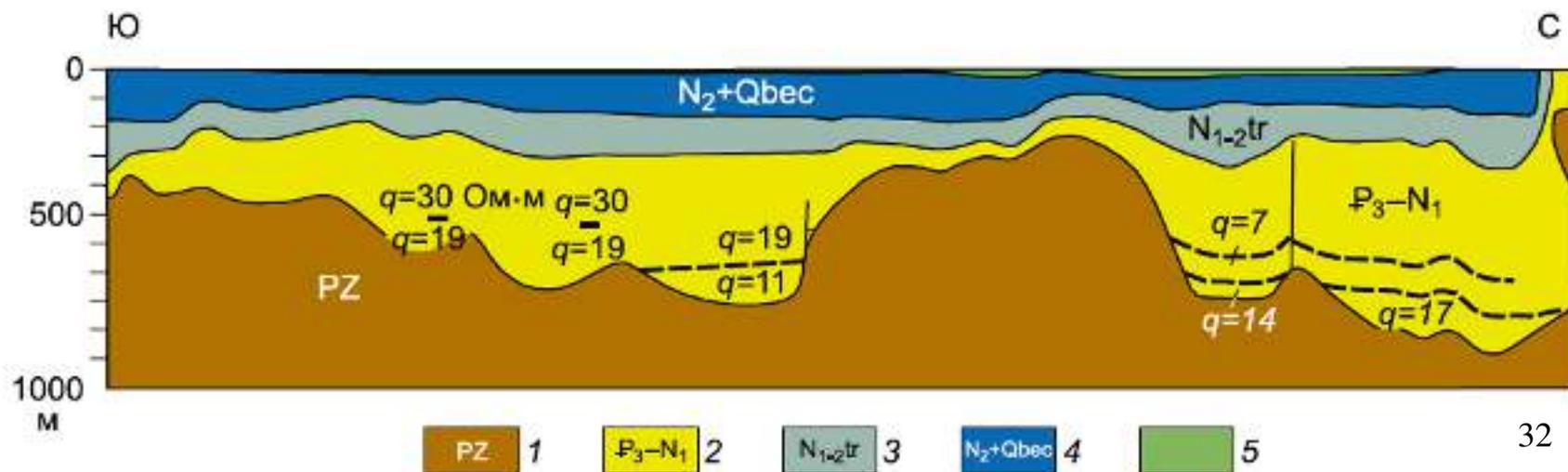
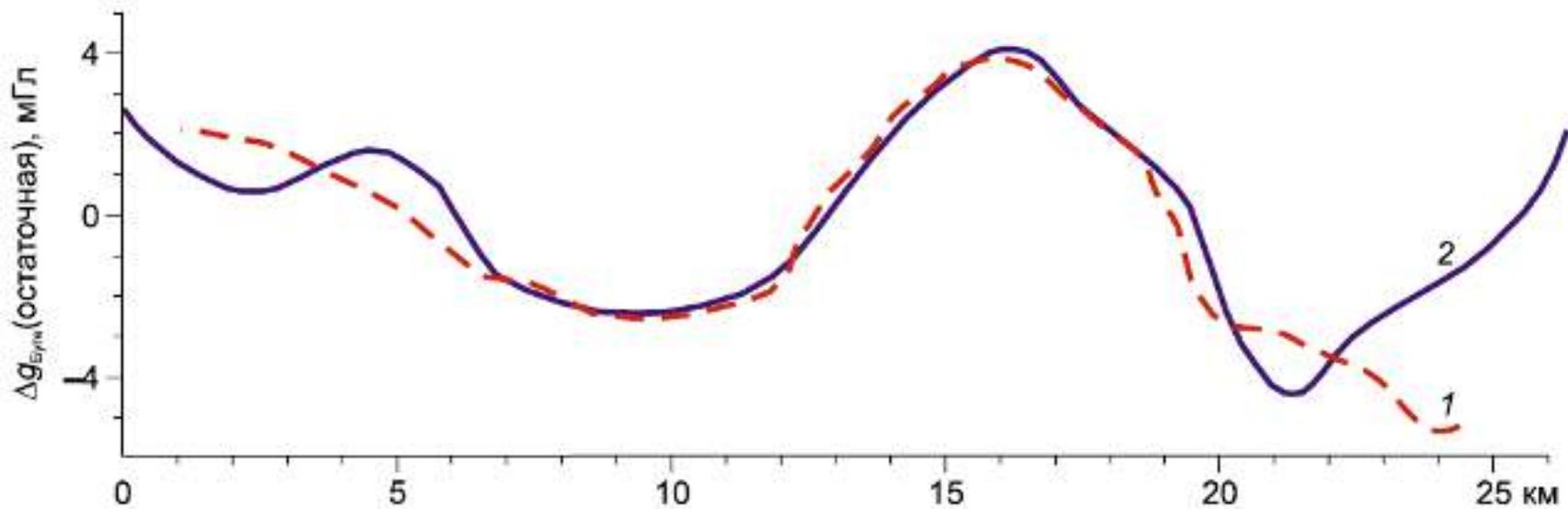
Размещение средне-позднепалеозойских метаморфических комплексов на карте гравитационных аномалий Горного Алтая по данным модели DNSC14 (Andersen et al., 2014)



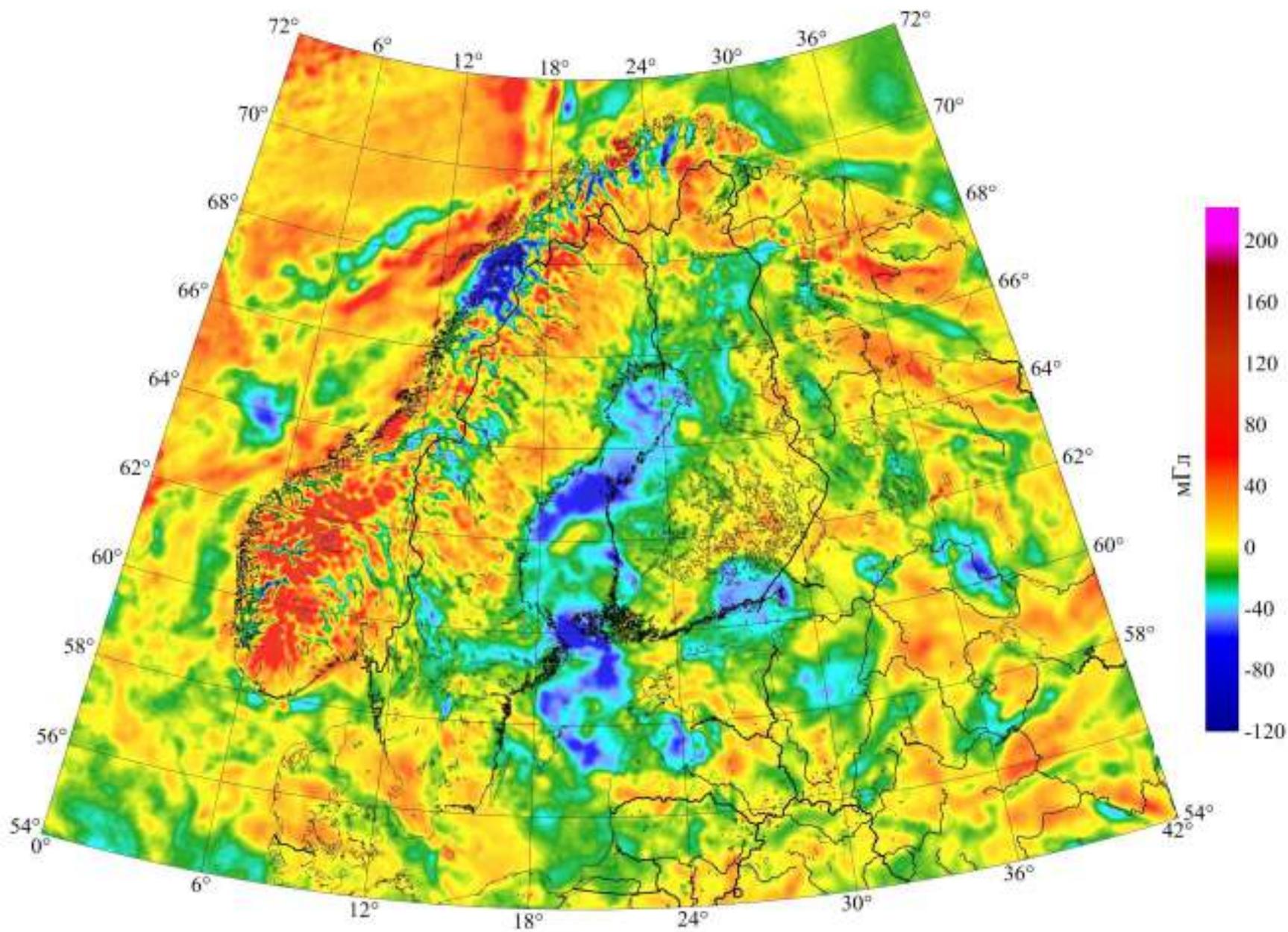
Впадины Горного Алтая и гравитационные аномалии Фая



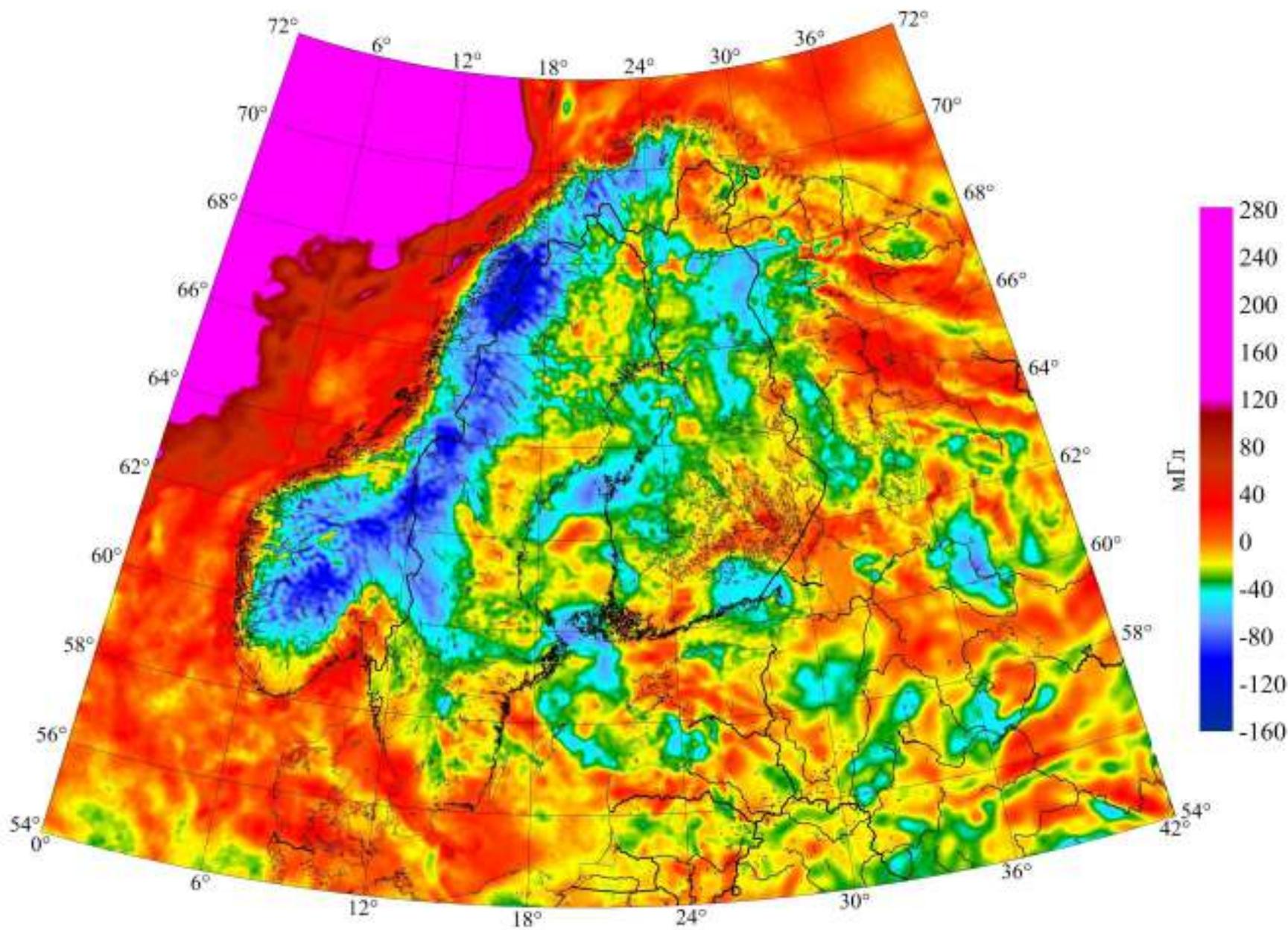
Геоэлектрический разрез Чуйской впадины и гравитационный эффект кайнозойских осадков



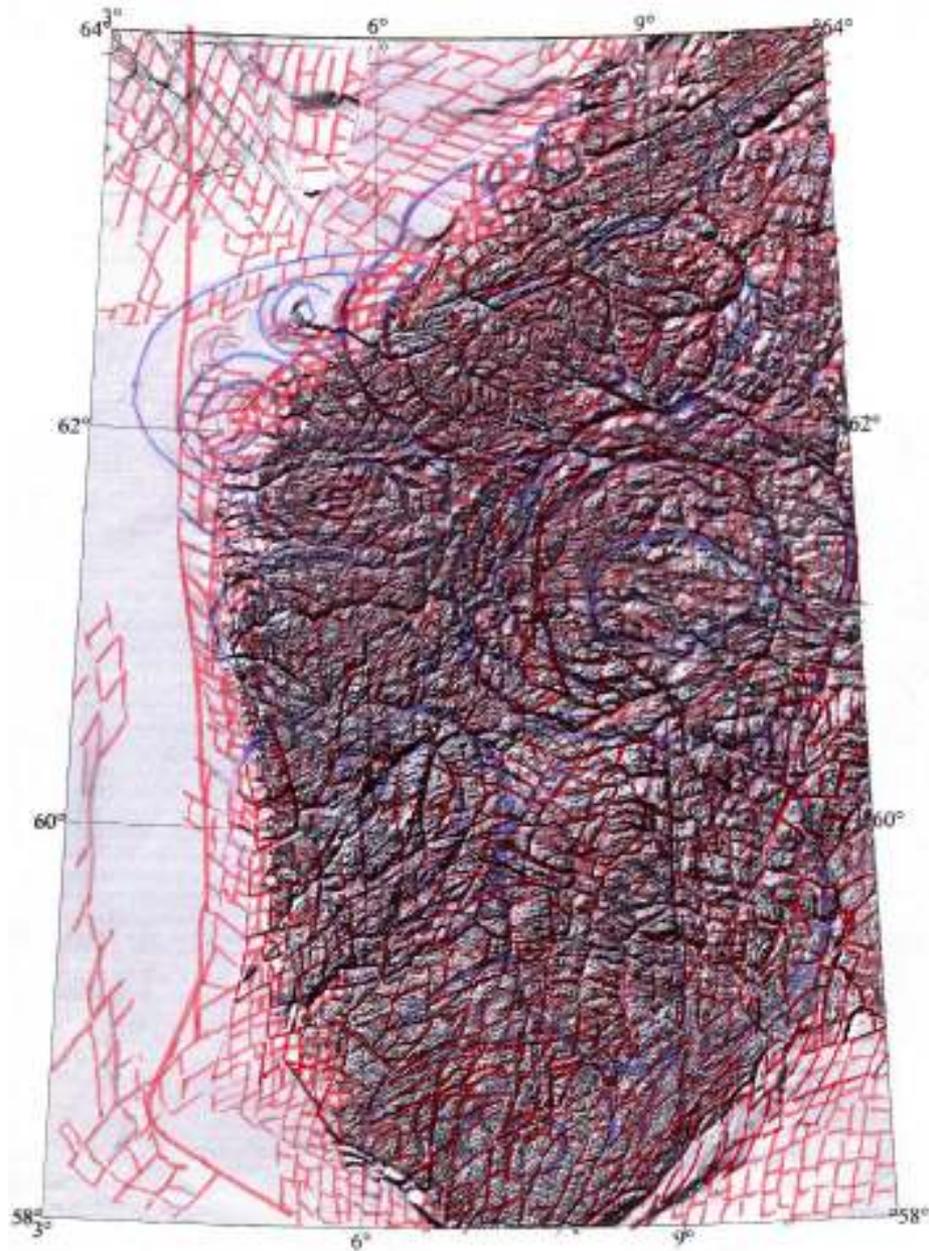
Скандинавия: аномалии Фая



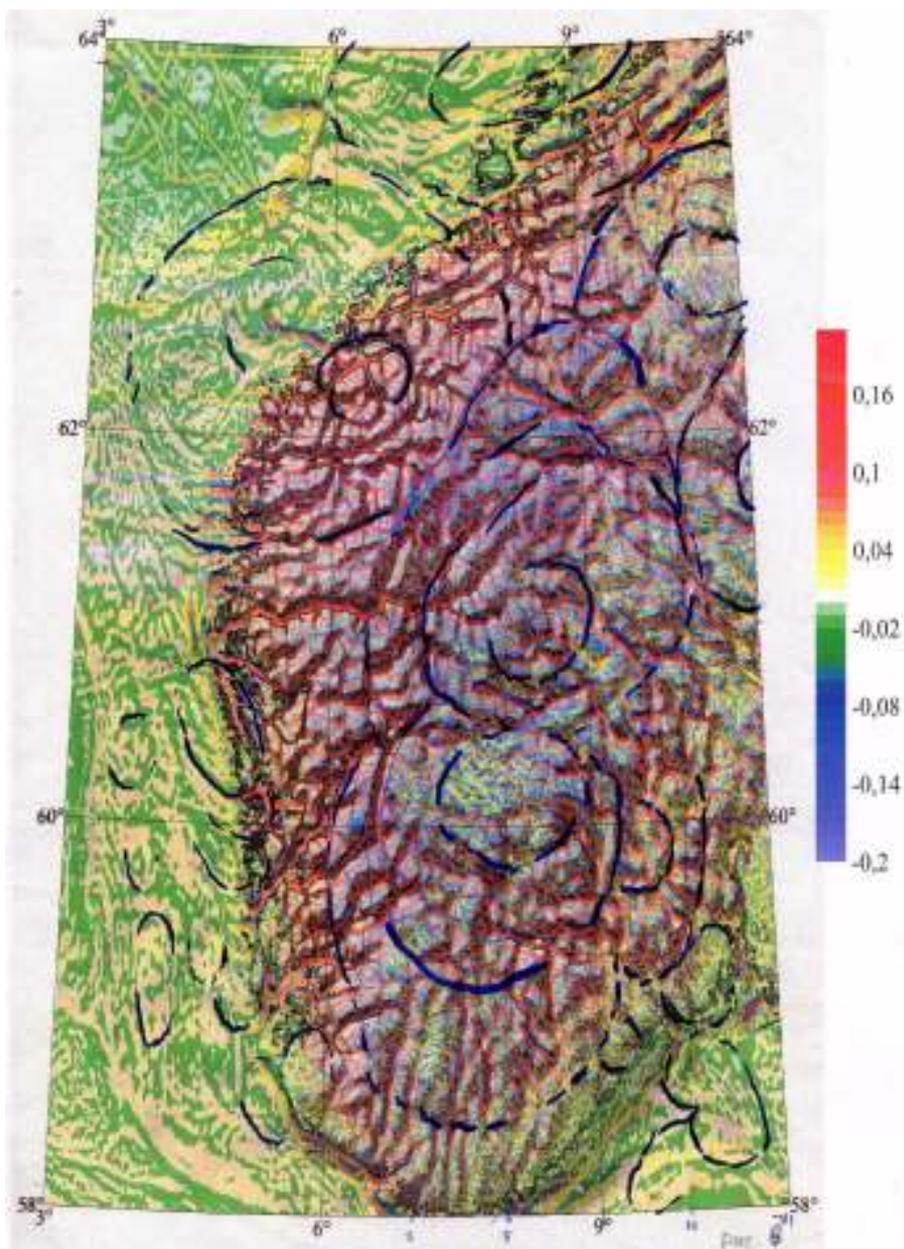
Скандинавия: аномалии Буге



Теневая карта рельефа западной части Скандинавии

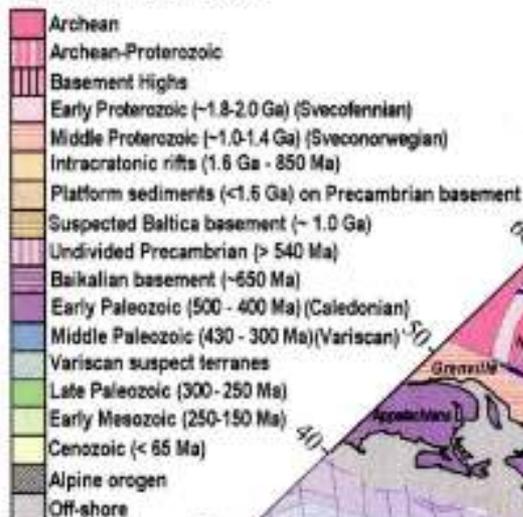


Теневая карта рельефа западной части Скандинавии с наложенным полем двумерного лапласиана рельефа



Тектоническая карта Европы, Гренландии и Северной Атлантики

Age of continental crust

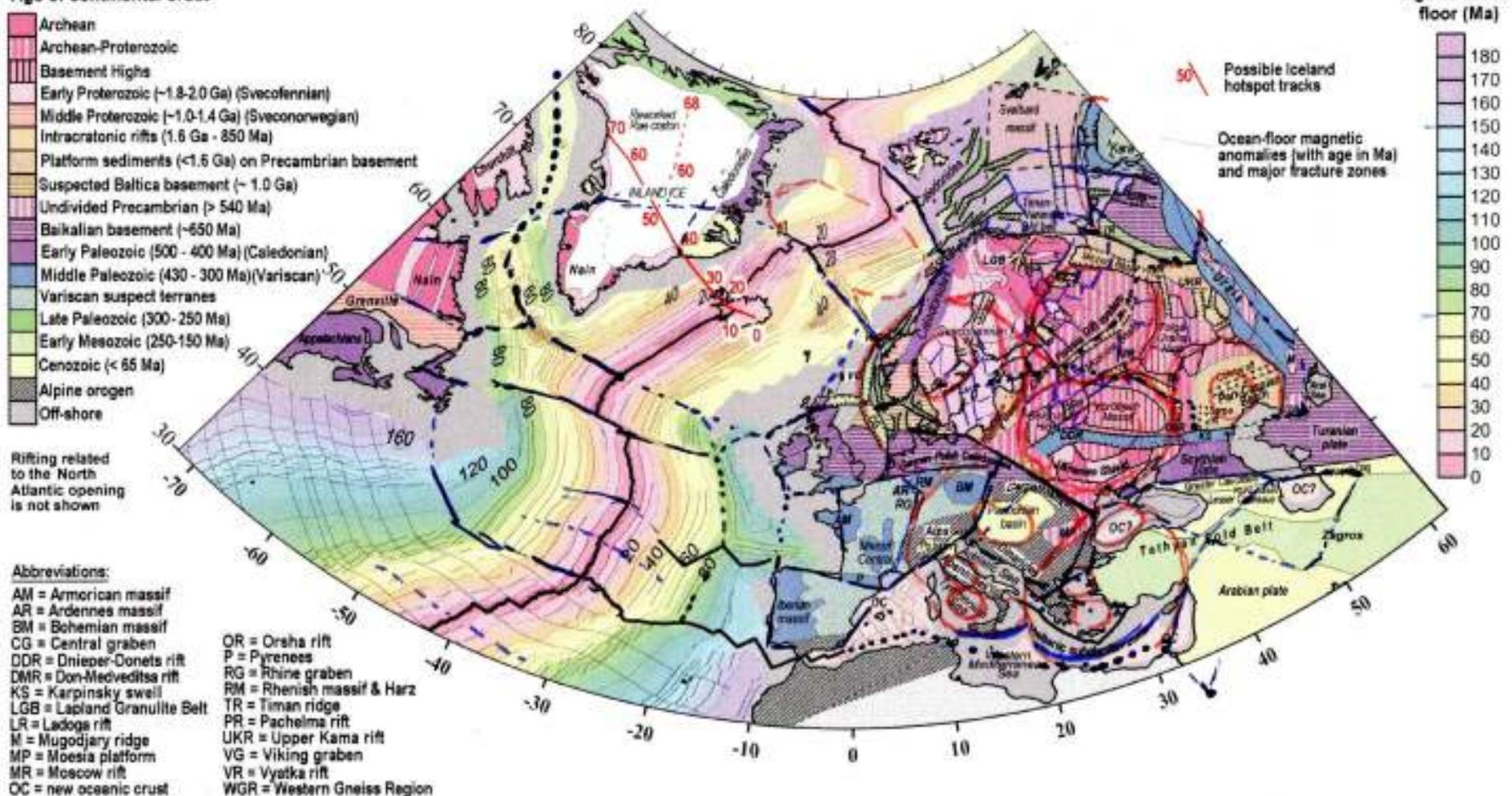


Rifting related to the North Atlantic opening is not shown

Abbreviations:

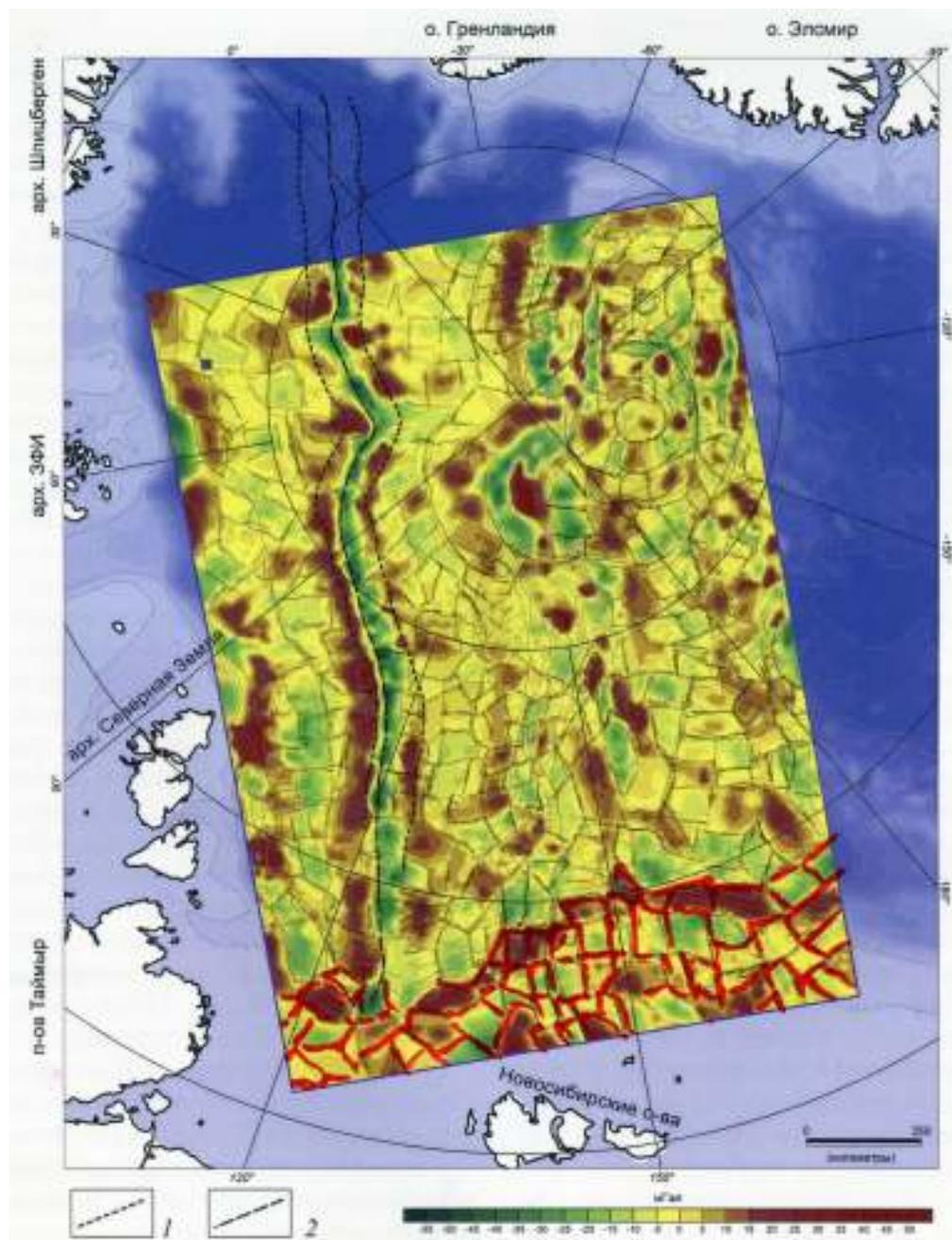
- AM = Armorican massif
- AR = Ardennes massif
- BM = Bohemian massif
- CG = Central graben
- DDR = Dnieper-Donets rift
- DMR = Don-Medveditsa rift
- KS = Karpinsky swell
- LGB = Lapland Granulite Belt
- LR = Ladoga rift
- M = Mugodjary ridge
- MP = Moesia platform
- MR = Moscow rift
- OC = new oceanic crust
- OR = Orsha rift
- P = Pyrenees
- RG = Rhine graben
- RM = Rhenish massif & Harz
- TR = Timan ridge
- PR = Pachelma rift
- UKR = Upper Kama rift
- VG = Viking graben
- VR = Vyatka rift
- WGR = Western Gneiss Region

Tectonic map of Europe, Greenland, and the North Atlantic region

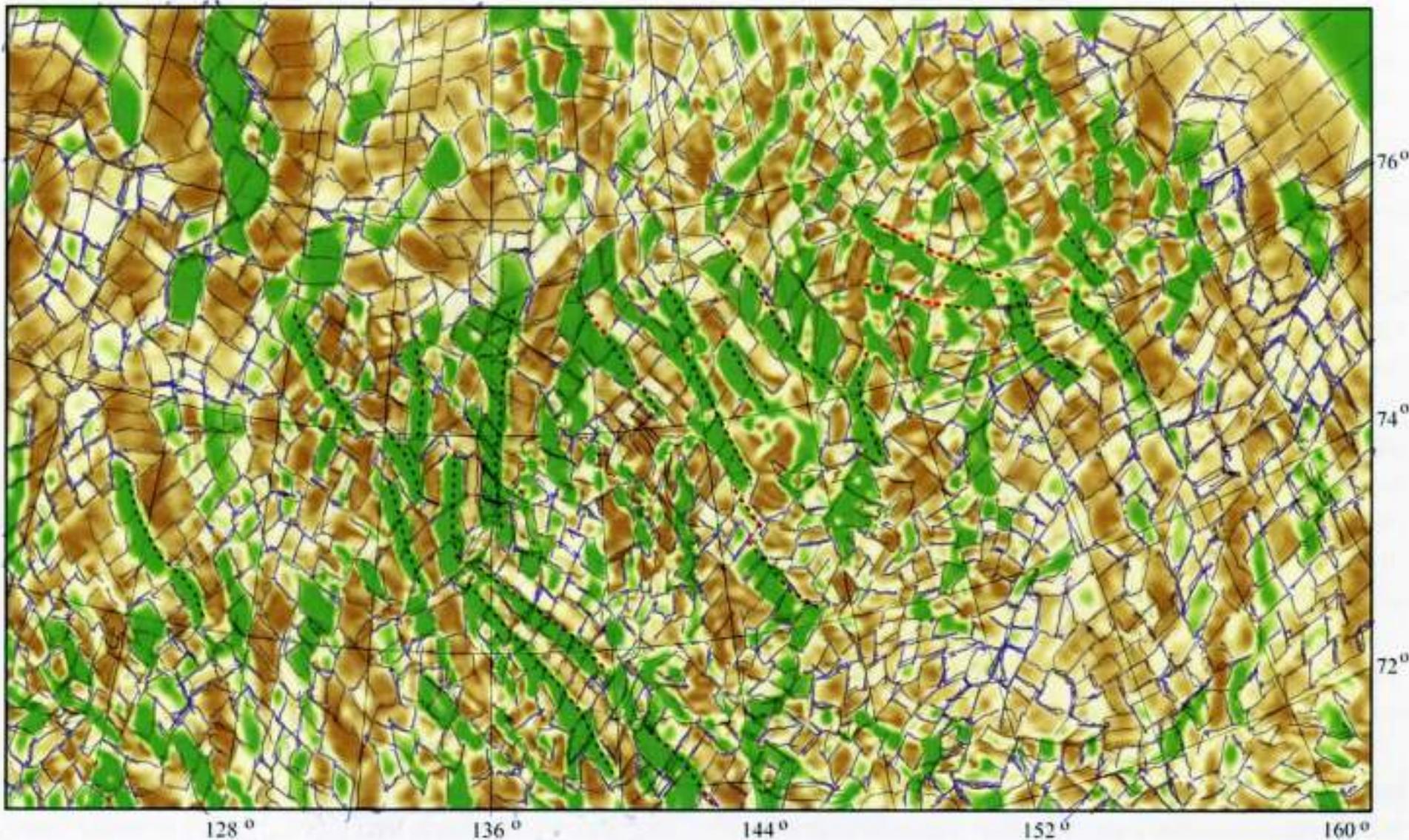


Tectonic map of Europe, Greenland, and the North Atlantic Ocean (compilation based on various sources). The color codes for the Phanerozoic continents and oceans are adjusted to facilitate comparison. For the continents, the map shows tectono-thermal (not juvenile) ages of the crust (updated from different sources and modified after Artemieva et al., 2006). Ages of the oceanic crust are based on a global compilation of Müller (2002). Suspected oceanic crust in the western Black Sea and the southern Caspian Sea is marked by question marks (Belousov et al., 1988; Zonenshain and Le Pichon, 1986). Red lines – proposed tracks of Iceland hotspot (numbers – ages in My); solid line – for fixed hotspot (Lawver and Muller, 1994) and dashed line – for moving hotspots in a corrected paleomagnetic frame (Torvik et al., 2008). Off-shore regions without magnetic anomalies (the shelves with bathymetry typically shallower than 400 m) are shaded gray. Inferred terranes of the Barents Sea shelf (Pre-Neoproterozoic Svalbard massif and White Sea, Neoproterozoic Timan-Varanger Fold belt, Caledonian West Barents Sea, and Early Mesozoic Noviya Zemiya Fold belt) are after Drachev et al. (2010).

Схема гравитационных аномалий с периодом $T < 200$ км

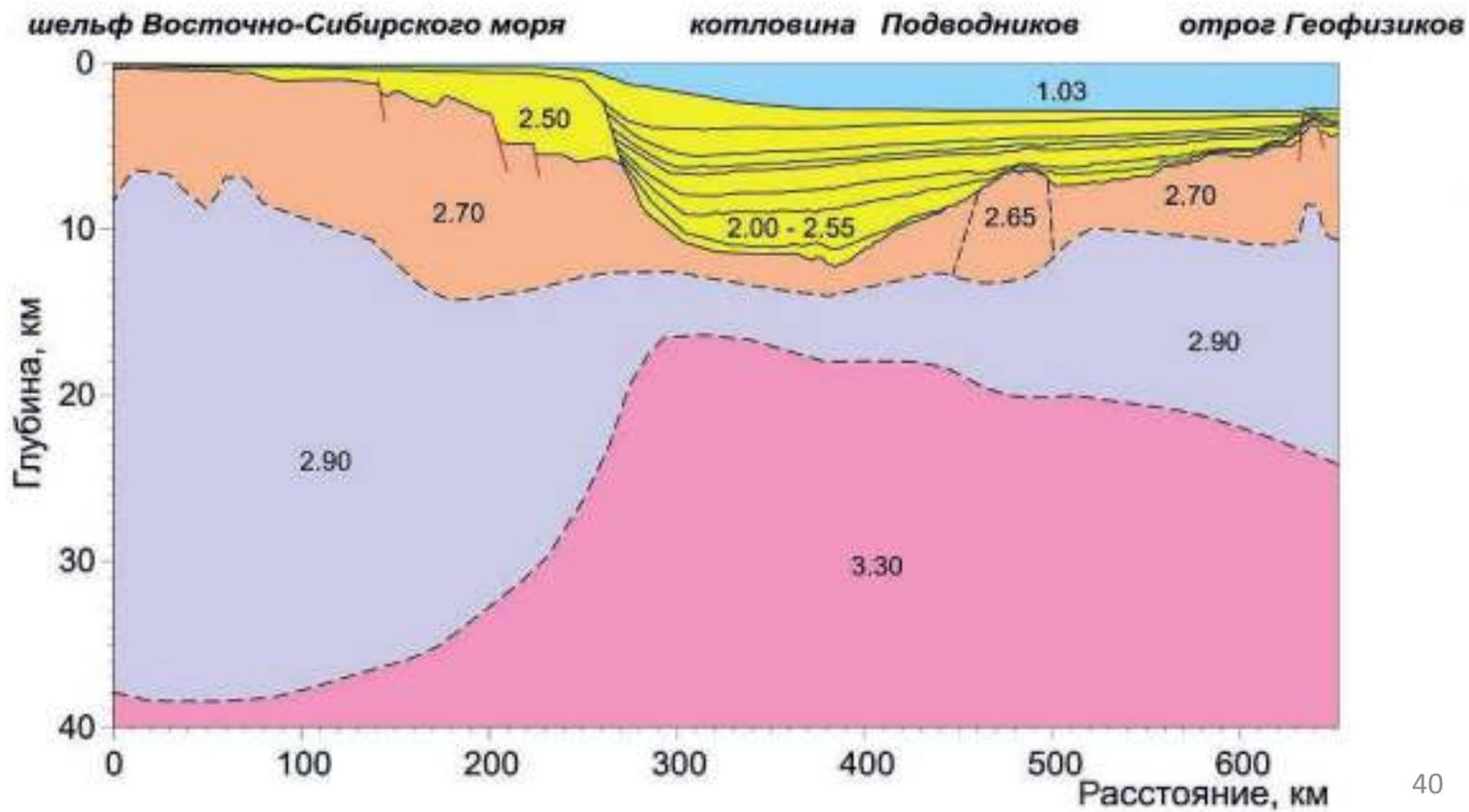
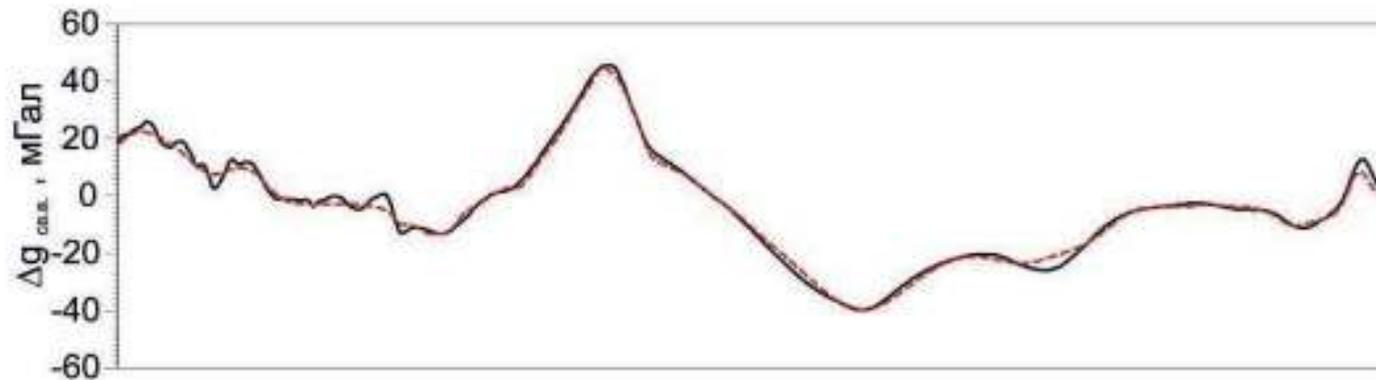


Карта теневого рельефа остаточных гравитационных аномалий шельфа морей Лаптевых и Восточно-Сибирского.

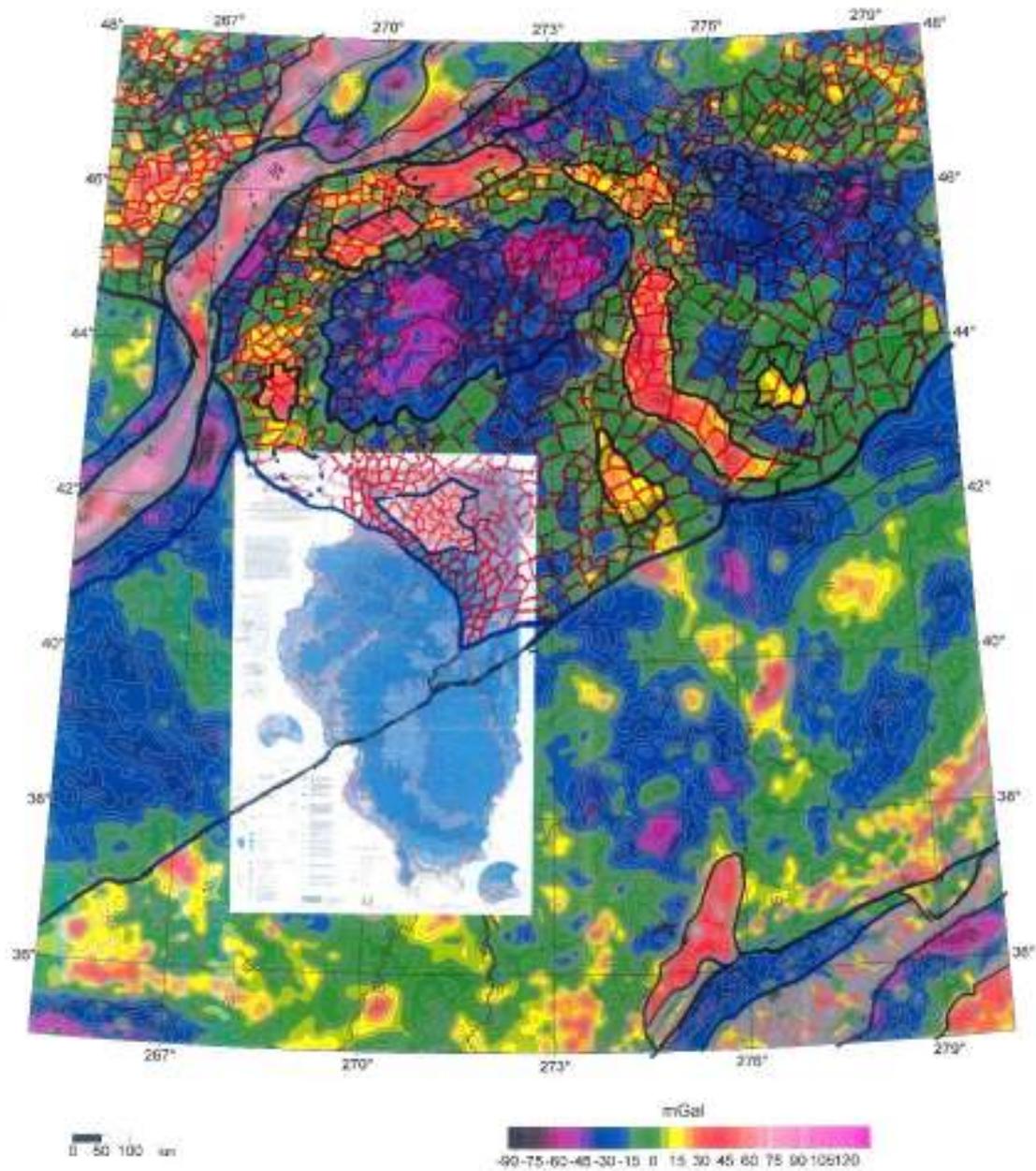


Пунктирные линии — оси грабенов, заполненных молодыми неуплотненными осадками
Период аномалий $T < 200$ км, освещение слева.

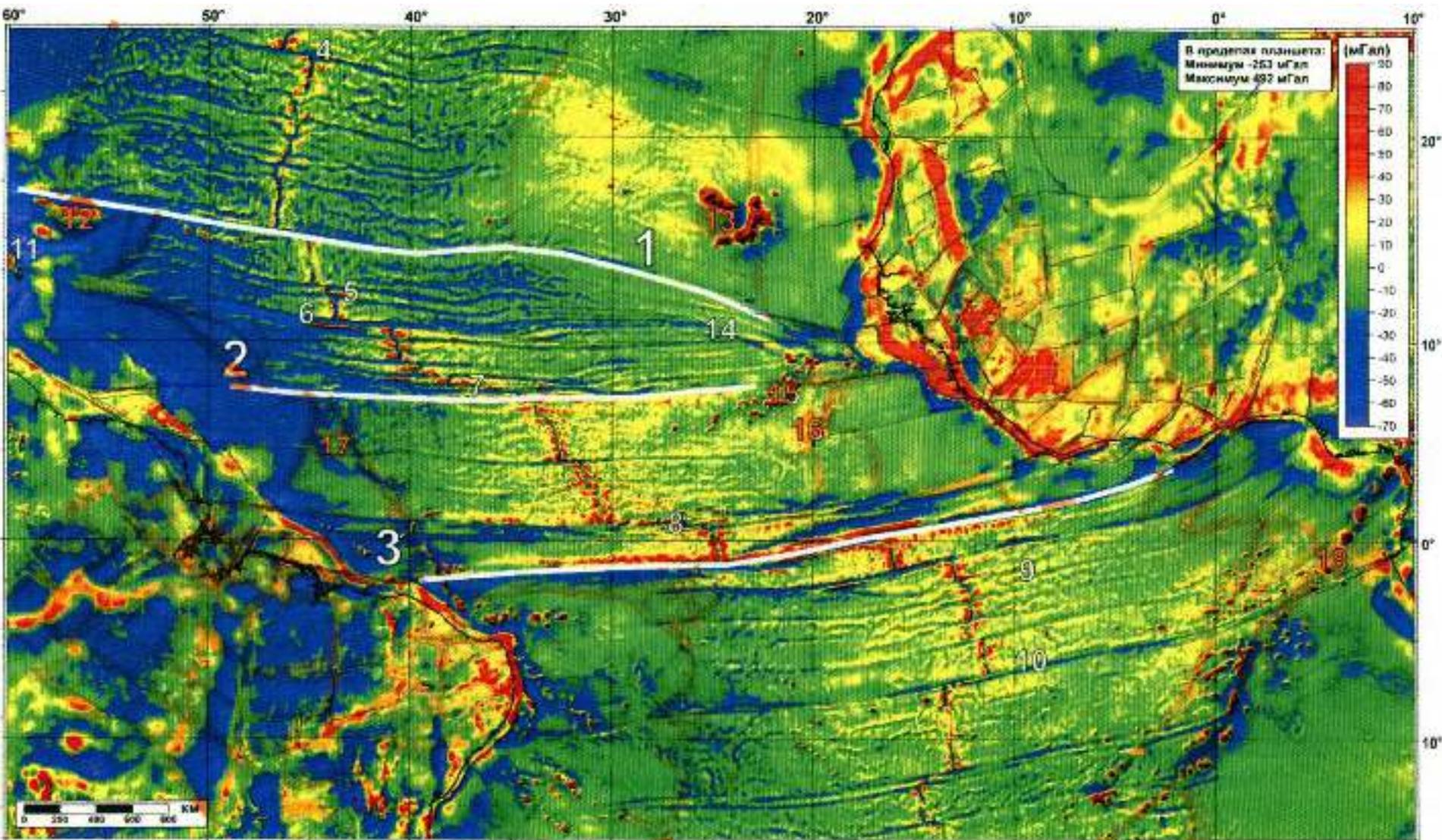
Глубинная сейсмогравитационная модель



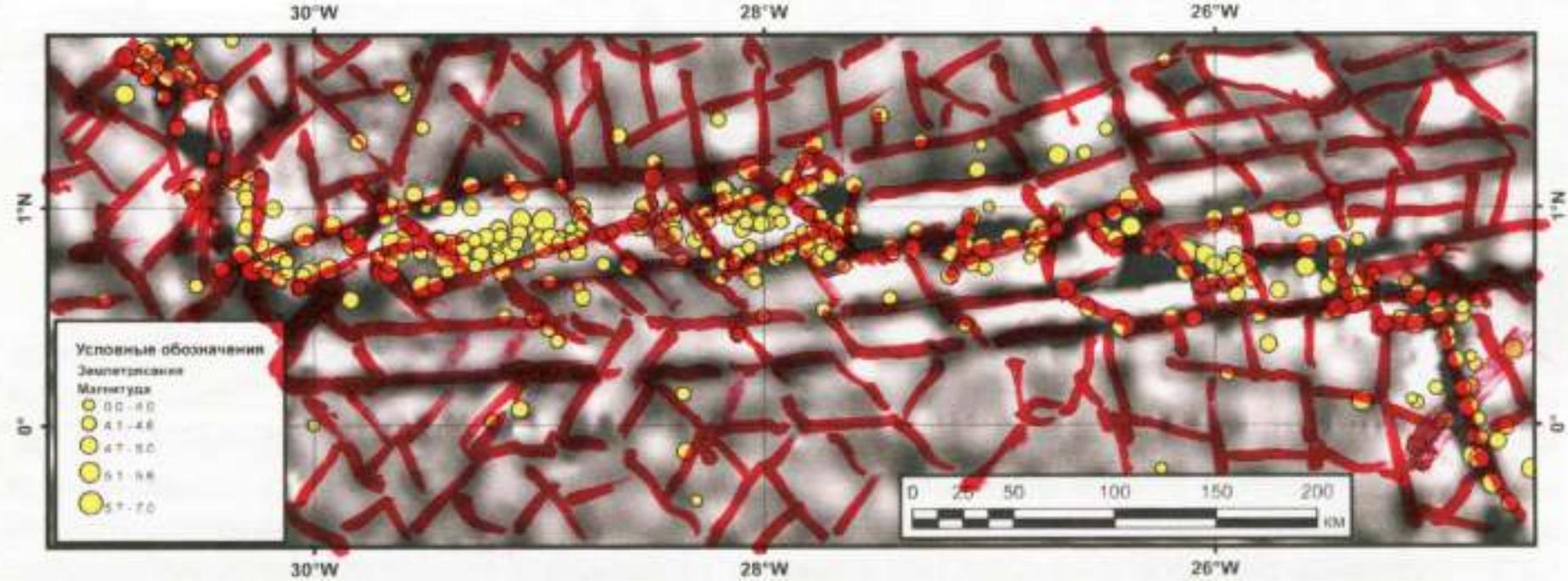
Гравитационное поле



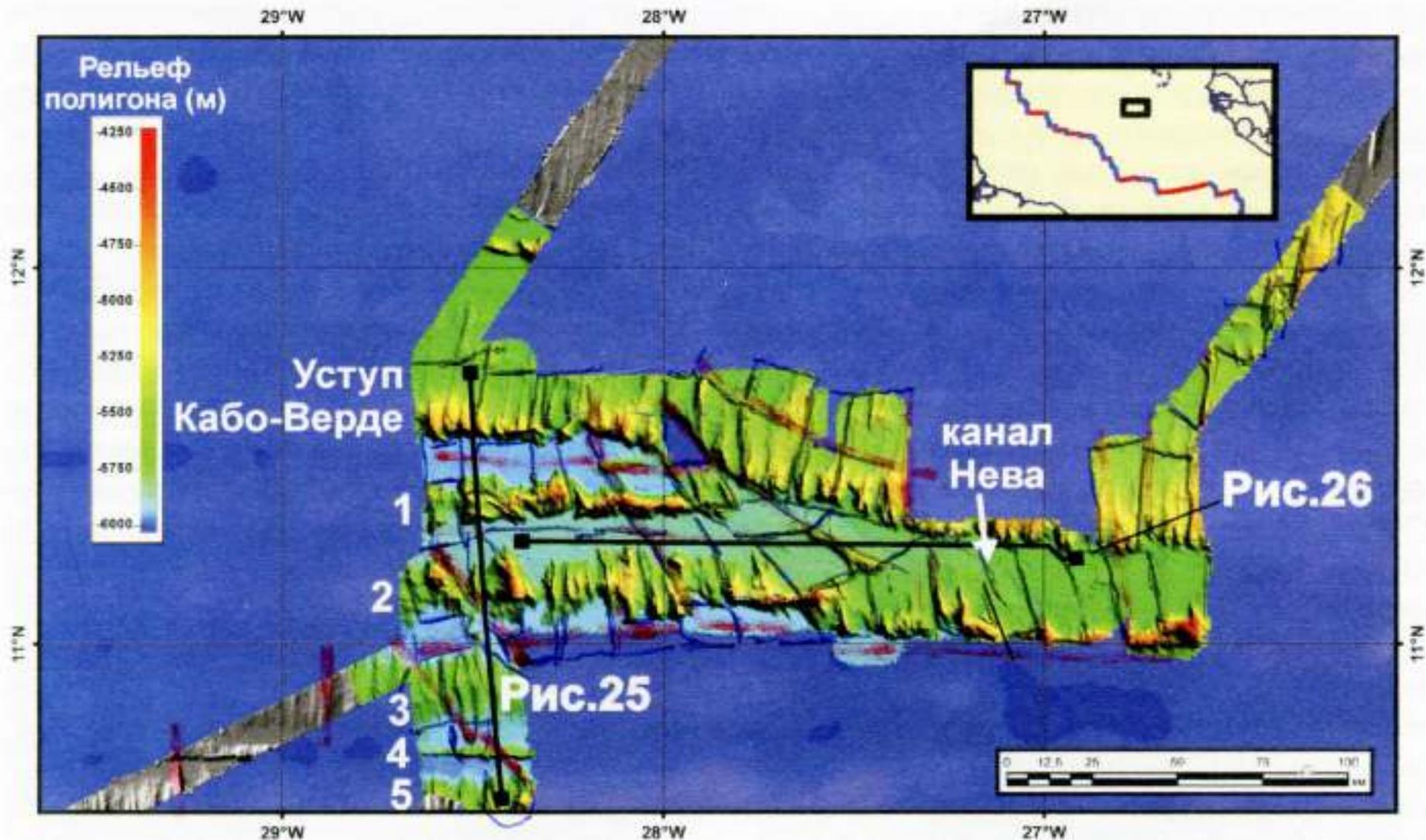
Атлантика: аномалии силы тяжести в свободном воздухе



Сейсмичность полиразломной трансформной системы Сан-Паулу



Район уступа Кабо-Верди: теневой рельеф многолучевого эхолота



Разрез вкрест хребтов к югу от уступа Кабо-Верди

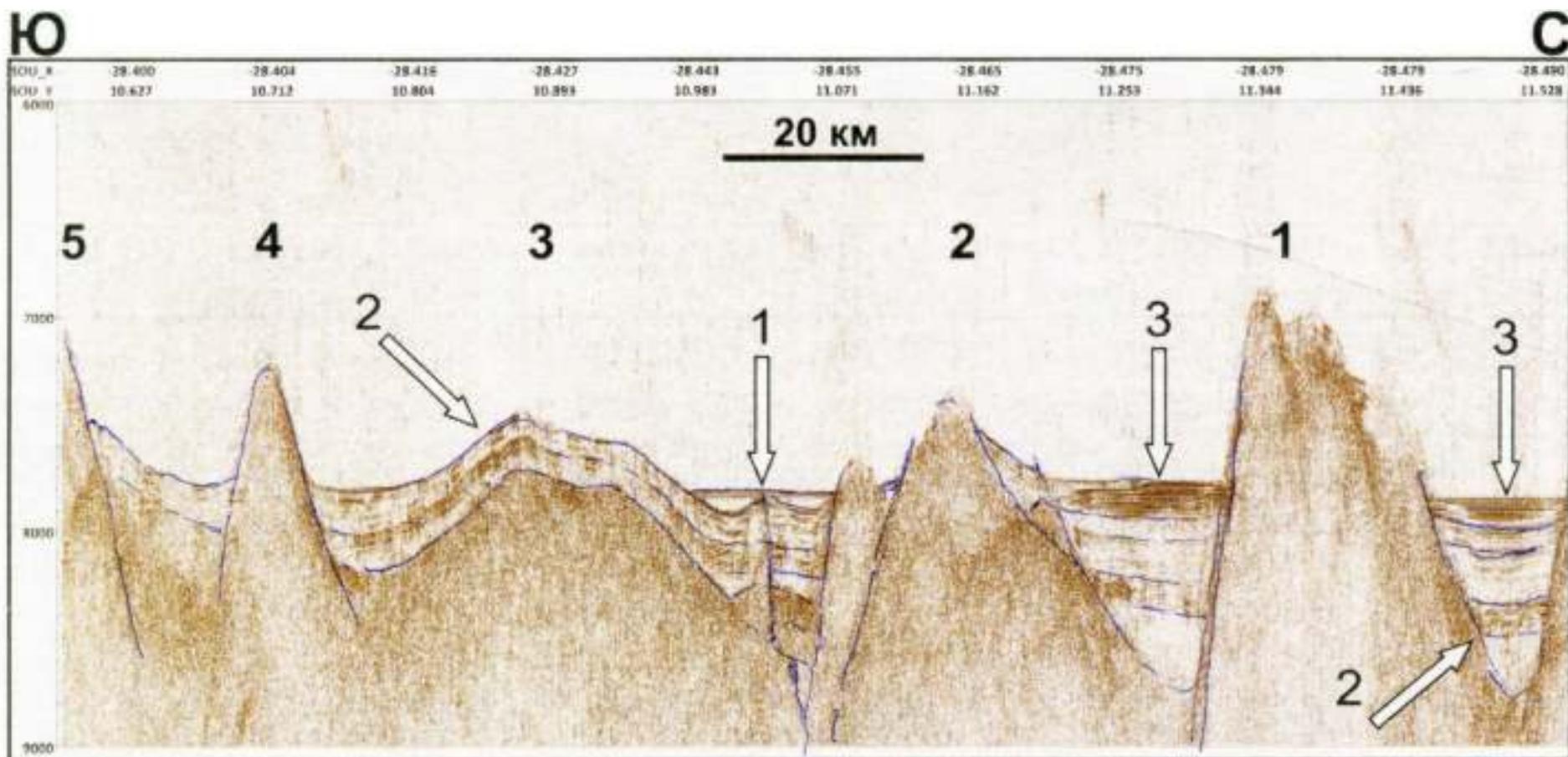
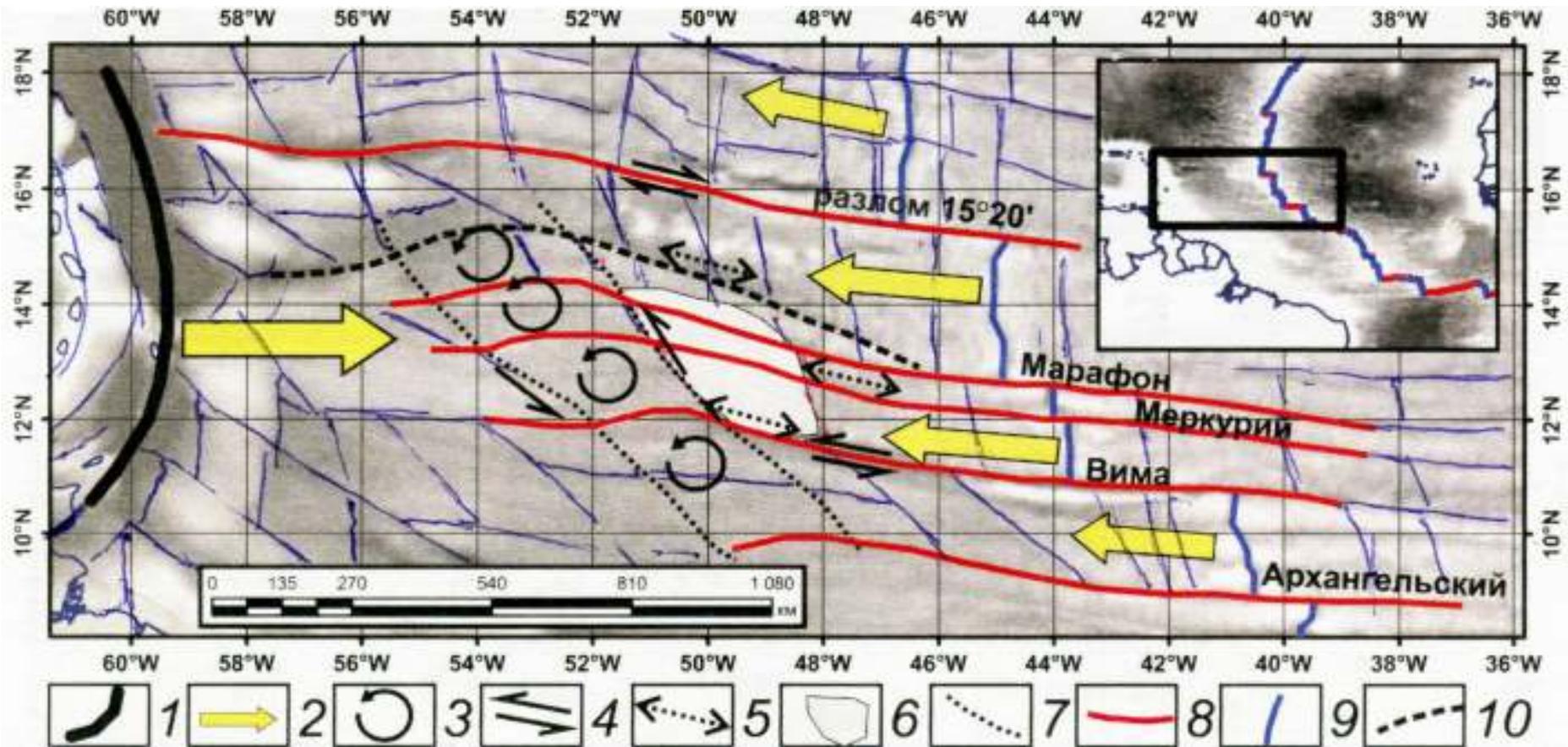
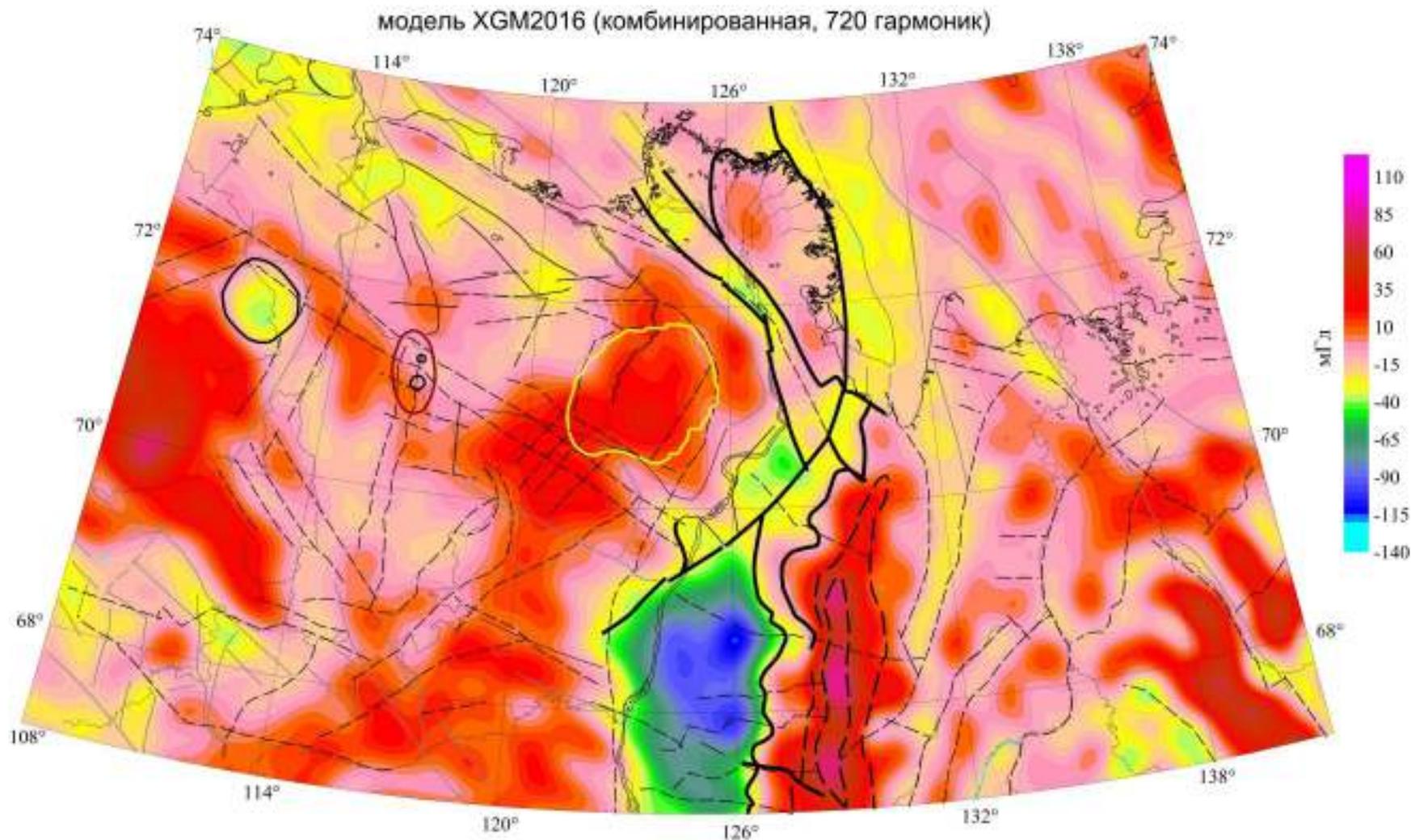


Схема геодинамики в ЭСА к западу от САХ



Чисто спутниковые глобальные модели гравитационного поля



Вывод:

хорошей основой для комбинирования и состыковки наземных гравиметрических съемок являются спутниковые модели с надежно определенными коэффициентами гармоник степени более 300

Предложения по развитию спутниковой системы измерения гравитационного поля и баз гравиметрических данных для исследований в геологии и геофизике

1. Получение более детальных данных со спутников (до степеней гармоник более 400).
2. Увеличение точности определения коэффициентов высших гармоник.
3. Создание комбинированных моделей гравитационного поля до масштабов 1:1000 000- 1:500 000 (степени гармоник 2200-4000) и.или в соответствии с глобальной моделью EGM2020.
4. Создание комбинированных моделей вертикальных градиентов гравитационного поля до масштабов 1:200 000.
5. Создание программного обеспечения, обслуживающего пользователей баз данных гравитационного поля.

Предполагаемые способы совершенствования спутниковых систем для их применения в задачах нефтегазовой геологии и геологии рудных тел I

Получение более детальных данных со спутников (до степеней гармоник более 400).

1. Уменьшение высоты гравитационных спутников до высот (150-180 км).
2. Использование высокоточных градиентометров, их разработка и/или совершенствование до уровня точности датчиков проекта GOCE.
3. Использование спутников «свободных от сноса» для получения возможности измерять параметры идеальных орбит спутников.
4. Использование троек близко расположенных спутников ($\Delta R \sim 50-100$ км): два на одной высоте и один – на другой.
5. Использование троек близко расположенных спутников ($\Delta R < 50$ км) «свободных от сноса» с различными массами пробных тел???

Предполагаемые способы совершенствования спутниковых систем для их применения в задачах нефтегазовой геологии и геологии рудных тел II

Увеличение точности определения коэффициентов высших гармоник.

1. Измерение параметров поля в нескольких эшелонах высот низких орбит.
 - Изучение поля в локально связанном 3D объеме позволит с более высокой точностью определить аналитическое представление гравитационного поля, особенно в высокочастотной его части, что позволит с большей точностью осуществлять аналитическое продолжение поля вниз.
2. Использование высокоточных градиентометров.
 - Позволит с более высокой точностью определять высокочастотную часть спектра гравитационного поля.
 - Позволит определять гравитационное влияние верхних слоев атмосферы для последующей коррекции.
3. Использование троек близко расположенных спутников ($\Delta R < 50$ км) «свободных от сноса» с различными массами пробных тел.
 - Позволит изучить тонкую структуру поля с надежной калибровкой посредством используемых в качестве датчиков перемещения хорошо известных пробных масс???

Развитие спутниковой системы позиционирования для нужд прикладной геофизики

- Определение высот пунктов измерения гравитационного поля для масштабов съемки 1: 200 000 с точностью ~ 0.5 м.
- Определение плановой привязки точек детальной съемки магнитного поля (крупнее масштаба 1:5000) с точностью до 10-30 см
- Существенное (до уровня туристических) снижение стоимости приемников GNSS для полевой геофизики, обеспечивающих точность позиционирования не хуже 30 см
- Существенное (ниже уровня китайских дешевых образцов) снижение стоимости приемников GNSS для мобильных измерений (на БПЛА и пр.) обеспечивающих точность позиционирования не хуже 5 см