

Перспективы применения материалов спутников Terra (MODIS, ASTER) и Aqua(MODIS) при развитии минерально-сырьевой базы России

Горный Виктор Иванович

*ФГБУН «Санкт-Петербургский Федеральный исследовательский центр
Российской академии наук»*

E-mail: V.I.Gornyy@mail.ru

*Двадцать третья международная конференция
«Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса»
10–14 ноября 2025, ИКИ РАН
Москва*

Главное
требование при геологическом дешифрировании
материалов аэрокосмических съемок:

Знание объекта исследования.

**Достоинства
материалов съемки спутниками
Terra(MOGIS, ASTER) и Aqua(MODIS)
с позиции применения
при геологоразведочных работах**

Спектрорадиометр MODIS.

- 36 спектральных каналов в видимом, ближнем, среднем и **тепловом инфракрасном** диапазонах; } **Дистанционная геотермия, спектрометрия**
- Пространственное разрешение в надире : 250 м (каналы 1-2); 500 м (каналы 3-7); 1000 м (каналы 8-36); } **Генерализация изображений, региональные исследования,**
- Цифровая регистрация, динамический диапазон: 12 бит; } **Высокая чувствительность и регистрация без искажений**
- **Ширина полосы съемки:** 2330 м; } **Обзорность: континентальный уровень исследования;**
- **Повторяемость съемки двумя спутниками:** 2-4 раза/сутки. } **дистанционная геотермия,**

Спектрорадиометр ASTER

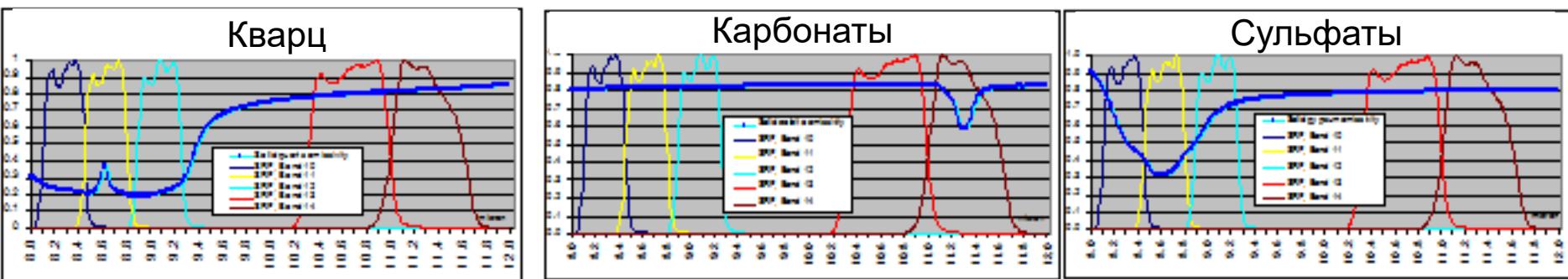
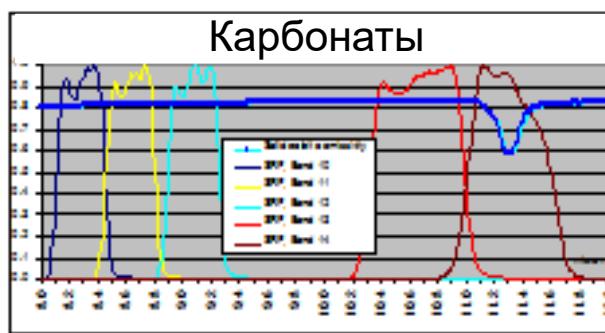
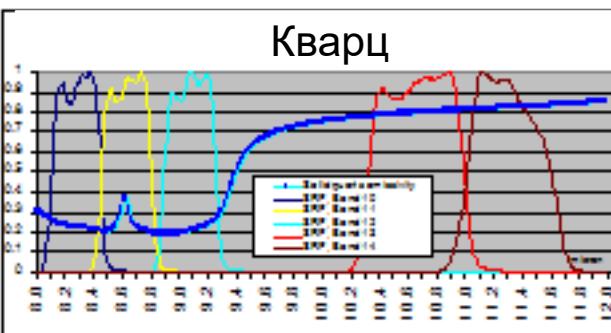
Спутниковая спектрометрия

Количество спектральных каналов:

- видимый и ближний ИК: 2;
- средний ИК: 6;
- ИК - тепловой : 5.

} Картирование вещественного состава обнажений

Спектры минералов в ИК-тепловом диапазоне



Пространственное разрешение в надире:

- видимый и ближний ИК: 15 м;
- средний ИК: 30 м;
- ИК – тепловой: 90 м.

} Дешифрирование геол. структуры при крупномасштабном геол. картировании

Динамический диапазон регистратора:

- видимый и ближний ИК: 8 бит;
- средний ИК: 8 бит;
- ИК - тепловой : 12 бит.

} Высокая чувствительность и регистрация без искажений

Спектрорадиометр ASTER

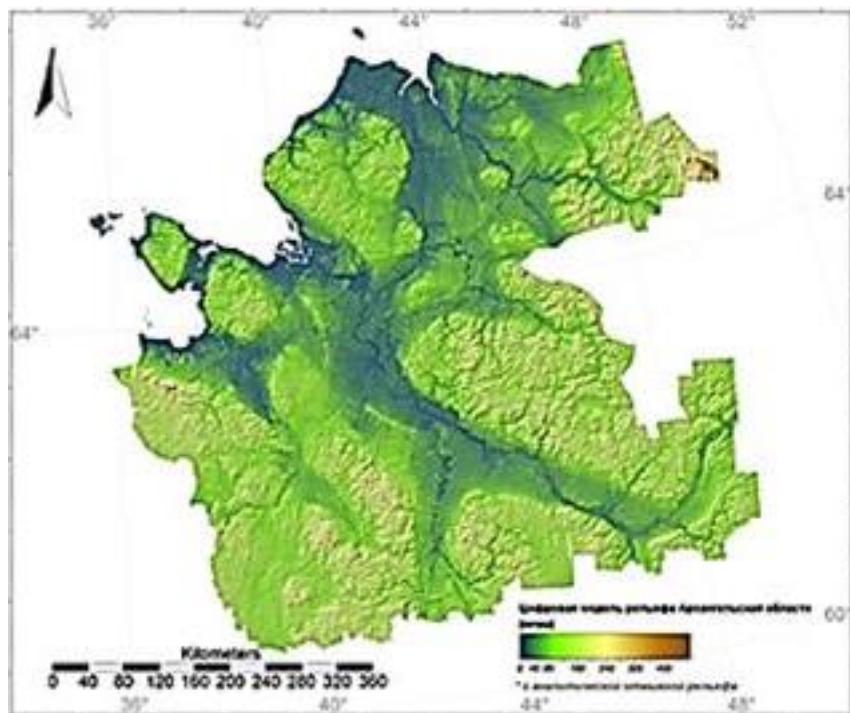
Стереоскопическая съемка и построение цифровой модели рельефа дневной поверхности

Global Digital Elevation Model,
ASTER GDEM Version 2):

- размер ячейки сетки: 30x30 м
- абсолютная точность по высоте: 12–30 м

{

Дешифрирование
геологической структуры.



Полякова Е.В. и др. МЕТОДИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ASTER GDEM V. 2 // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2-2. ;

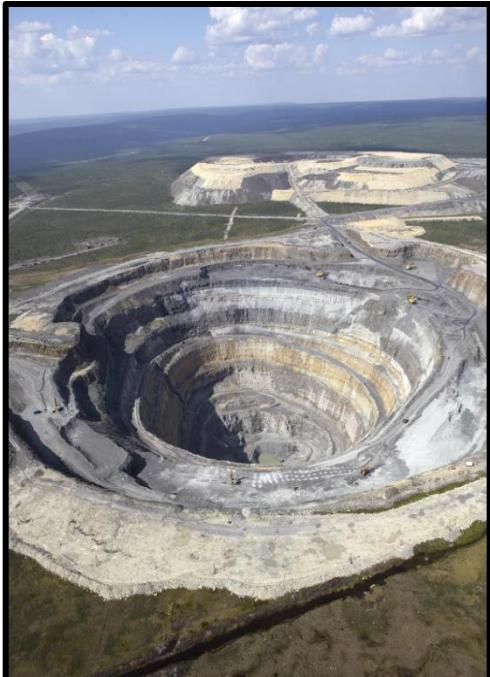
Проблема минерально-сырьевой базы России перед запуском спутников Terra/Aqua

Отработка месторождений полезных ископаемых

- Большинство месторождений, выходящих на поверхность в России открыты, а многие и отработаны;
- Прирост запасов минерального сырья стал возможным только за счет погребенных месторождений («слепых» рудных тел). *В результате экономически выгодно открытие только крупных и уникальных по запасам месторождений.*

Месторождение алмазов
Айхал, Якутия.

Начата подземная добыча.



Месторождение бурых углей.
Коркино, Челябинская обл.

Добыча остановлена. Запожаренный разрез обводнен.

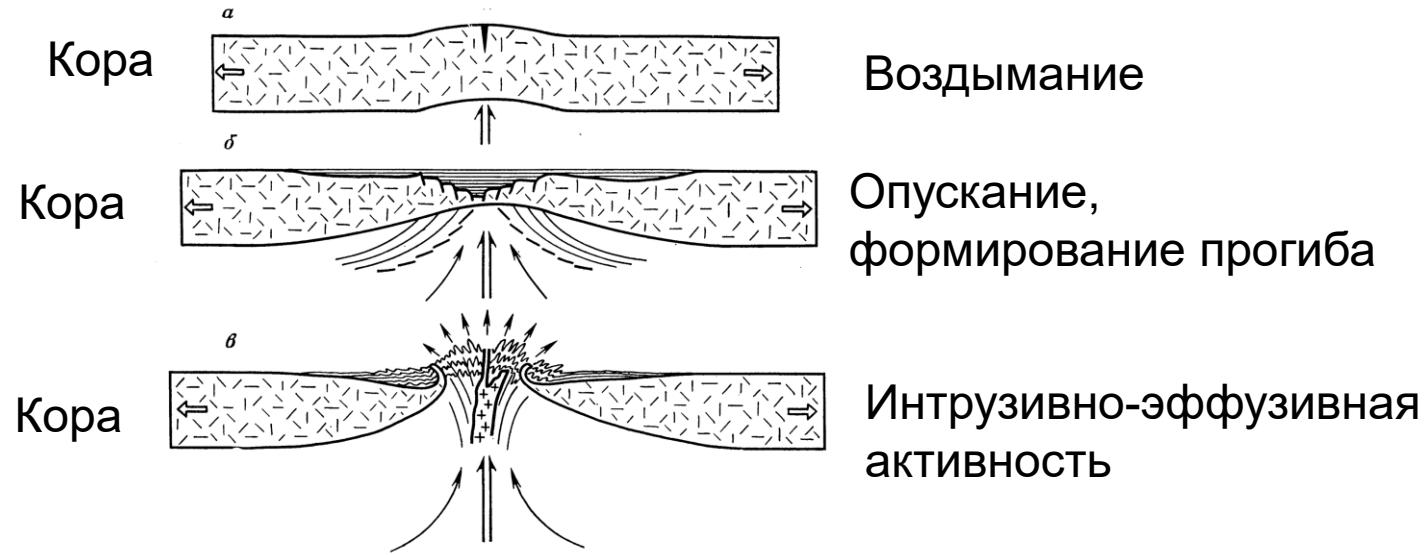


Революционные изменения геологической науки к началу третьего тысячелетия

Смена концепции фиксизма на тектонику плит

Представления о фиксированном, незыблем положении континентов и **решающей роли вертикальных движений** в развитии земной коры

Модель формирования геосинклиналии (по С.Кери)



«... в современном состоянии тектоносферы не могут быть выделены геосинклинальные режимы. Дело в том, что геосинклиналь понятие историческое... ...**По современным признакам выделить геосинклиналь невозможно**».

Стр. 144. Белоусов В. В. Основы геотектоники. 2-е изд. М.: Недра, 1989. 382 с.

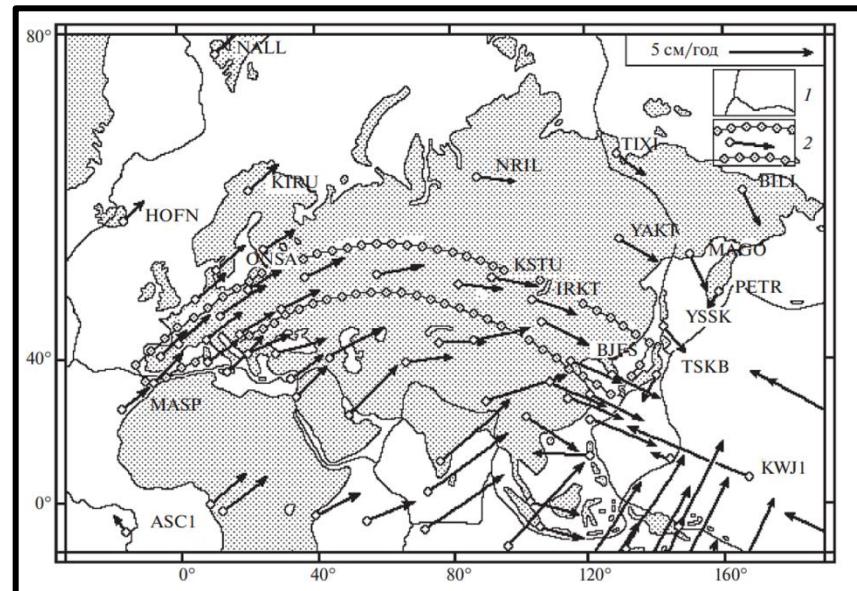
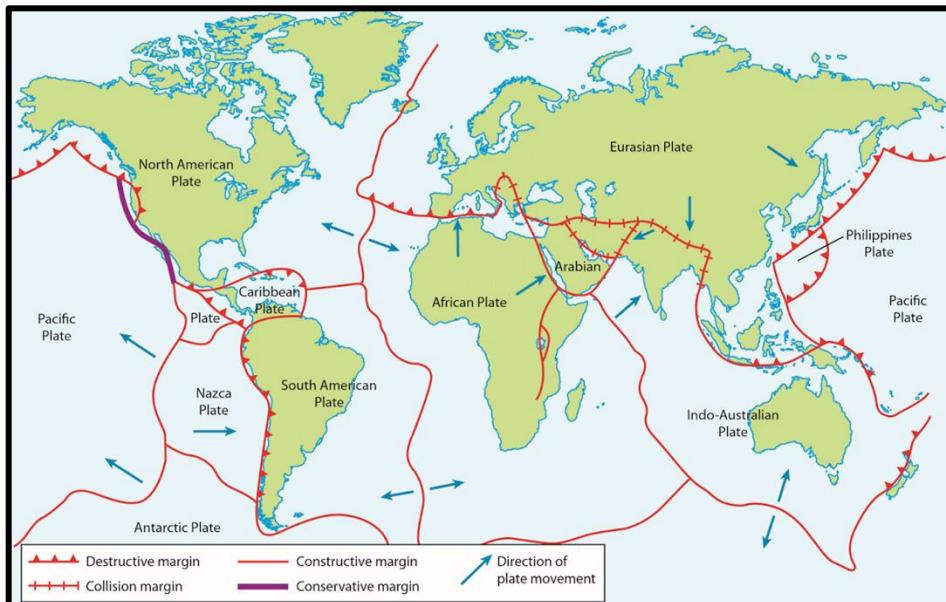
Тектоника плит

Альфред Вегенер (1880-1930) – немецкий геофизик и метеоролог – выдвинул концепцию тектоники плит.

Plag H.P. et al. Scientific objectives of current and future **WEGENER** activities // Tectonophysics. Vol. 294, Issues 3–4, 15 September **1998**, P. 177-223

Тремя высокоточными методами **измерены вектора перемещения литосферных плит:**

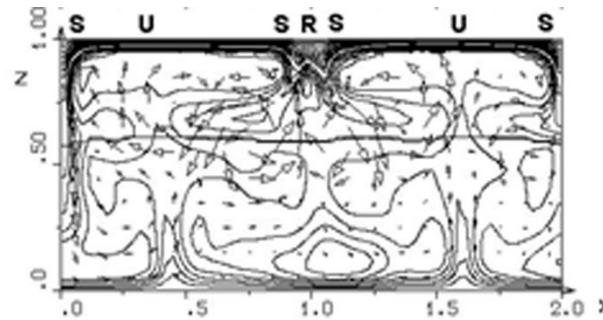
- GPS;
- VLBI – интерферометрия с длинными базами;
- Лазерная локация.



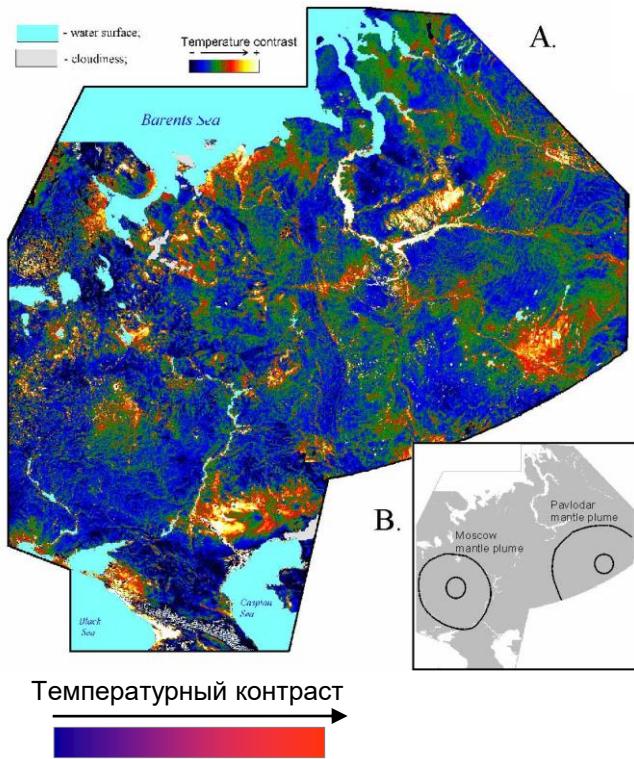
В. И. Шевченко, И. С. Крупенникова, А. А. Лукк, GPS-КИНЕМАТИКА СЕВЕРНОЙ ЧАСТИ ЕВРАЗИАТСКОГО КОНТИНЕНТА И ЕЕ ВОЗМОЖНАЯ ГЕОДИНАМИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ // ФИЗИКА ЗЕМЛИ, 2021, № 6, с. 10–19.

Мантийная конвекция: плюмы и горячие мантийные струи

Моделирование мантийной конвекции
(по Валерию Петровичу Трубицыну)

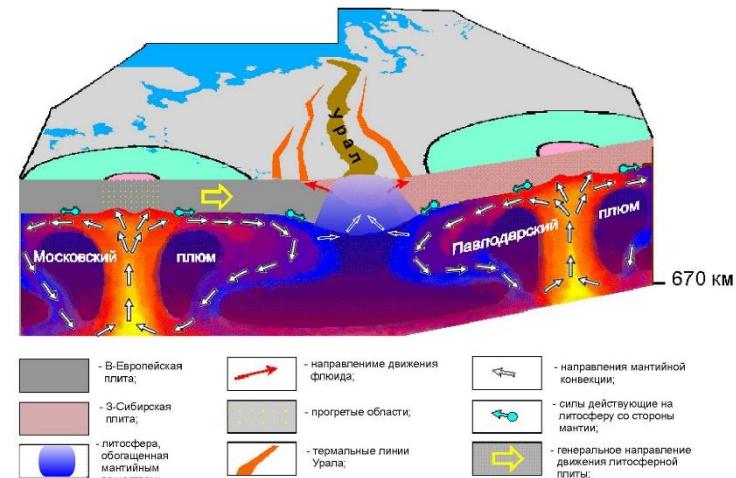


Цифровая мозаика
ночных температурных
контрастов



h - высота свободной поверхности мантии;
Z - вертикальная координата;
X - горизонтальная координата;

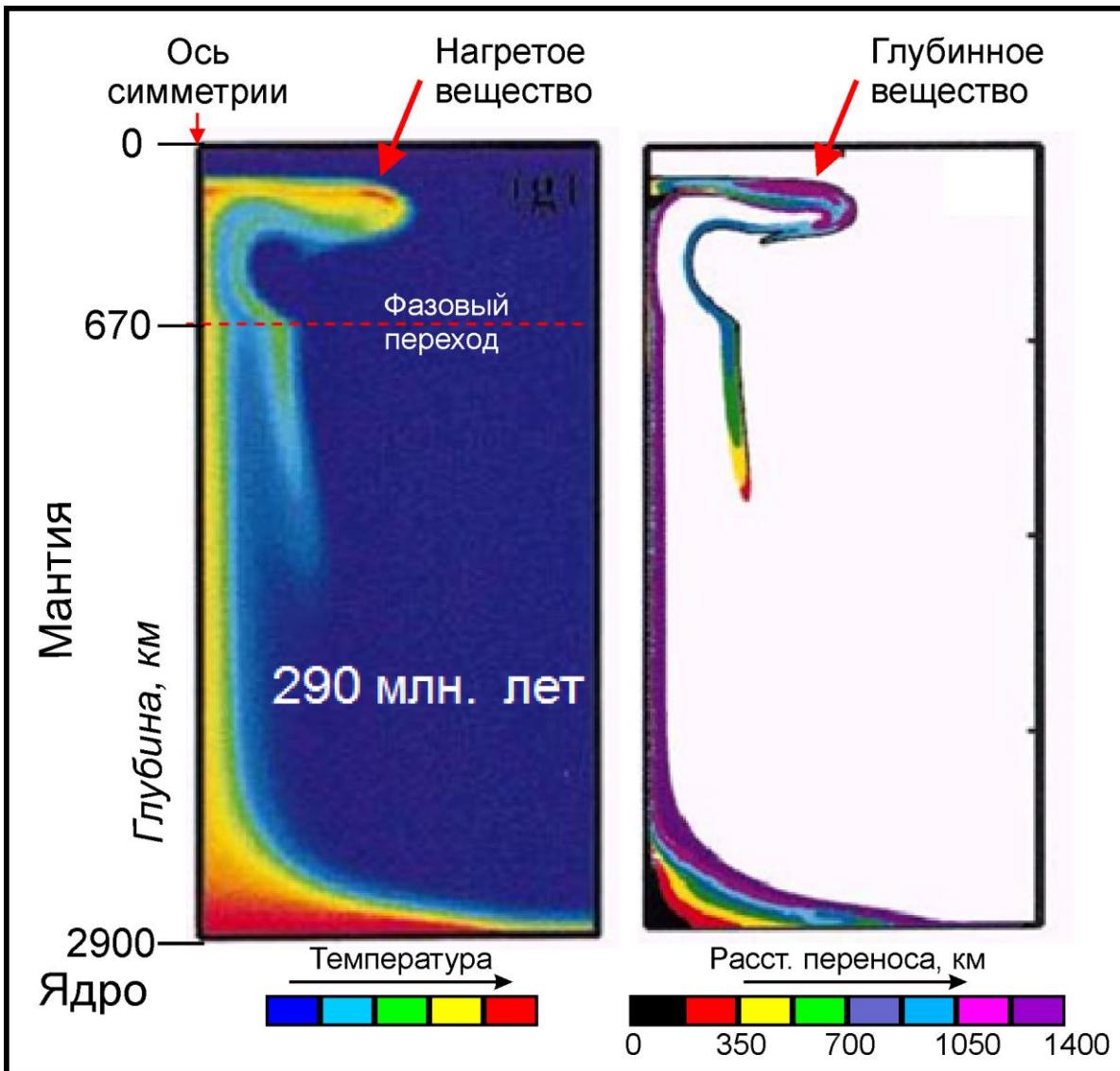
Модель восходящей мантийной конвекции под
западной частью Евразийской плиты



Горный В.И. Геодинамика Восточно-Европейской и Западно-Сибирской платформ (по данным
Дистанционного геотермического метода // Региональная геология и металлогения. №12, 2000 г. с. 76-86.

Горячие мантийные струи

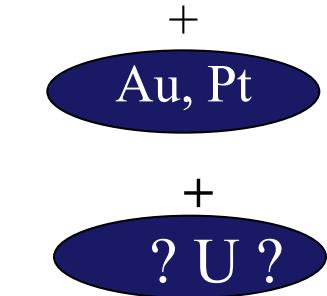
Математическое моделирование
(по C.G. Farnetani et al.))



Состав земного ядра

(Ringwood, 1977, Ringwood&Kesson, 1977,
Wanke et al, 1984)

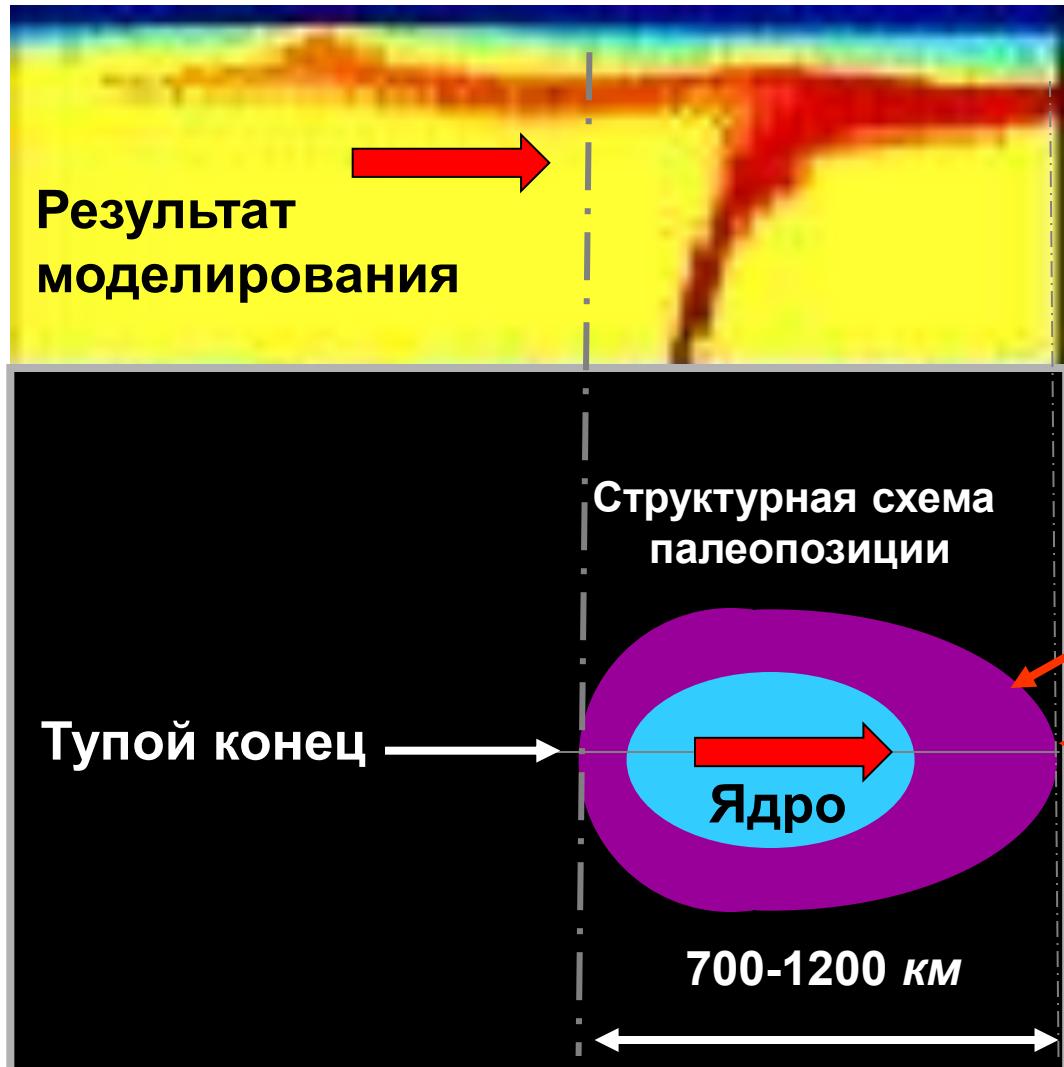
Fe	86.2 %
Ni	4.8 %
Co	0.27 %
S	1.0 %
O	8.0 %
Si, Mn, Cr	14.00%



C.G. Farnetani et al. Mixing and deformations
in mantle plumes // Earth and Planetary
Science Letters 196 (2002) 1^15

Форма палеопозиции «горячей точки»

Исландская горячая точка,
математическое моделирование
Лос-Аламосской Лаборатории



Внешняя зона,
обогащенная
элементами ядра

Острый конец

- Вектор
перемещения
плиты

Отклонение Исландской горячей мантийной струи в направлении перемещения плиты

Цифровая модель рельефа дна
Северной Атлантики

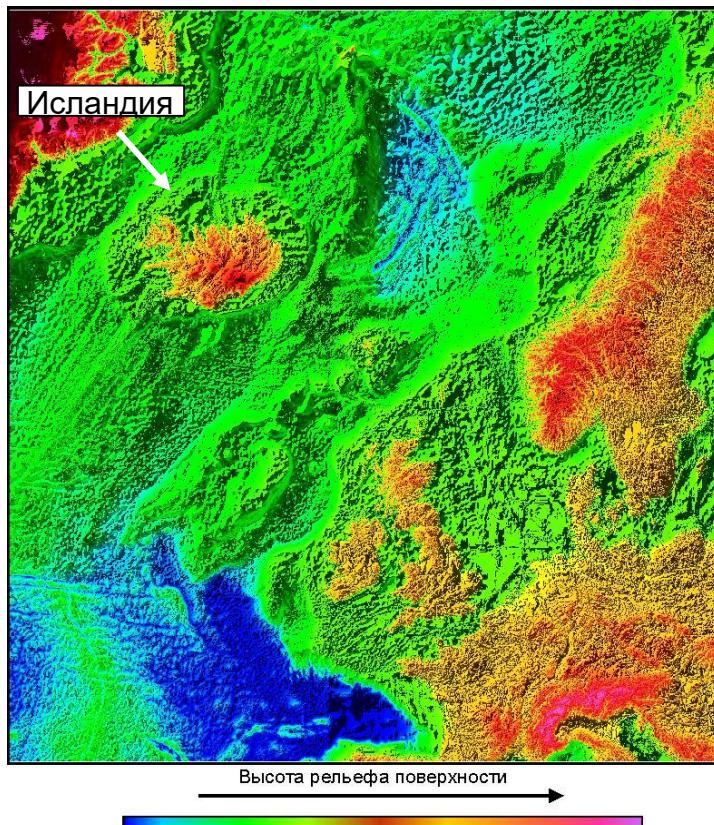


Схема
декодирования



- | | | | |
|--|---|--|--|
| | - овальные структуры; | | - линейные элементы; |
| | - дуговые элементы второго порядка; | | - позиции исландской "горячей точки"; |
| | - кольцевые структуры третьего порядка; | | - вектора перемещения литосферной плиты. |

Овальная структура Центрального Казахстана

Ночное тепловое изображение

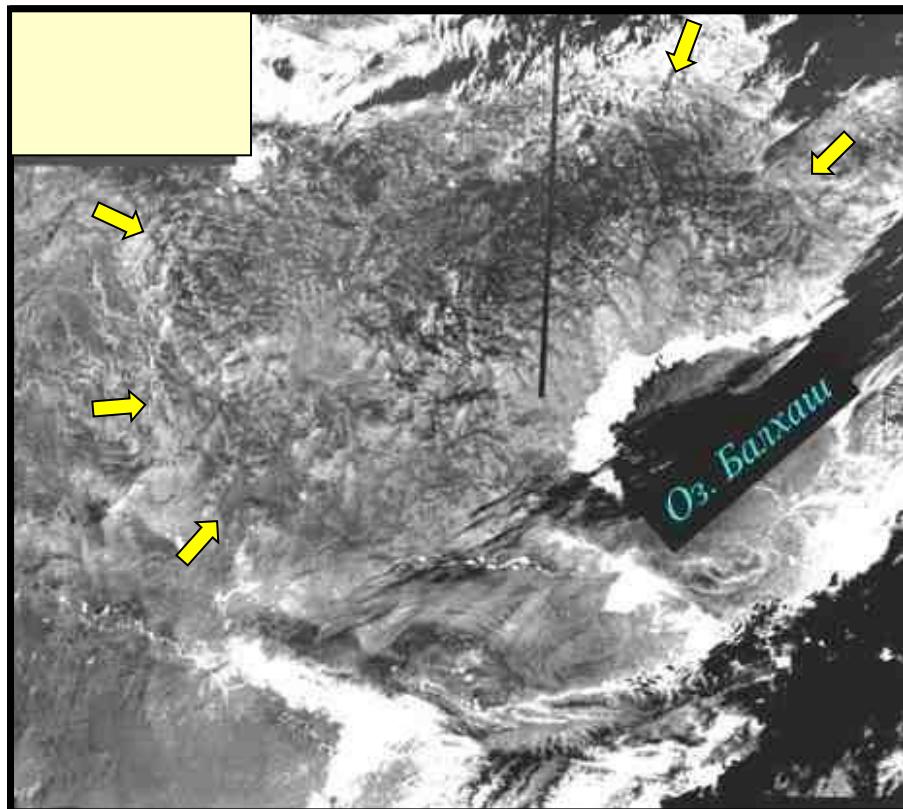
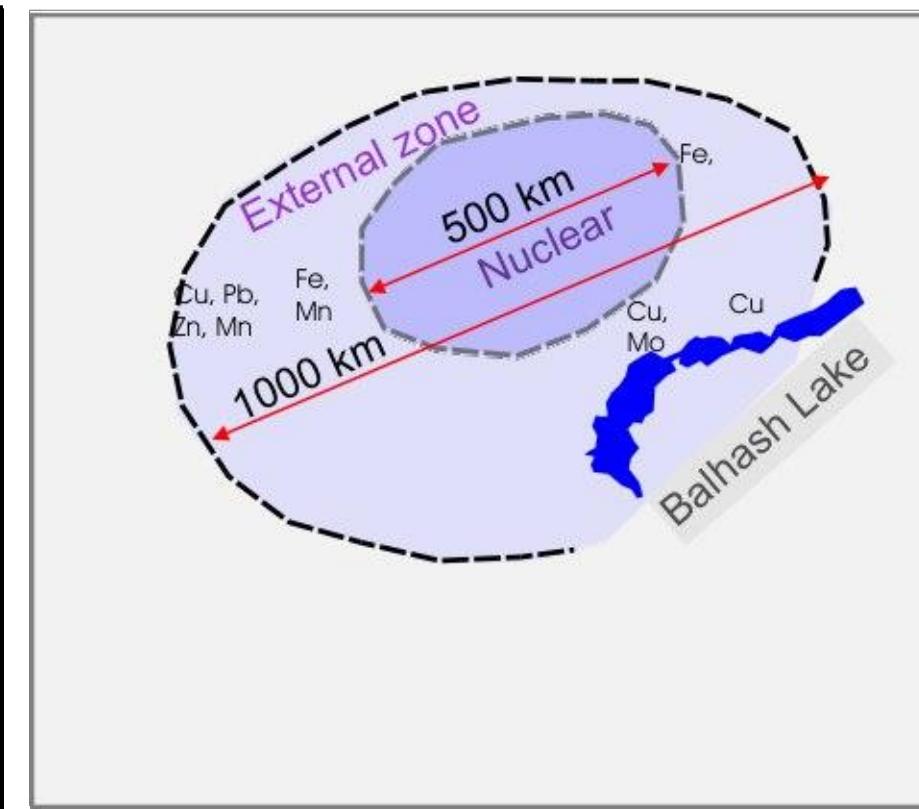


Схема дешифрирования

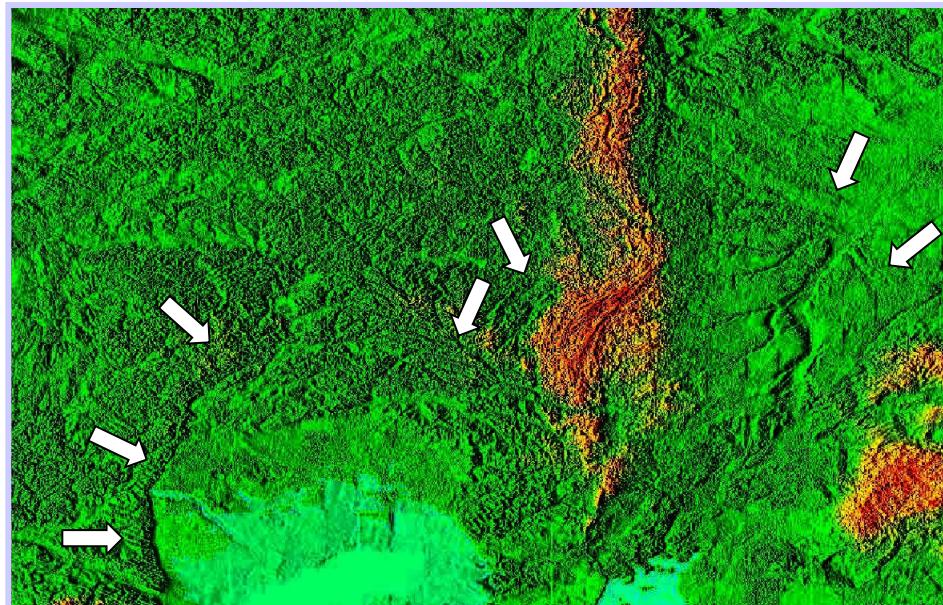


Характеристика:

- размеры;
- овальная форма и внутренняя «ядерная часть»;
- обогащение коры элементами ядра.

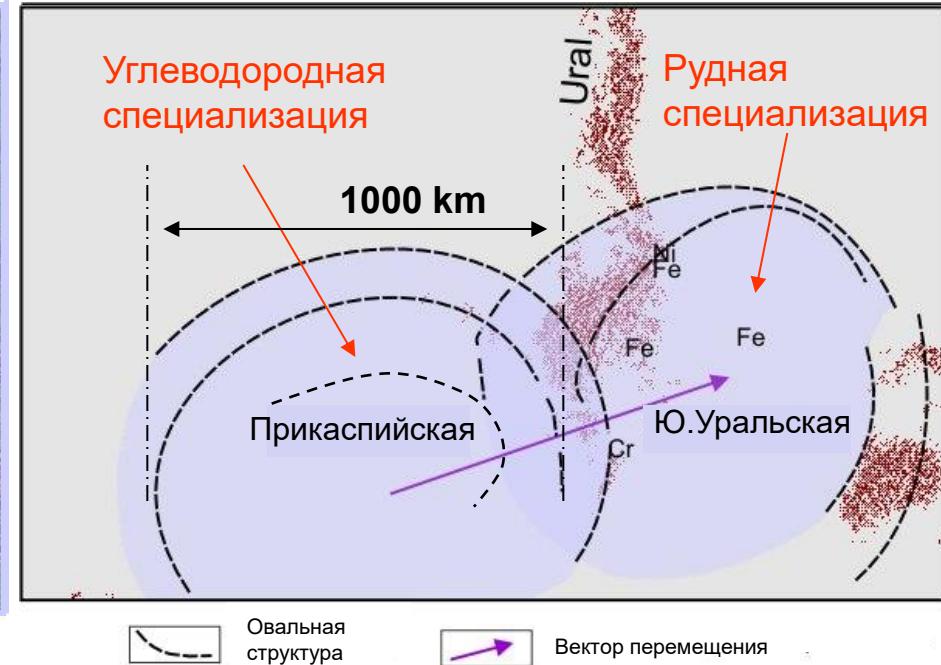
Прикаспийская и Южноуральская овальные структуры

Цифровая модель рельефа
Южного Урала



Высота поверхности

Схема дешифрирования



- Характеристика:
- размеры;
 - овальная форма и внутренняя структура;
 - обогащение коры элементами ядра или углеводородами.

Овальная структура Кольского полуострова - рудная специализация

Ночная температура

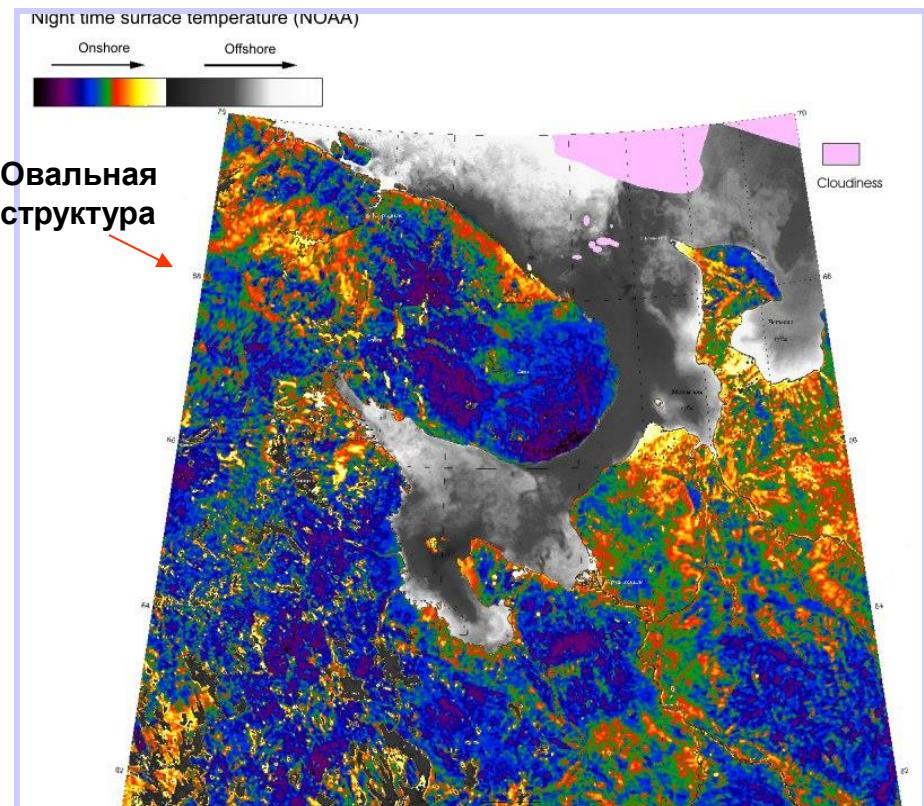
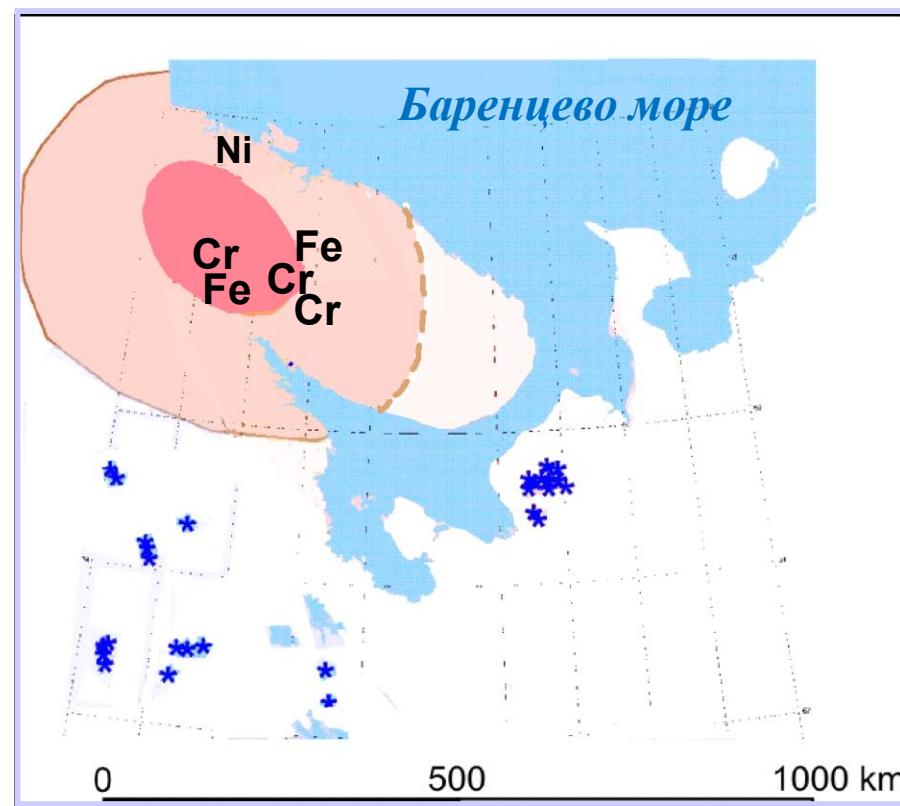


Схема дешифрирования



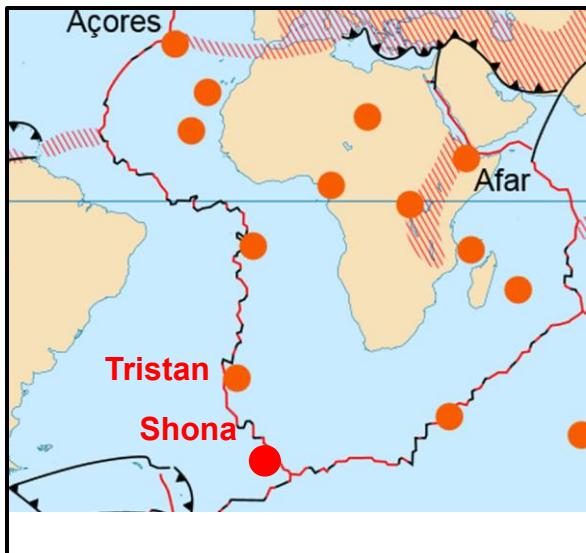
- обогащение коры элементами ядра;
- наличие кимберлитового магматизма.

По Игорю Несторовичу Толстихину: соотношение изотопов инертных газов идентично таковому в плюме нижней мантии (горячей мантийной струе)

Tolstikhin I.N., Kamensky I.L., Nivin V.A., et al. RARE GAS ISOTOPES AND PARENT TRACE ELEMENTS IN ULTRABASIC-ALKALINE-CARBONATITE COMPLEXES, KOLA PENINSULA: IDENTIFICATION OF LOWER MANTLE PLUME COMPONENT
Geochimica et Cosmochimica Acta. 2002. T. 66. № 5. С. 881-901.

Палеопозиции «горячих точек» в Южной Атлантике

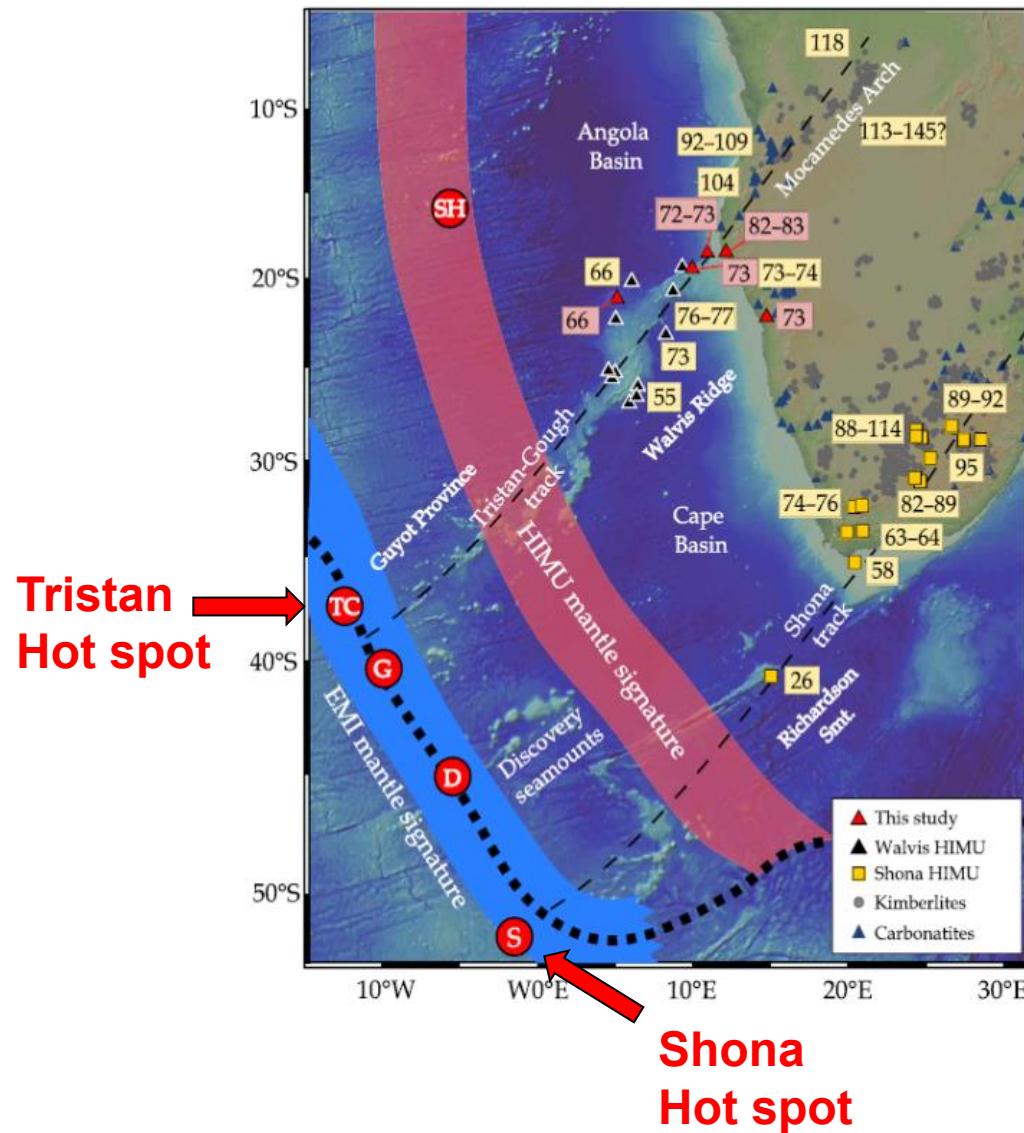
«Горячие» точки
Южной Атлантики



● - «Горячие точки»

Траектории «горячих» точек
Южной Атлантики

Homrighausen et al., Sci. Adv. 2020; 6 : eaba0282 8 July 2020



Палеопозиции в Южной Африке

Минерагеническая специализация

Мозаика цифровых спутниковых снимков
в RGB представлении

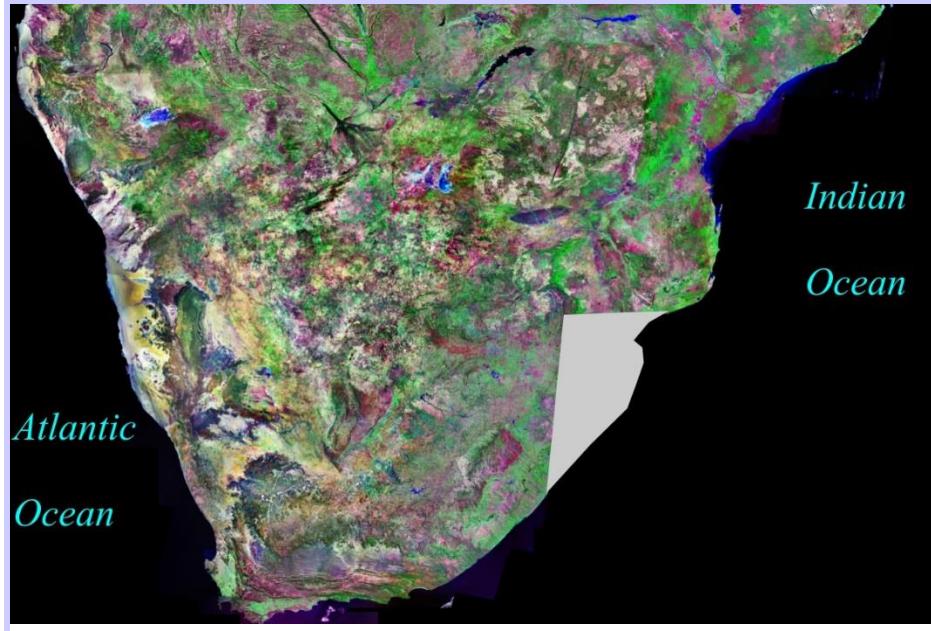
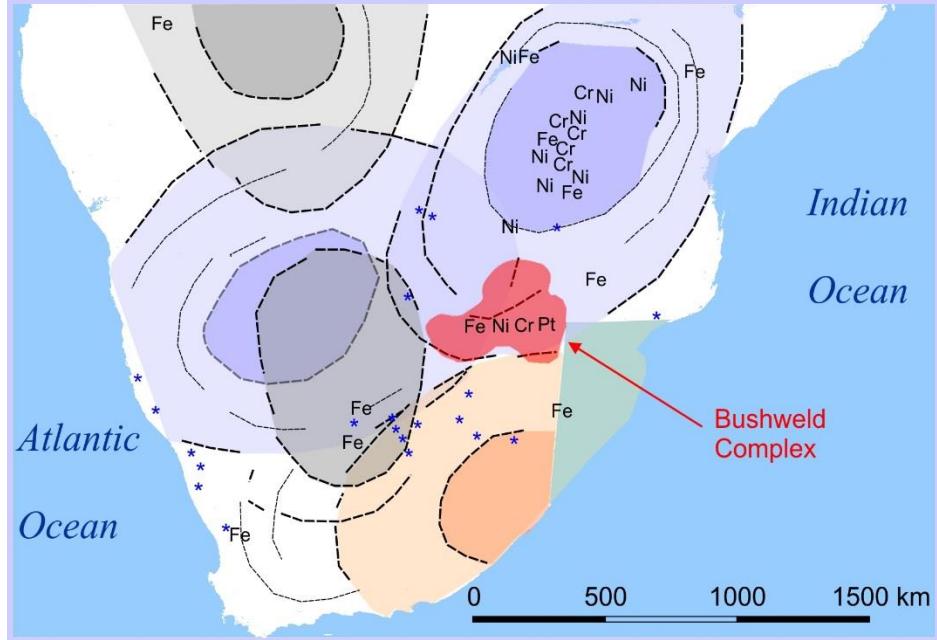


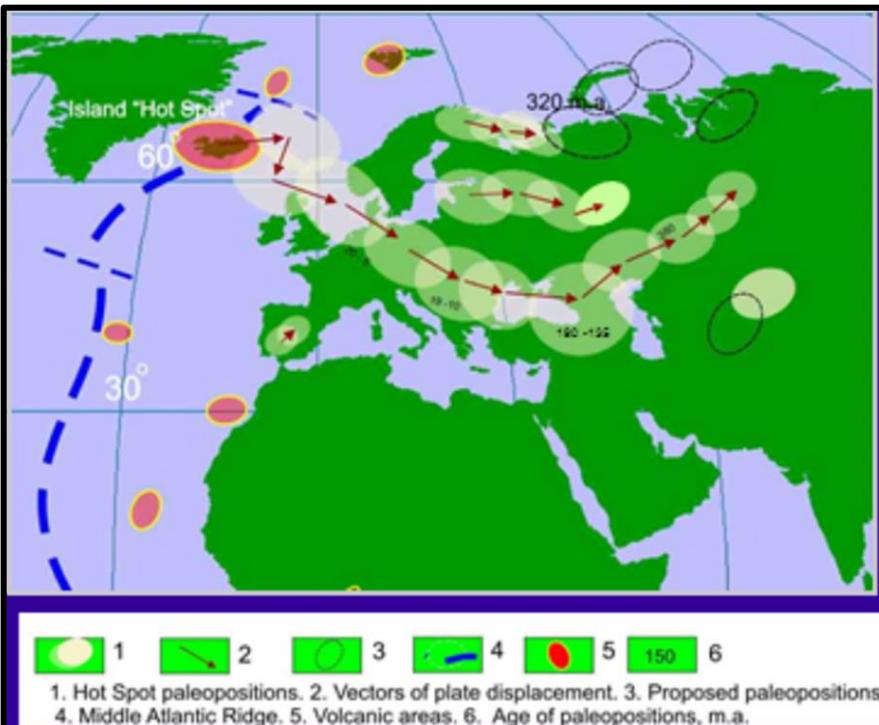
Схема дешифрирования



* - кимберлитовые/ лампроитовые тела
(по данным USGS)

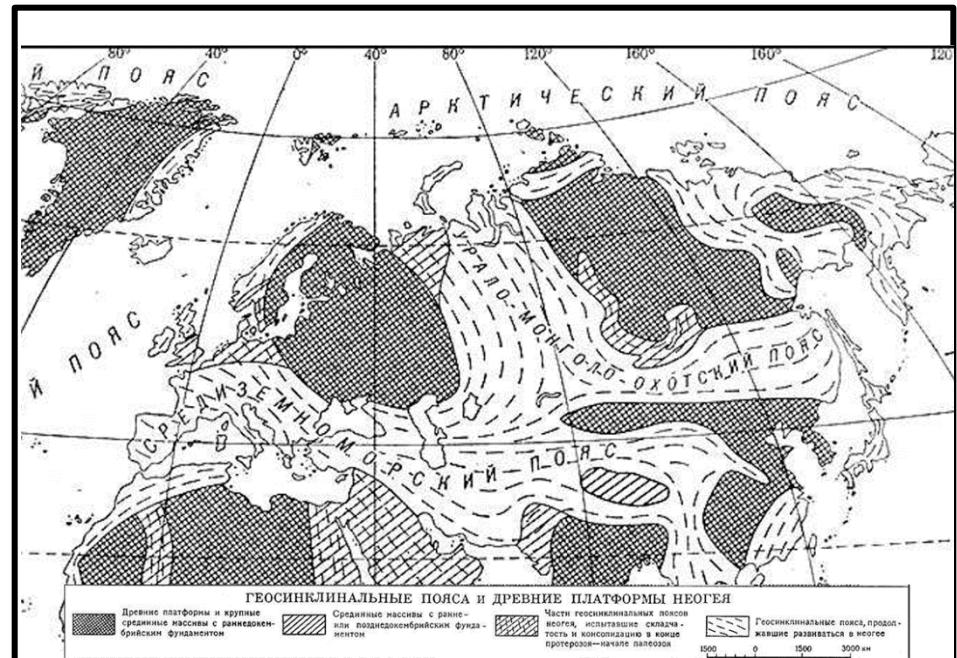
Зоны проработки континентальной коры горячими мантийными струями

Схема дешифрирования палеопозиций горячих точек



Proceedings of the IGARSS 2002 & 24-th Canadian Symposium on Remote Sensing. 24-28 June
2002.Toronto, Canada. 0-7803-7537-8/02/\$17.00© 2002 IEEE.
Vol.IV.pp.2029-2035.

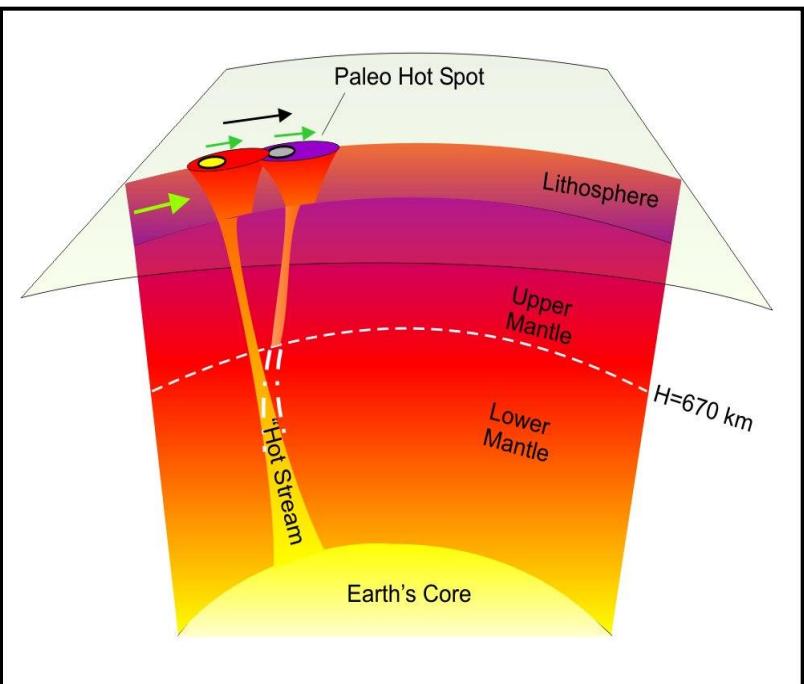
Геосинклинальные пояса и древние платформы Неогея



По: В. Е. Хаину, М. В. Муратову, Е. В. Шанцеру.

Вопрос: «Не являются ли палеопозиции «горячих точек», тем, что концепция фиксизма квалифицировала как «геосинклинали», а цепь палеопозиций горячих точек как «геосинклинальный пояс»?»

Модель формирования цепочки палеопозиций восходящих мантийных конвективных структур



Модель 1. Монотонное движение плиты

Фазы:

1. Формирование «горячей точки».
2. Наклон струи.
- 3. Срыв струи.**
4. Остывание палео-позиции «горячей точки».
5. Формирование новой «горячей точки».

Модель 2. Прерывистое движение плиты.

Фазы:

1. Неподвижности и роста напряжений.
2. Срыва и быстрого перемещения плиты .

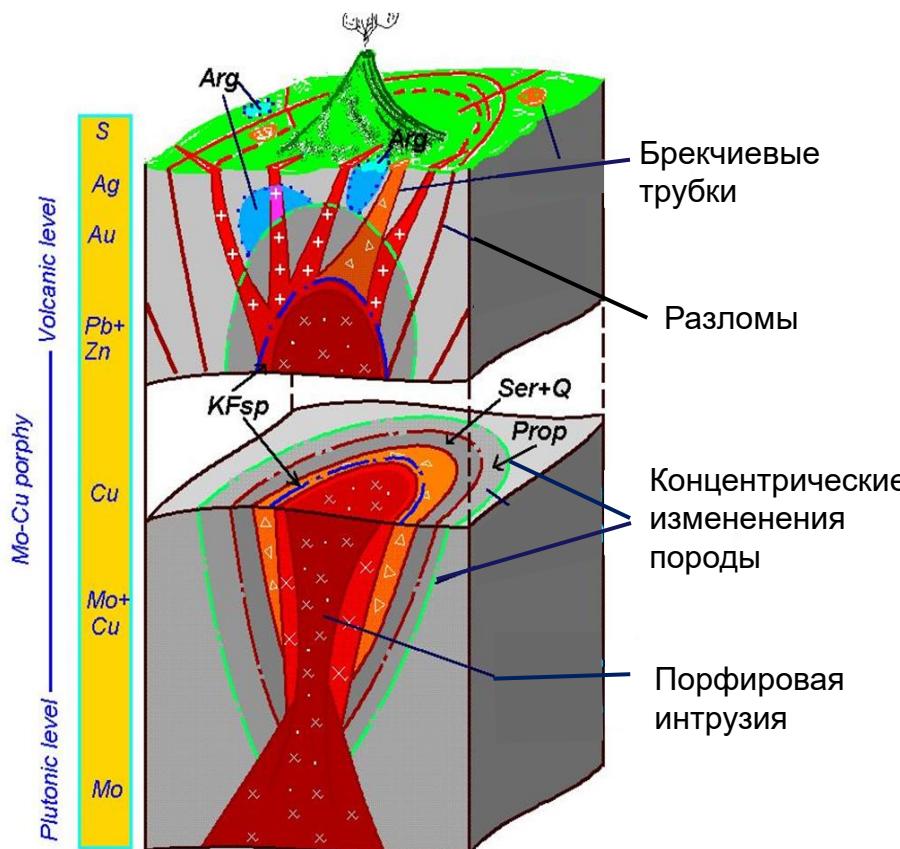
Вопрос: В какой фазе мы живем?

Рудно-магматические системы

Рудно-магматические системы (РМС)

Совокупность рудных тел и магматических горных пород, которые возникли в едином геологическом процессе.

Медно-порфировая РМС (По И.Г.Павловой)



Материалы ASTER.
Результаты спектрометрии
гидротермально-метасоматических изменений
вмещающих пород



В.И. Горный, С.Г. Крицук, И.Ш. Латыпов, А.А. Тронин.
Особенности минералогической зональности
рудно-магматических систем, Вмещающих кварцево-жильные
месторождения золота (по материалам спутниковой
спектрометрии)

Павлова И.Г. Геолого-генетические модели молибденовых порфировых месторождений // В кн. Генетические модели эндогенных рудных формаций. Т.1. Новосибирск: Наука. 1983. С. 127–135.

Коренные месторождения алмазов

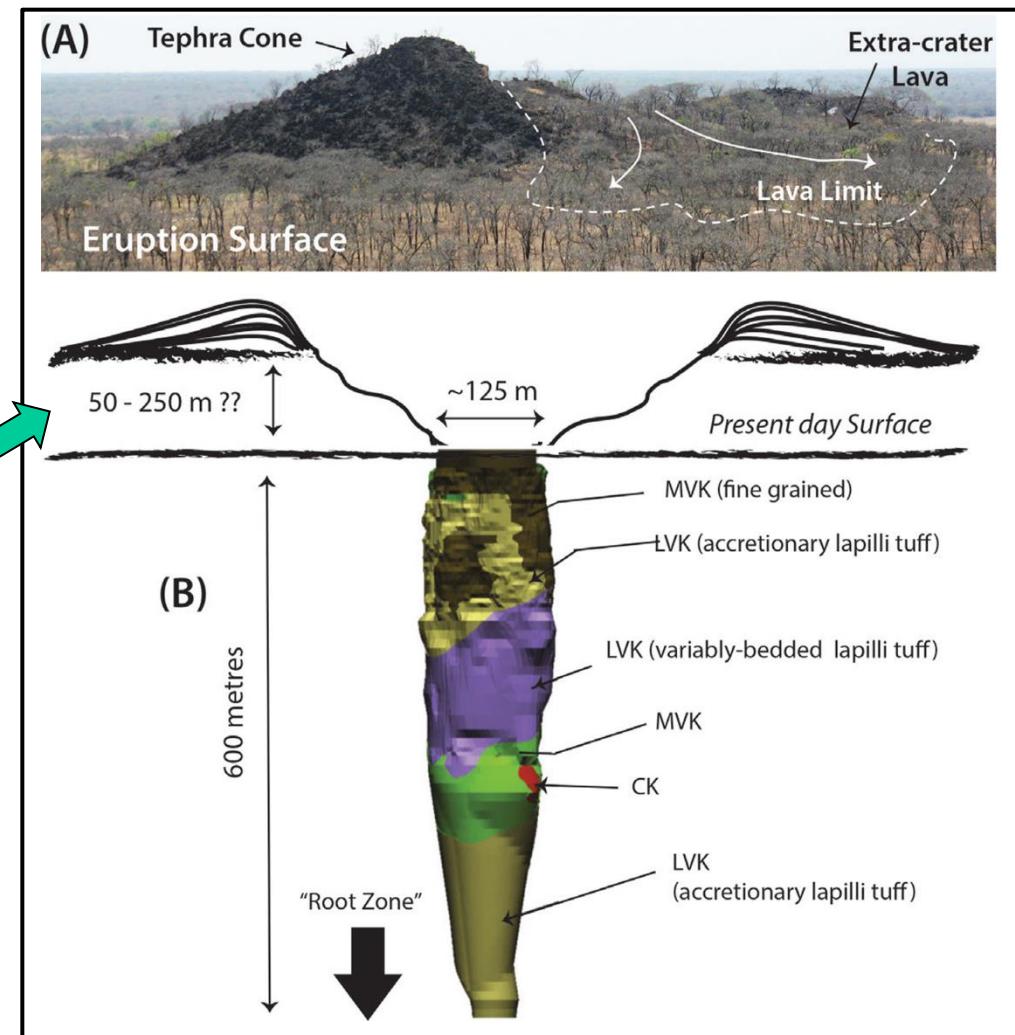
Кимберлитовые трубки

Скорость подъема кимберлитовой колонны: 100-150 км/ч

Время подъема кимберлитовой колонны: ~2,5–36 ч.

Толщина зоны закалки: 0,1-1,0 м –

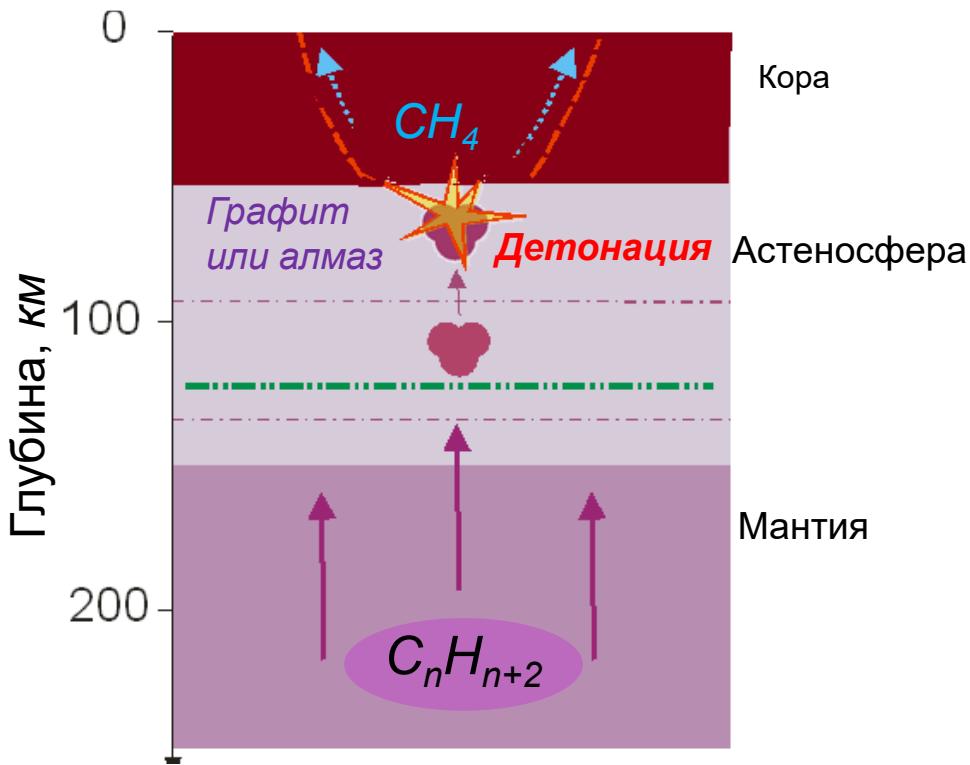
Признаки низкой температуры.



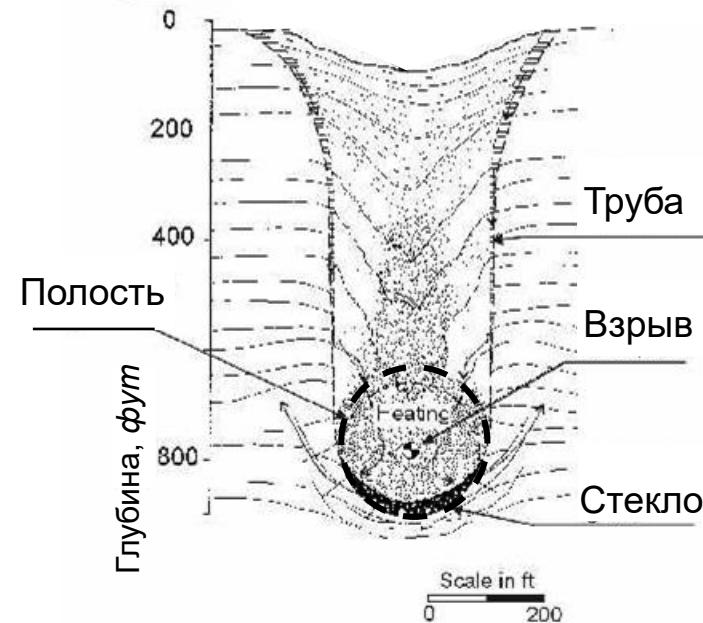
Взрывная гипотеза происхождения природных алмазов

Самопроизвольная детонация мантийных тяжелых углеводородов (по И.К.Карпову и др. 1998)

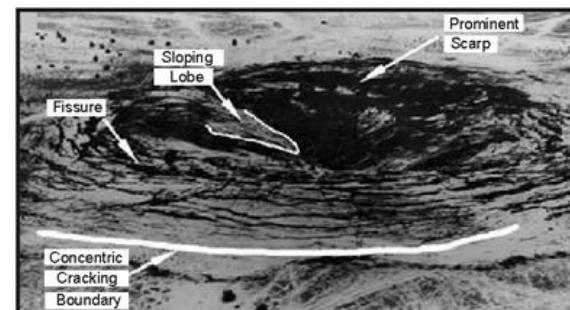
P-T условия: температура 4800 °C;
Давление $2 \cdot 10^{10}$ Па;
Глубины: **90 – 30 км**



Разрез кратера, сформированного подземным ядерным взрывом

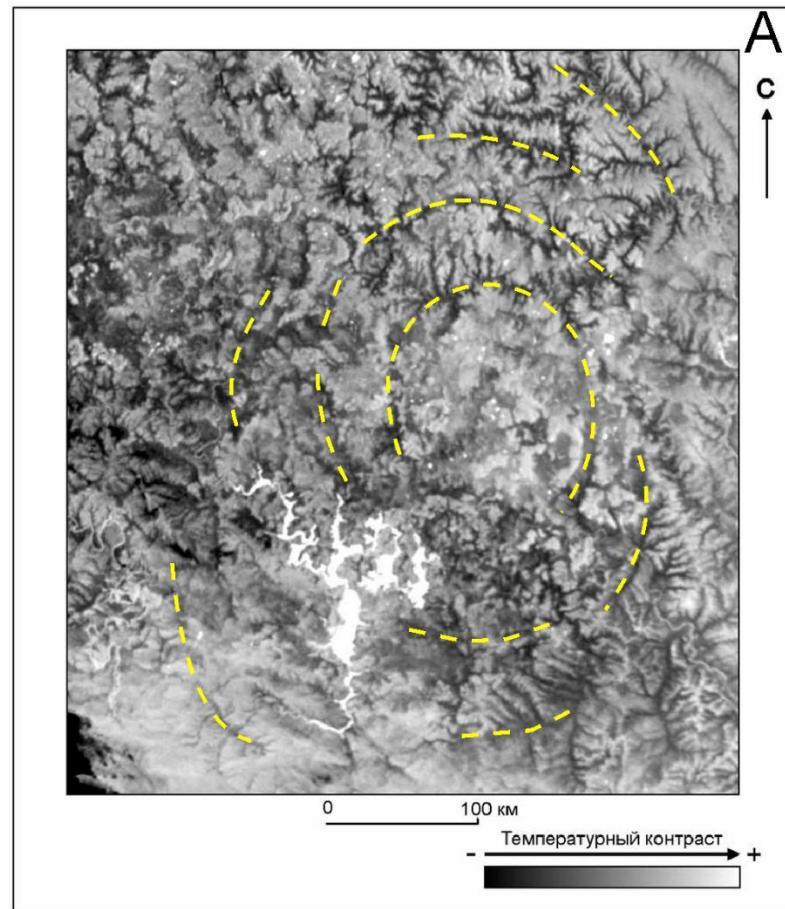


Перспективный аэроснимок кратера подземного ядерного взрыва, Индия



Модель формирования коренных месторождений алмазов (по дистанционным и геофизическим данным)

А. Карта ночных температурных контрастов региона Мирнинского кимберлитового поля (Якутия),



Б. Схема тектонического дешифрирования



7. Сейсморазведочный профиль
8. Кимберлитовые тела.

Признаки камуфлетных взрывов

Модель Мирнинского алмазоносного района (Terra + сейсморазведка)

Макропключения битумов в монолитном кимберлите
(Подземный рудник Айхал)

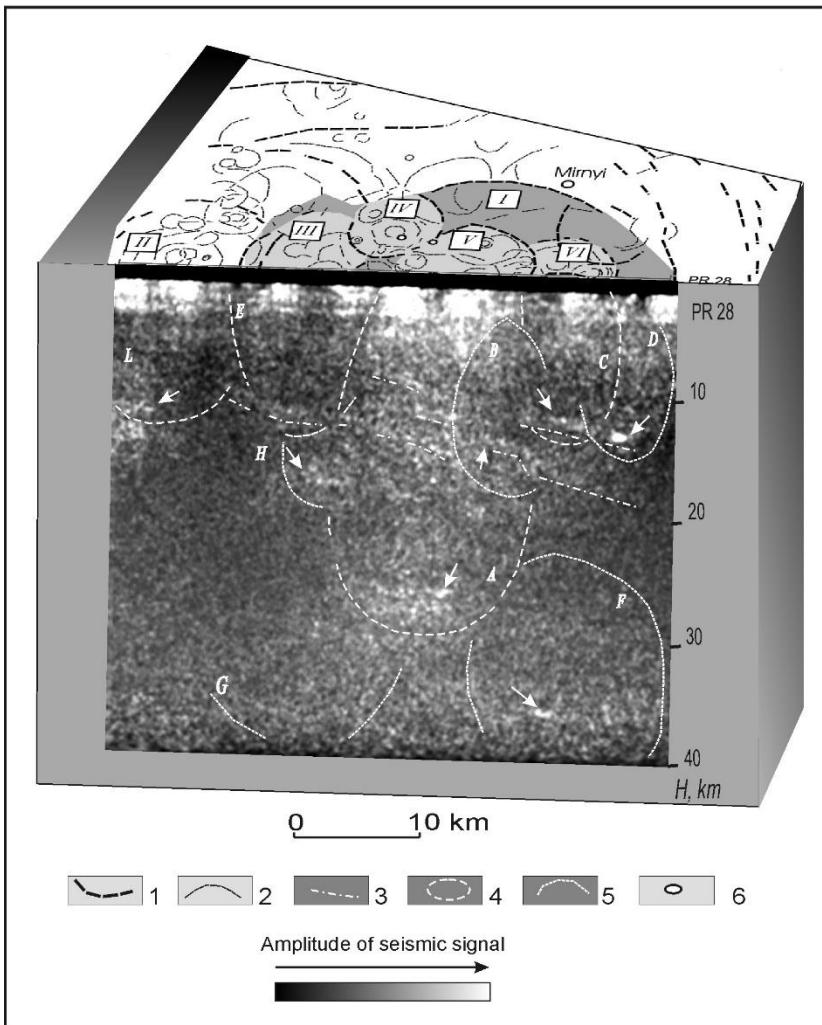
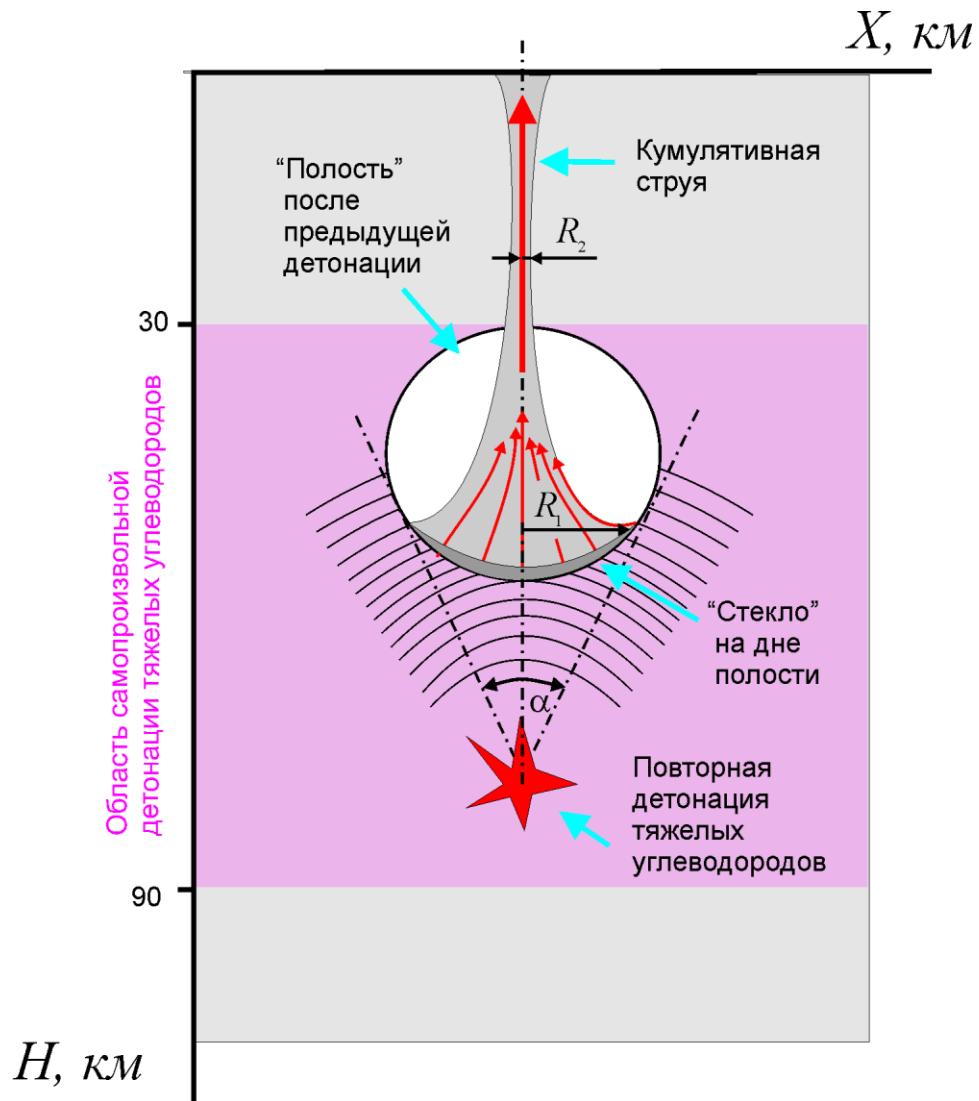


Фото гл. гидрогеолога рудника
В.С.Фролова

Кумулятивная гипотеза транспорта алмазов



$$R_2 = \sqrt{2\delta} \sin(\alpha/2)$$

R_2 - радиус кимберлитовой колонны

δ - толщина зоны «стекала»

М.А. Лаврентьев, Б.В. Шабат. Методы теории функций комплексного переменного., Наука, 1973. 736 с.

При:

$$\delta = 1 \text{ км},$$

$$R_1 = 10 \text{ км}$$

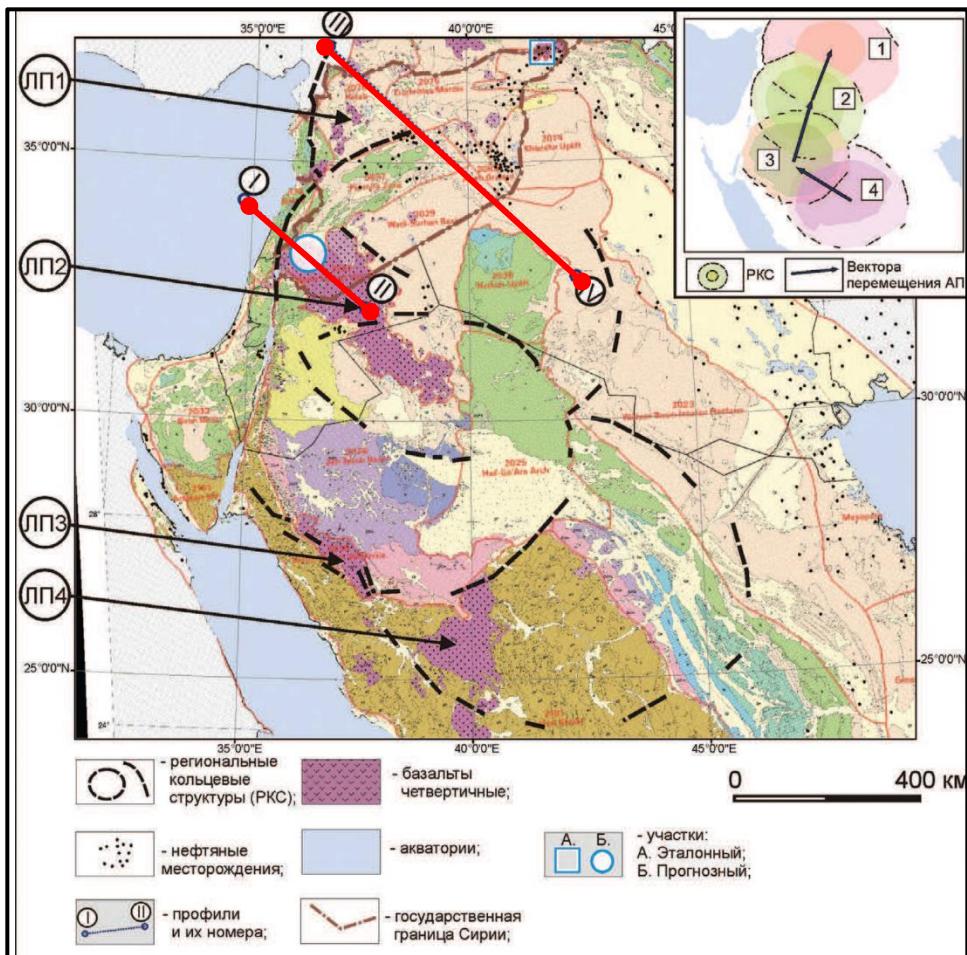
$$\alpha = 40^\circ$$

$$R_2 = 0,5 \text{ км}$$

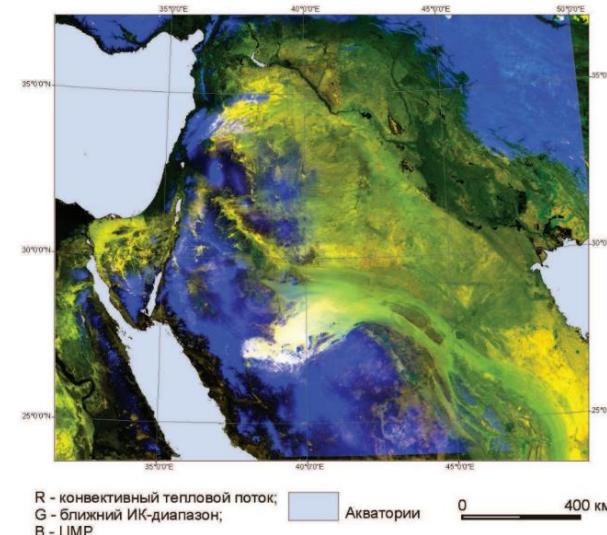
**Комплексирование материалов съемок
спутниками Terra/Aqua
с
материалами геофизических съемок**

Комплексирование материалов съемок спутниками Terra/Aqua с данными геофизических съемок

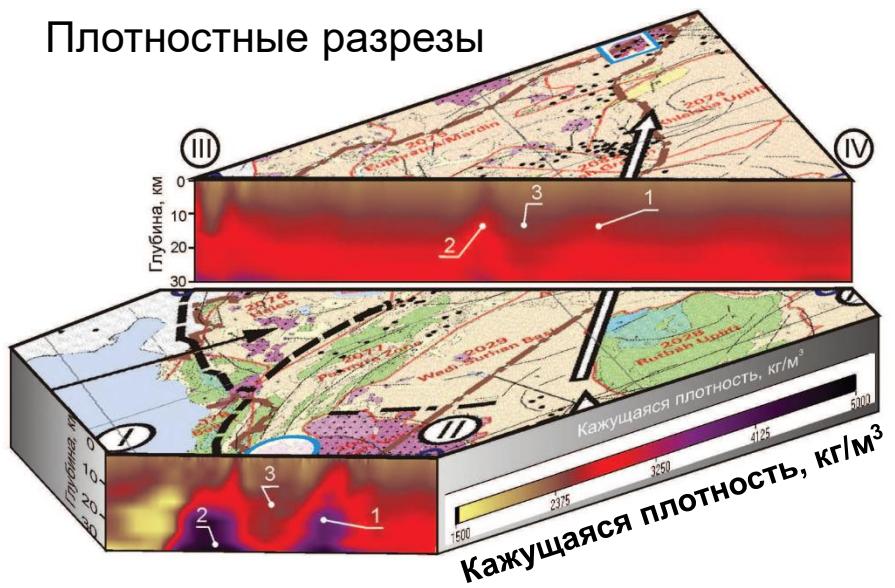
Геологическая карта Аравийского п-ва



RGB цветовой композит (Terra(MODIS))

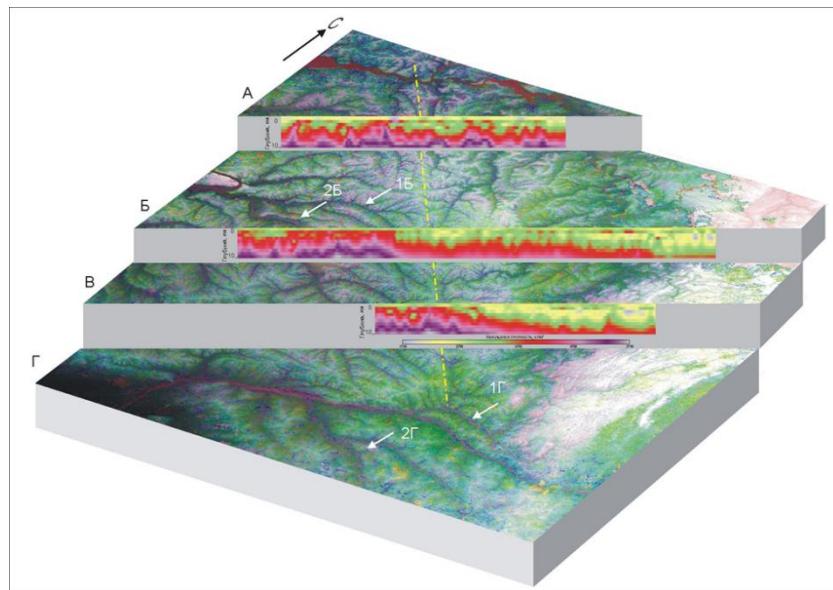


Плотностные разрезы



Волго-Уральская нефте-газоносная провинция

3-D диаграмма



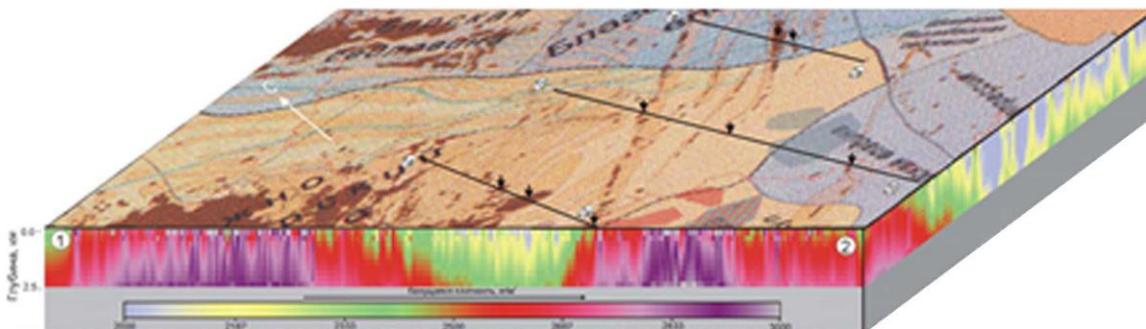
Верх:

Дистанционная
основа.

Фронтон:

Кажущаяся плотность

3-D диаграмма



Верх:

Карта месторождений
углеводородов.

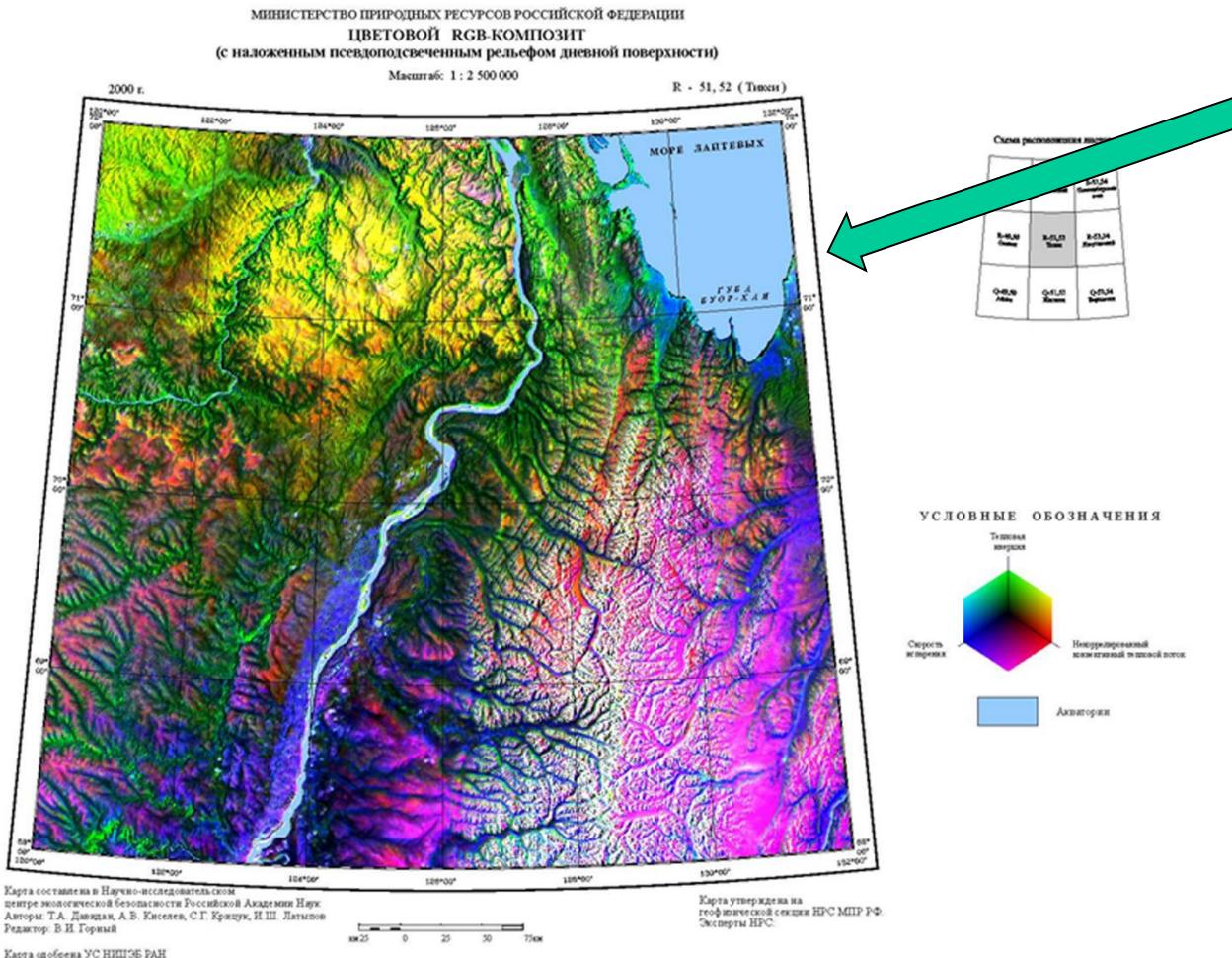
Фронтон:

Кажущаяся плотность

Цифровая дистанционная основа геологических исследований континентального уровня по архивным данным съемок спутниками Terra(MODIS/ASTER), Aqua(MODIS)

Цель создания: - выявить закономерности размещения уникальных по запасам месторождений полезных ископаемых по отношению к палеопозициям структур мантийной конвекции и выявить их структурно-вещественные индикаторы

Цифровая дистанционная основа для геологического картирования масштаба 1: 1 000 000 – региональный уровень



Проблема:

- недостаточная
обзорность

Континентальный
уровень исследований:
- проблема уравнивания
цифровых мозаик :

Вопросы уравнивания цифровых мозаик: С.Г. Корниенко. ХАРАКТЕРИСТИКА АНТРОПОГЕННЫХ ТРАНСФОРМАЦИЙ ЛАНДШАФТОВ В РАЙОНЕ БОВАНЕНКОВСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ ПО ДАННЫМ СПУТНИКОВ LANDSAT // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. №2. С. 106–129

Заключение

1. Для изучения и обобщения закономерной выраженности структурно-вещественных признаков проявления всех уникальных по запасам месторождений полезных ископаемых целесообразно в ИКИ РАН создать приведенную к единой системе координат уравненную цифровую основу **континентального** масштаба, включающую:
 - нормализованные материалы съемок спутниками Terra(MODIS/ASTER), Aqua(MODIS) и их трансформанты – результаты автоматизированного анализа линеаментов и кольцевых структур;
 - цифровую модель рельефа дневной поверхности (Terra(ASTER)) и ее трансформанты;
 - матрицу поля силы тяжести.
2. Предложить Российской академии наук, Минобрнауки и Министерству природных ресурсов поддержать проект по изучению и обобщению выраженности на геолого-геофизических материалах признаков погребенных уникальных по запасам месторождений полезных ископаемых.