

О возможном влиянии масштабных импактных событий на ход тектонно-магматической эволюции ранней Земли

М.З. Глуховский, М.И. Кузьмин

Геологический институт РАН, Москва.

Институт геохимии СО РАН им. А.П. Виноградова, Иркутск.

Иркутск, 24-27 октября 2012 г.

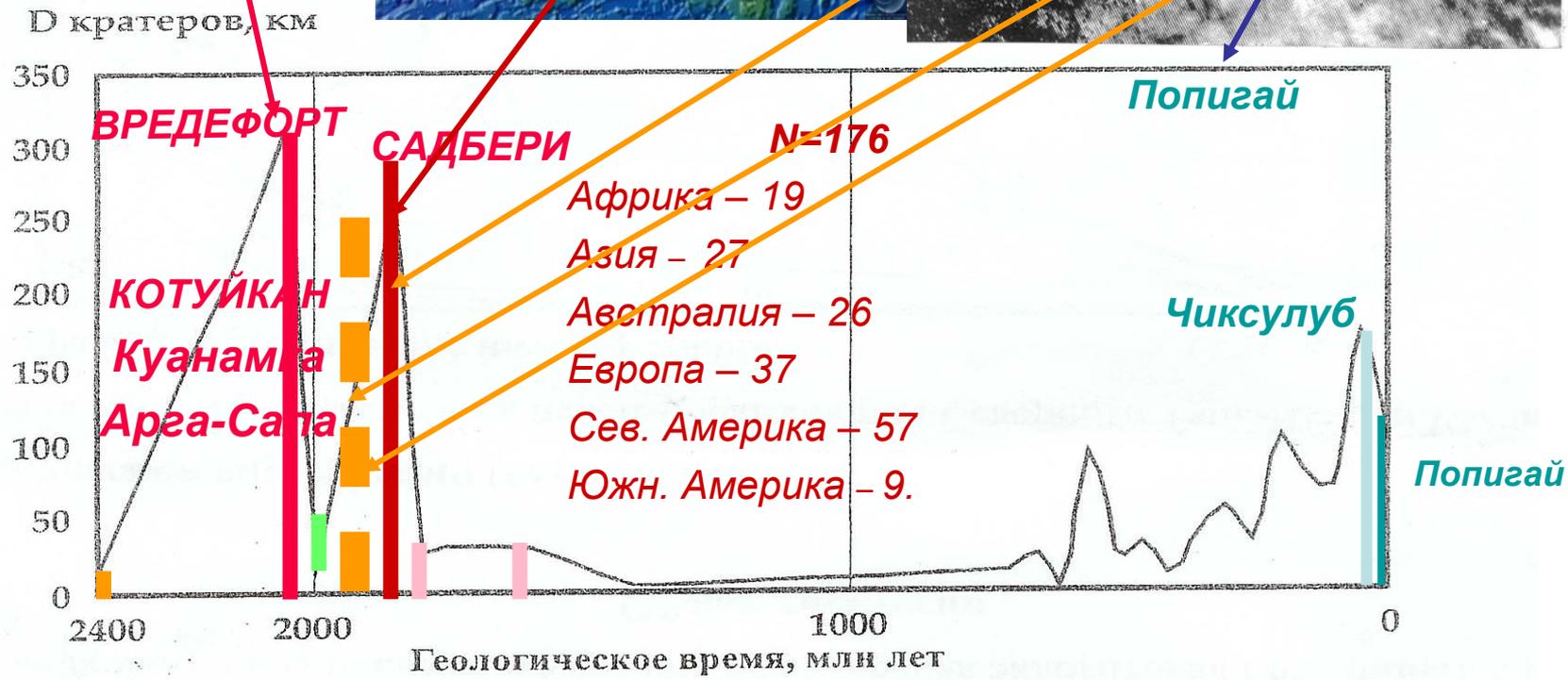
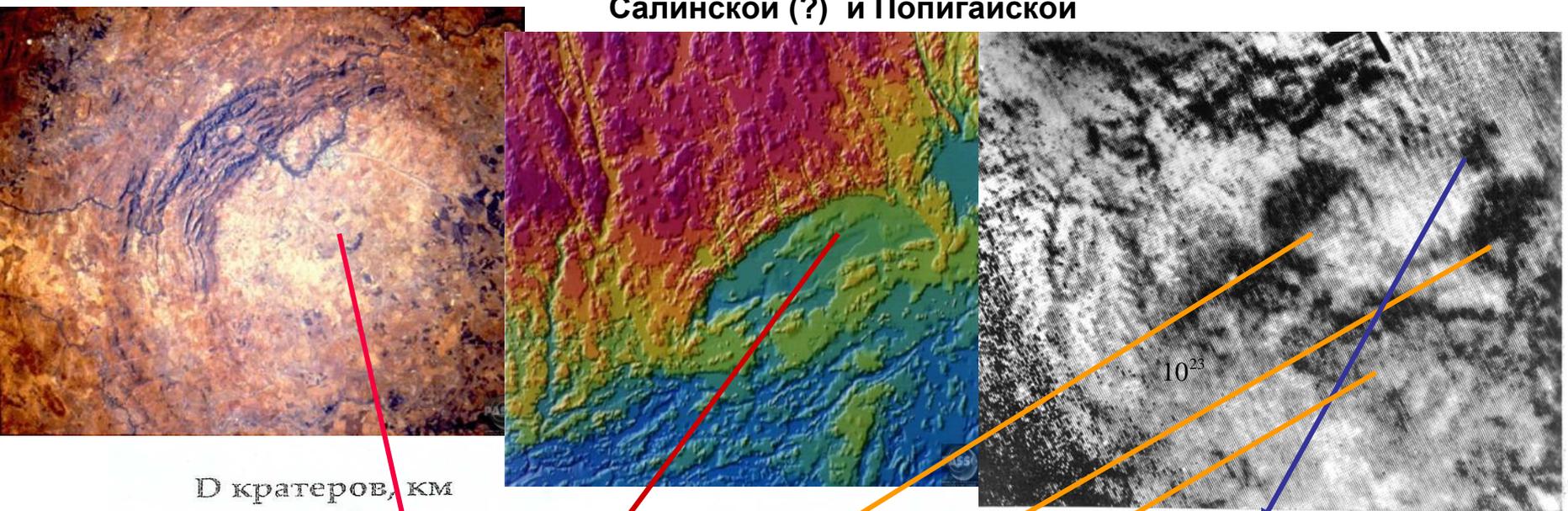


Цель работы – показать роль масштабных импактных событий, оказавших заметное влияние на ход тектоно-магматической эволюции ранней Земли на стадиях: а) зарождения сиалических ядер в палеоархее (около 4.0 млрд. лет); б) формирования мировой системы мезоархейских гранит-зеленокаменных поясов первого (3,4–3,3 млрд. лет) и второго (3,0–2,7 млрд. лет) поколений и в) катастрофических процессов термотектогенеза в палеопротерозое (2,5–1,8 млрд. лет) В ПЕРИОД ПЕРЕХОДА ОТ РОТАЦИОННО- ПЛЮМОВОЙ ТЕКТониКИ К ГОСПОДСТВУ ТЕКТониКИ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ.

. Из установленных 180 импактных структур только 9 датированы палеопротерозоем, из которых три (2,03–1,85 млрд. лет), относятся к масштабным (размеры кратеров 200–300 км).

Это купол Вредефорт (Южная Африка), структура Садбери (Канада) и недавно выявленная Котуйканская кольцевая структура на севере Сибири.

Гистограмма распределения импактных событий на Земле по времени и масштабам и космические снимки импактных структур Вредефорт, Садбери и Котуйканской, Куанамской (?), Арга-Салинской (?) и Попигайской



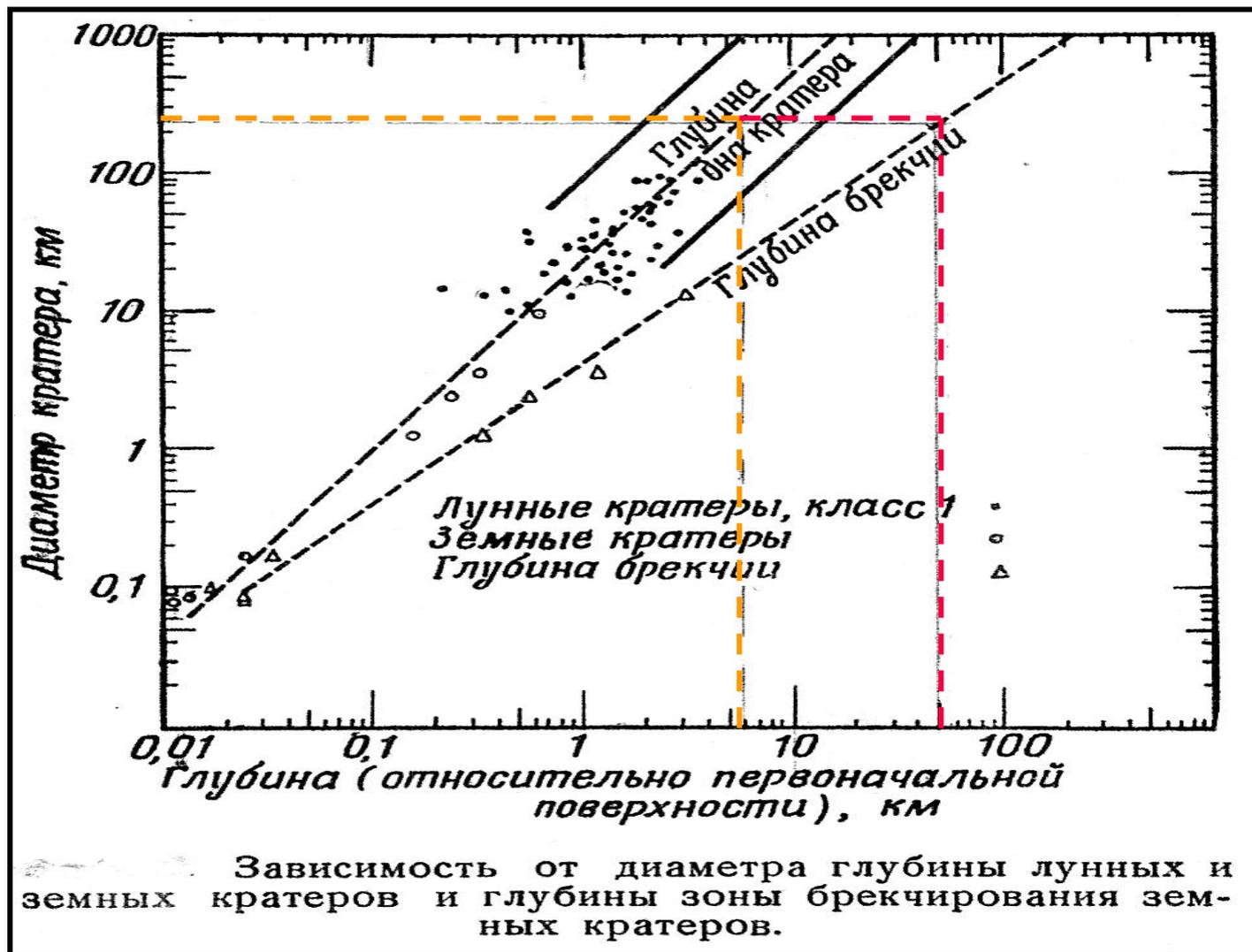
Основные положения исследования

- **А.** Массированная бомбардировка ранней Земли и Луны могла оказать влияние на изменение расстояния между ними и, отсюда, на скорость осевого вращения Земли в условиях падения астероидов в зону экватора («широтный эффект» Баренбаума).
- **Б.** В результате **в раннем архее** под действием центробежных сил быстро вращающейся ранней Земли колебательные изменения экваториального и полярного радиусов привели к формированию субэкваториального «горячего пояса», или пояса мантийных плюмов, с центрами зарождения силикатических ядер в местах падения гигантских астероидов (импактно-триггерный процесс), а также – к появлению, вследствие этого, первого суперконтинента.
- **В.** Высокоэнергетические массированные удары астероидов в **мезоархее, на границе архея и палеопротерозоя и в палеопротерозое** могли вызвать изменение осевой скорости вращения Земли, глубоко проникающую деформацию литосферы и импактно-триггерную активизацию мантийных плюмов с соответствующими экзогенными и эндогенными последствиями: **рифтогенезом, формированием зеленокаменных поясов первого и второго поколения, гранитообразованием, полихронным мантийным магматизмом и необратимыми процессами ТЕКТОНИКИ ПЛИТ: формированию и распаду суперконтинентов Пангея 0, Кенорленд и Колумбия в пространстве между критическими широтами $\pm 35^\circ$.**

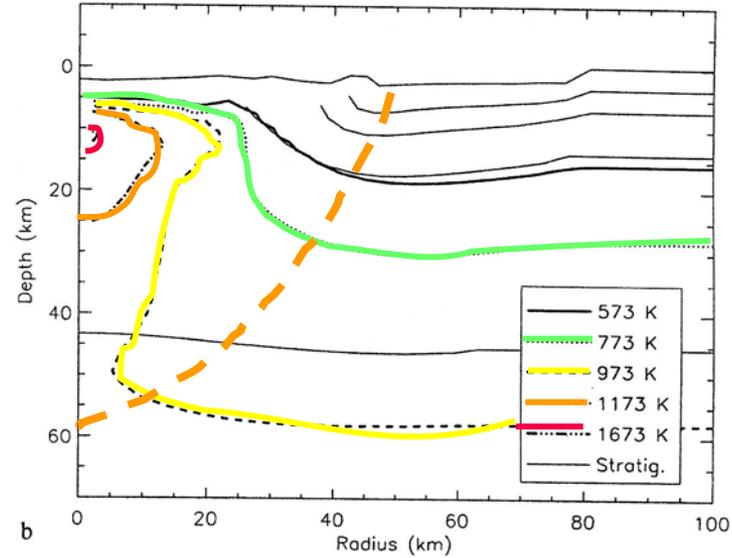
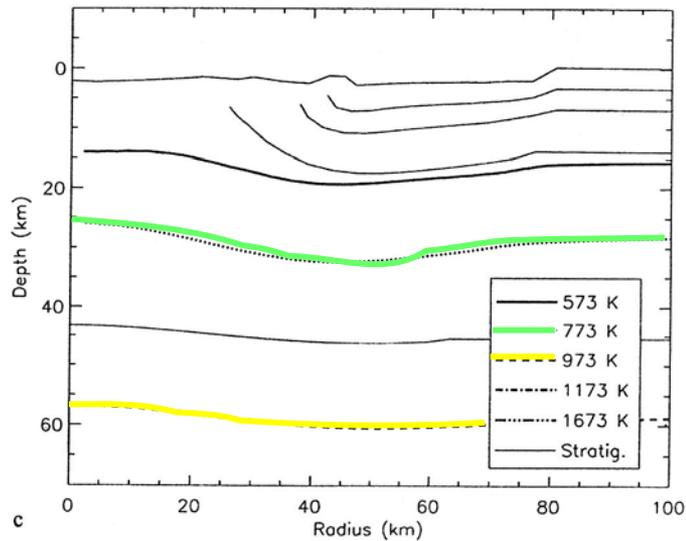
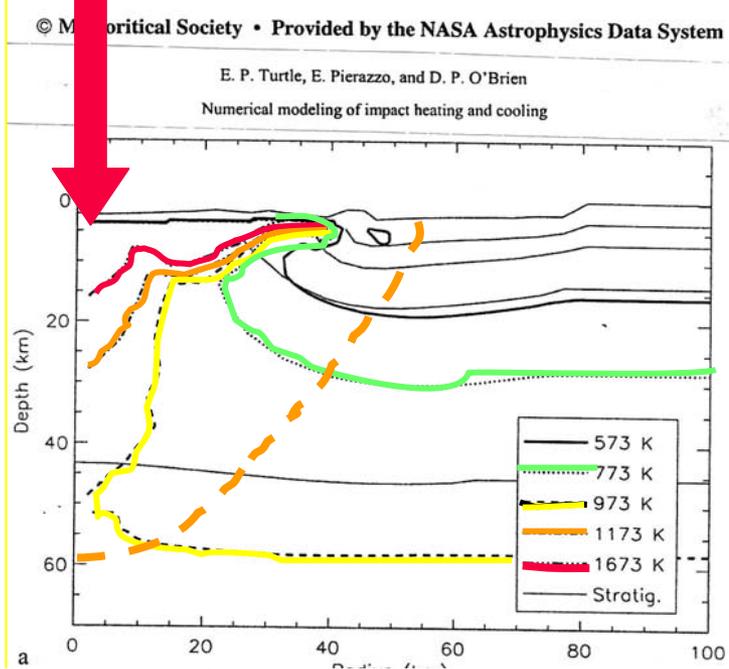
Основные тектонофизические характеристики масштабных импактных событий и их распределение во времени и пространстве

- Мощность каждого из масштабных событий с диаметром кратера 200–300 км (размер ударника – 10-15 км, скорость 20 км/с) оценивается
- **в $4-7 \times 10^{23}$ Дж, что эквивалентно энергии взрыва нескольких сот мегатонных водородных бомб (М.Озима, 1990) Мощность взрыва 1 килотонны (1 млн. кг тринитротолуола) равна $4,184 \times 10^{12}$ Дж.**

Подсчитано, что энергия одного удара астероида размером 10-15 км приводила к образованию кратера диаметром 200-250 км, глубиной 6-7 км и проникновению зоны брекчирования до уровня мантии - 40-50 км.



Результаты числового моделирования импактного события



**Изотермы шокowego и подъемного
разогрева (по E. Turtle et al, 2003 с
дополнением)**

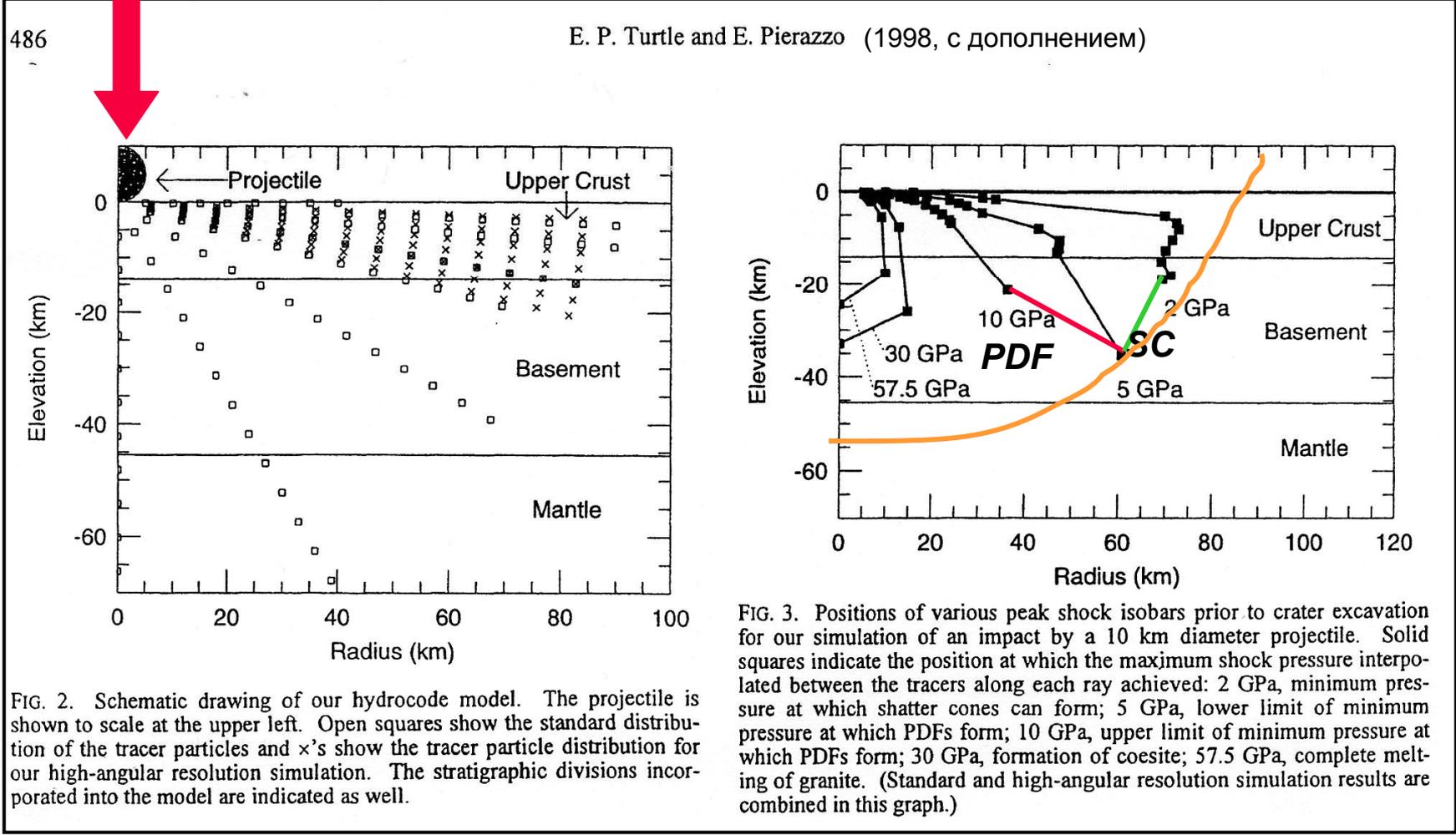
**а) немедленно после коллапса б)
через 0.3 млн. лет и в) через 30 млн.
лет после коллапса .**

**Модель для кратера диаметром 200
км, при диаметре ударника 14 км и
скорости падения 20 км/сек.**

**Выделена граница ударной
полусферы (по Н.Ж. Melosh, 1989)**

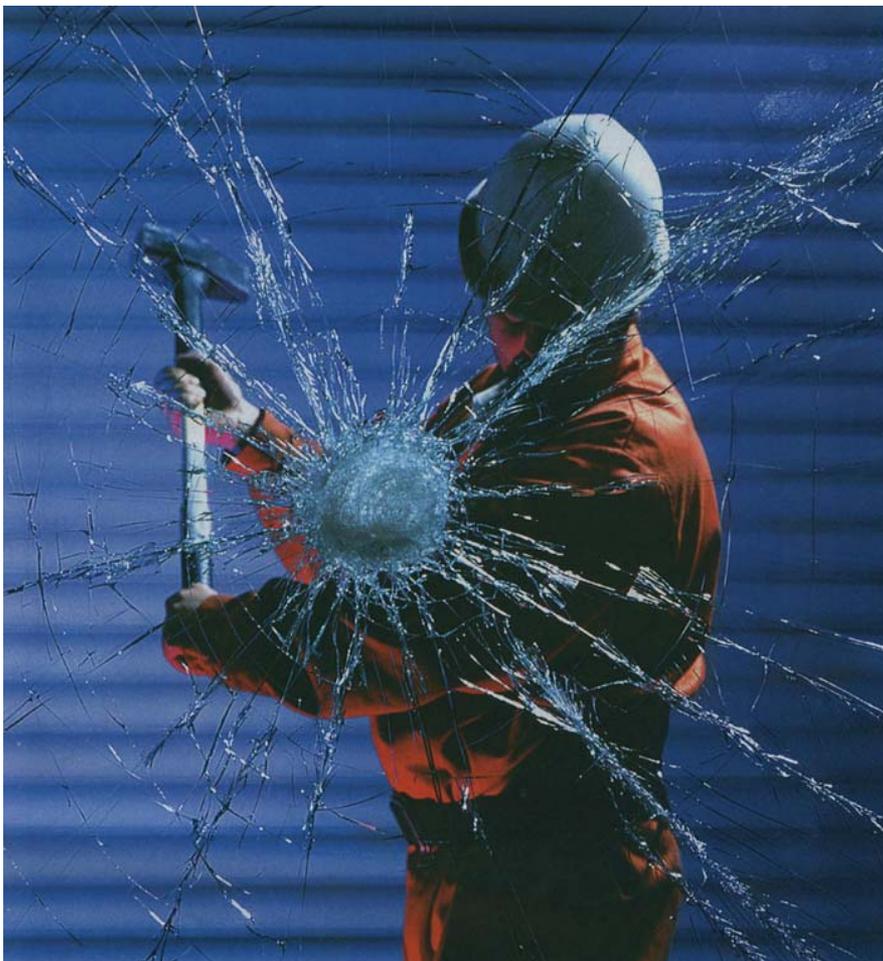
Fig. 4. Contours of total temperature due to both shock heating and uplift: a) immediately after collapse; b) 0.3 Myr after collapse; and c) 30 Myr after collapse. Cooling is by radiation and forced convection at the surface, and heat transport within the rock is by conduction. By 0.3 Myr, the surface has cooled to equilibrium with the atmosphere, but a steep temperature gradient remains below the surface. By 30 Myr, the crater has cooled completely to its equilibrium temperature profile. Thin, solid lines show the surface of the final crater and the post-collapse positions of prominent stratigraphic boundaries. The isotherms are somewhat curved due to the deformation of the different stratigraphic layers (which have different thermal properties) during the impact and collapse.

Стандартное распределение следов частиц удара на глубину и по латерали с высокой степенью разрешения. Положение различных пиковых изобар (диаметр ударника 10 км). Цветом обозначены зоны формирования PDFs и конусов разрушения (**shatter cones**) и границы ударной полусферы



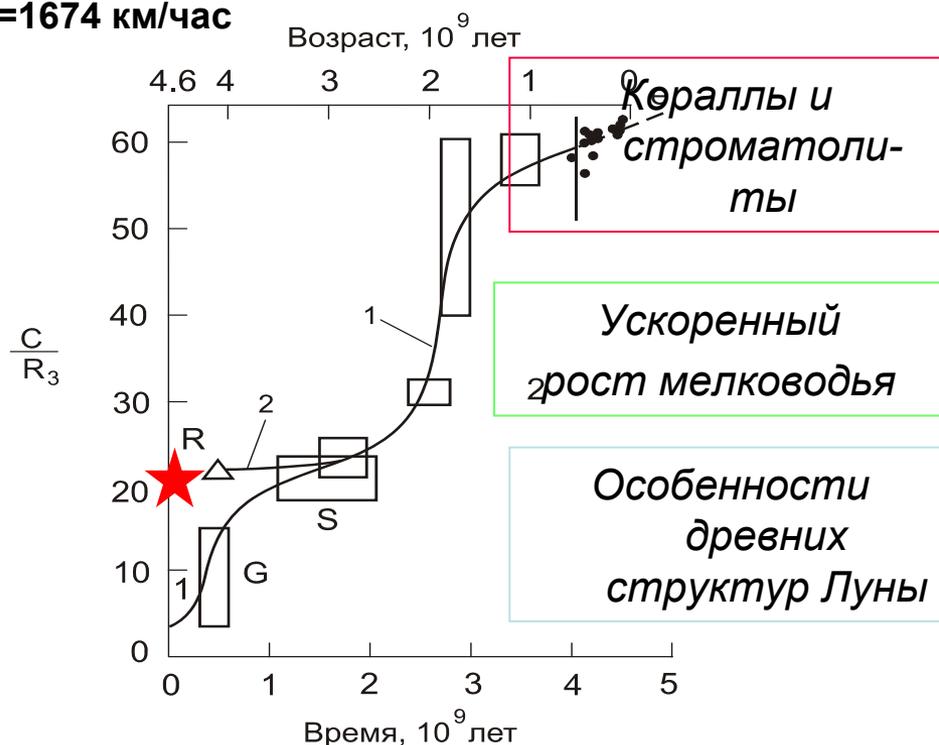
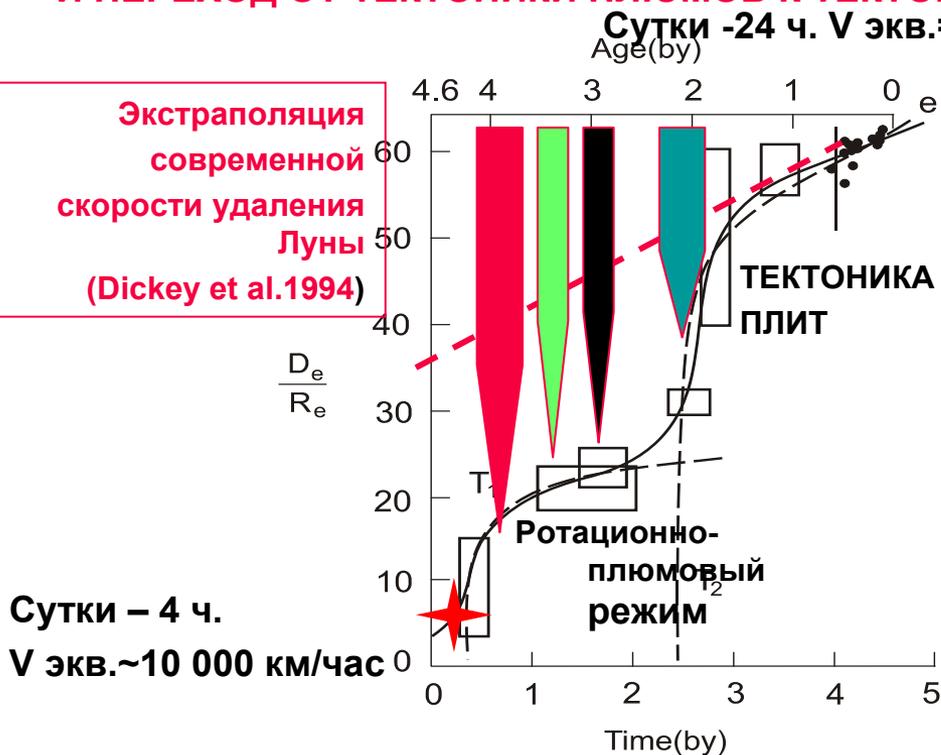
- В случае хрупкой мишени удары астероидов приводили также к её радиально-кольцевому дроблению, что видно на примерах искусственного моделирования импактного события (трещинная паутина – **cracknet**, или ударная кусковатость)

Диаметр 45 см



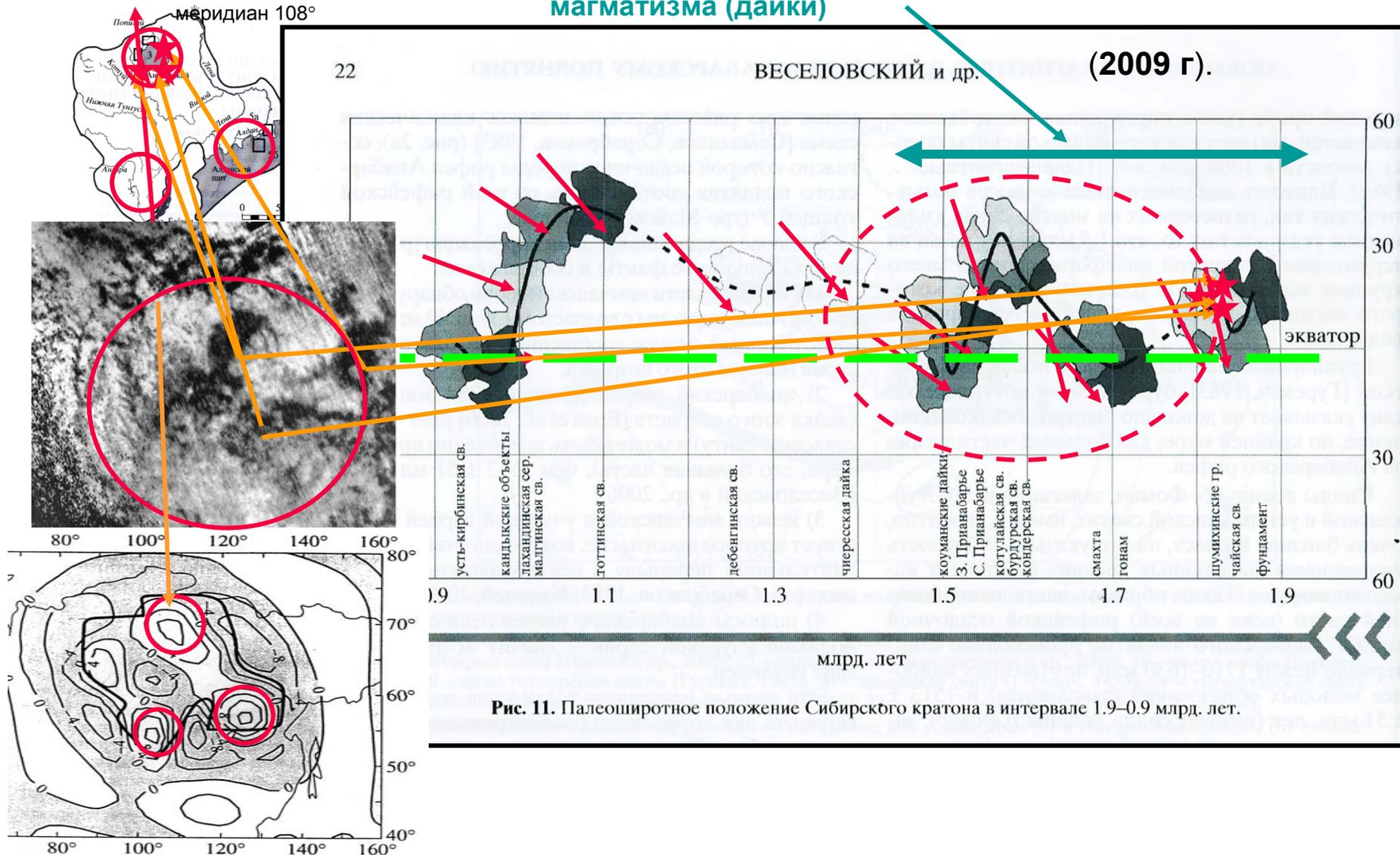
Под действием солнечно-лунных приливных сил и увеличения орбитального момента количества движения ($N=mr^2\omega$) Луна систематически удаляется от Земли (В.А. Цареградский, 1963; А.В. Binder, 1982; В.Н. Жарков, 1983; Ю.Н. Авсюк, 1996; и др.).

Постепенно, по мере удаления Луны, осевое вращение Земли замедляется. На эмпирической кривой изменения расстояния Земля-Луна выделяются перегибы, совпадающие с фазами массивированной бомбардировки Земли. С фазой ПТБ –3,9-3,8 млрд. лет назад – было связано формирование сиалических ядер и первых импактных алмазов (Мальков, 2005); с фазой 3,4–3,2 млрд. лет назад – архейских зеленокаменных поясов первого поколения Барбертон и Пилбара (A. Glikson, J. Vickers, 2006); с фазой 3,0 млрд. лет назад совпадает начало становления мировой системы зеленокаменных поясов второго поколения, а с фазой 2,5-1,8 млрд. лет назад - катастрофические процессы палеопротерозойского термотектогенеза и роста коры (K. Condie et. al., 2001-2002) И ПЕРЕХОД ОТ ТЕКТОНИКИ ПЛЮМОВ К ТЕКТОНИКЕ ЛИТОСФЕРНЫХ ПЛИТ



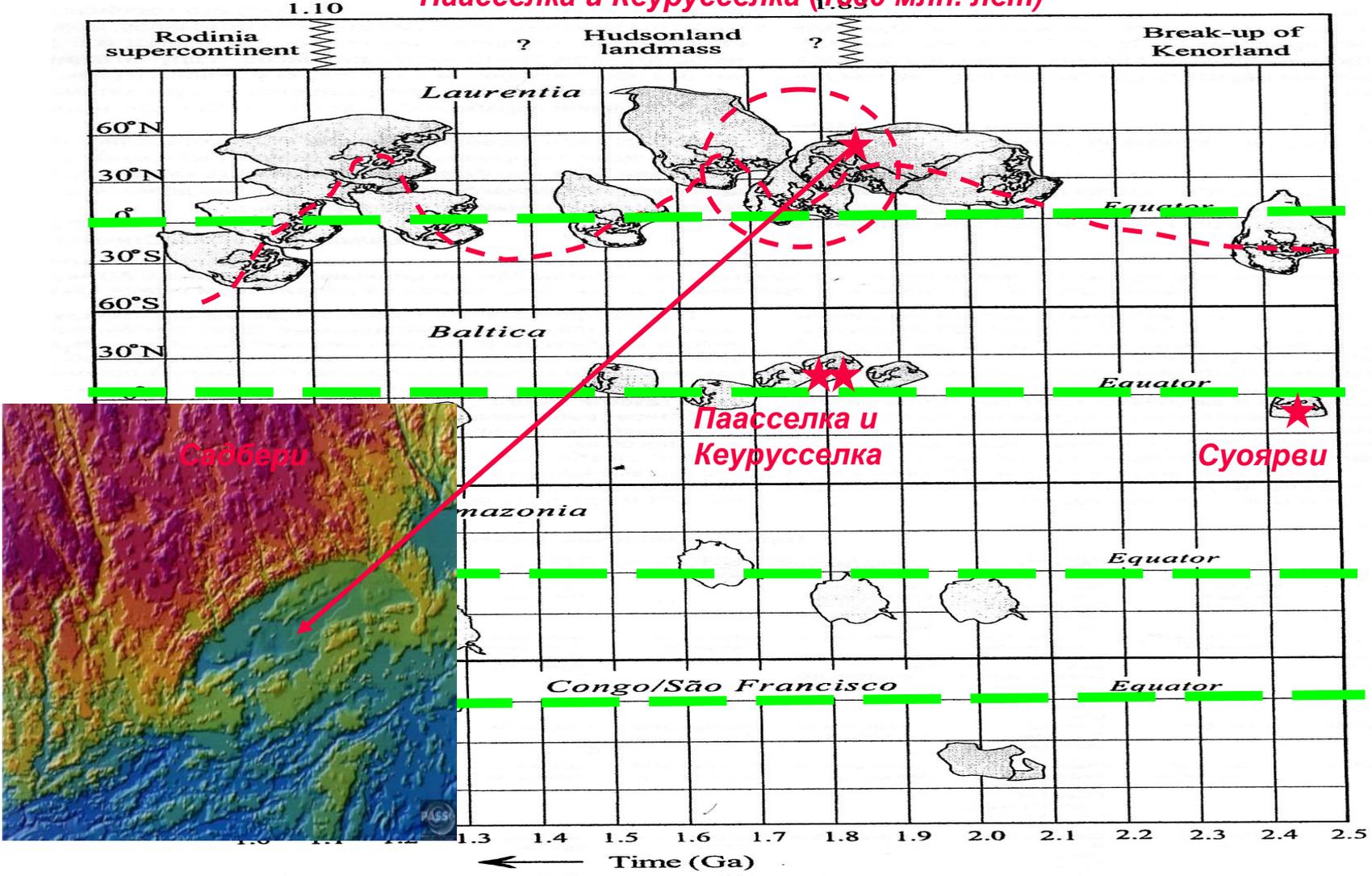
Палеоширотное положение и дрейф Сибирского кратона в интервале 1,9-0,9 млрд. лет. Выделено место Котуйканского, Куанамского и Арга-Салинского импактных событий (1900±50 млн. лет), а также контуры Хета-Олнекского, Алдано-Станового и других сиалических ядер (нуклеаров) Сибирской платформы на карте Magsat.

Показан интервал резкого изменения тренда движения кратона, а также проявлений палеопротерозойского автономного анортозитового и мезопротерозойского базитового магматизма (дайки)

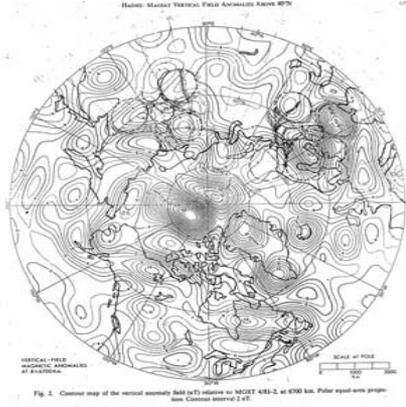
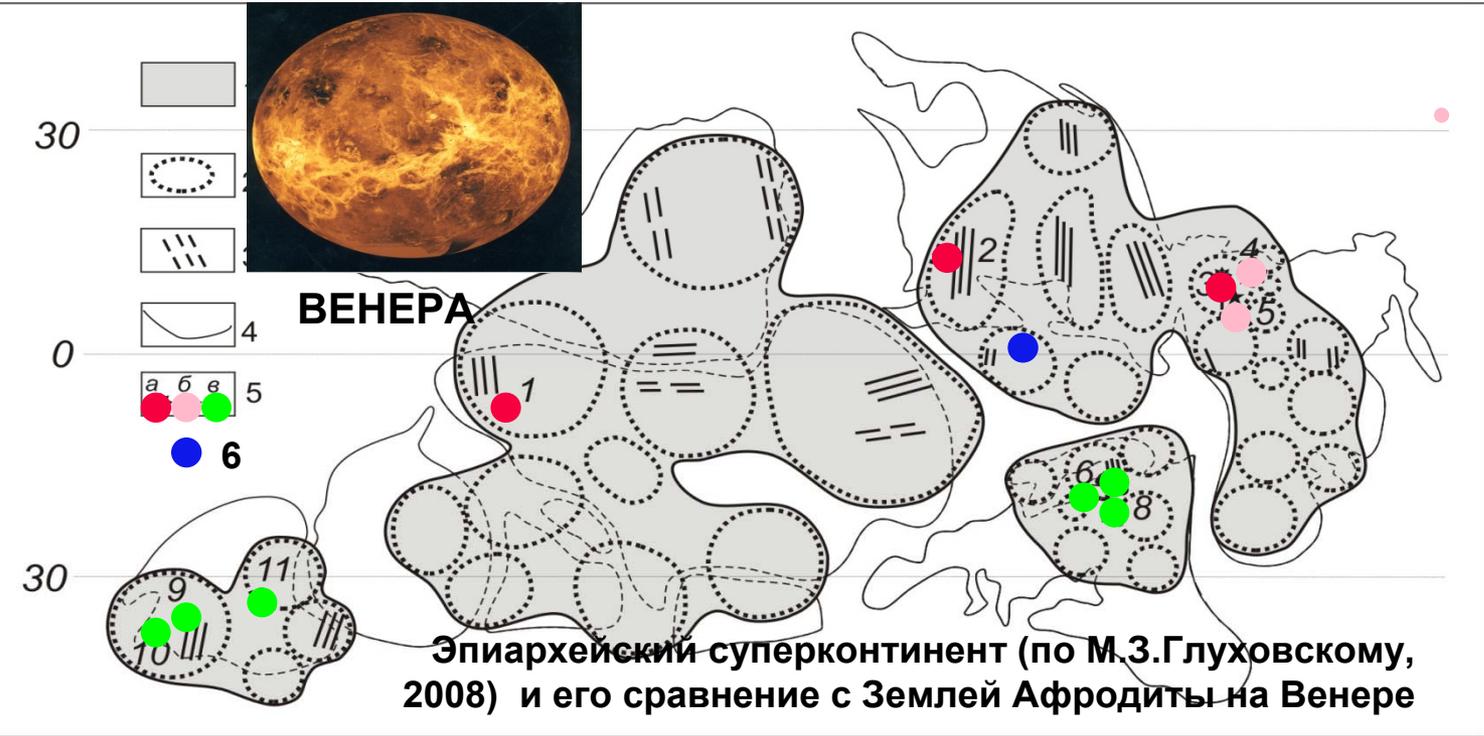


Палеоширотное положение и дрейф Лаврентии, Балтики и Амазонии за период 2,5–1,0 млрд. лет (L.J. Pesonen et al., 2003). «Широтный эффект» (по А. Баренбаум, 2002)

Выделены места импактных событий Садбери (1850 млн. лет), Суоярви (2400 млн. лет), Паасселка и Кеурусселка (1890 млн. лет)



Не исключено, что сиалические ядра (нуклеары) Земли возникли на месте ударных бассейнов фазы ПТБ за счет импактно-триггерного возбуждения мантии в условиях совмещения субэкваториального «горячего пояса» быстро вращавшейся Земли и «широтного эффекта» падения астероидов в зоне экватора [Тетерев и др., 2004; Баренбаум, 2002]. Многие нуклеары отражены в аномальном магнитном поле Земли («Магсат») В критических широтах «горячего пояса» ($\pm 35^\circ$) развивались зеленокаменные пояса как первого, так и второго поколения. Последние ориентированы субмеридионально и субширотно, согласно структурам растяжения и сдвигов в условиях полярного сжатия, связанного с быстрым вращением планеты. **Глобальные последствия палеопротерозойской астероидной бомбардировки Земли (резкое изменение скорости вращения и изменения положения барицентра системы Земля–Луна) также были связаны с падением большого количества - более 200 [Грив, Парментье; 1984; Хаин, Короновский, 2007] - астероидов в зону экватора, согласно «широтному эффекту».**

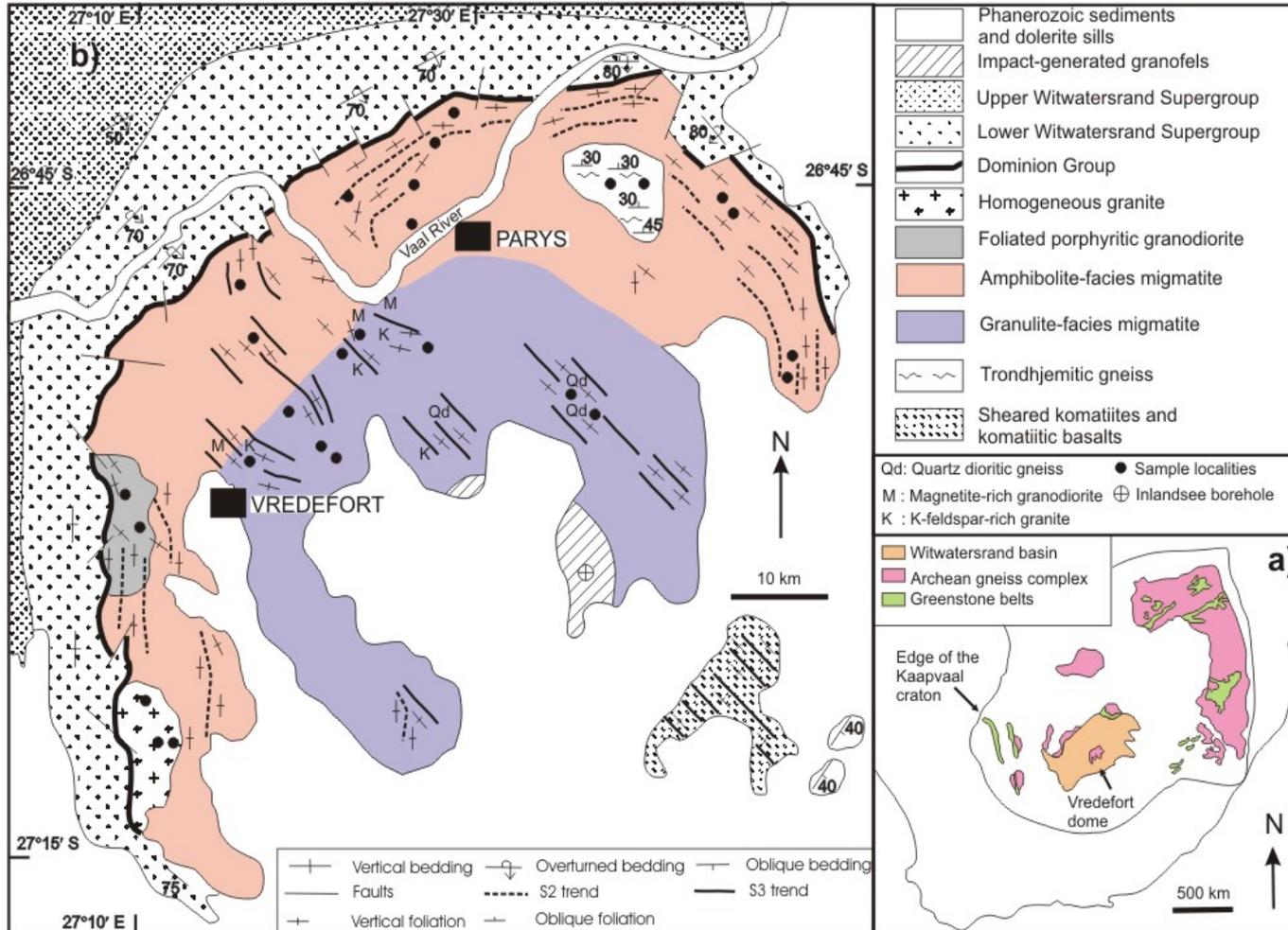


(по G.Haines, 1985)

Количество нуклеаров примерно совпадает с предполагаемым числом астероидов фазы ПТБ (40) [ТЕТЕРЕВ И ДР..2004]

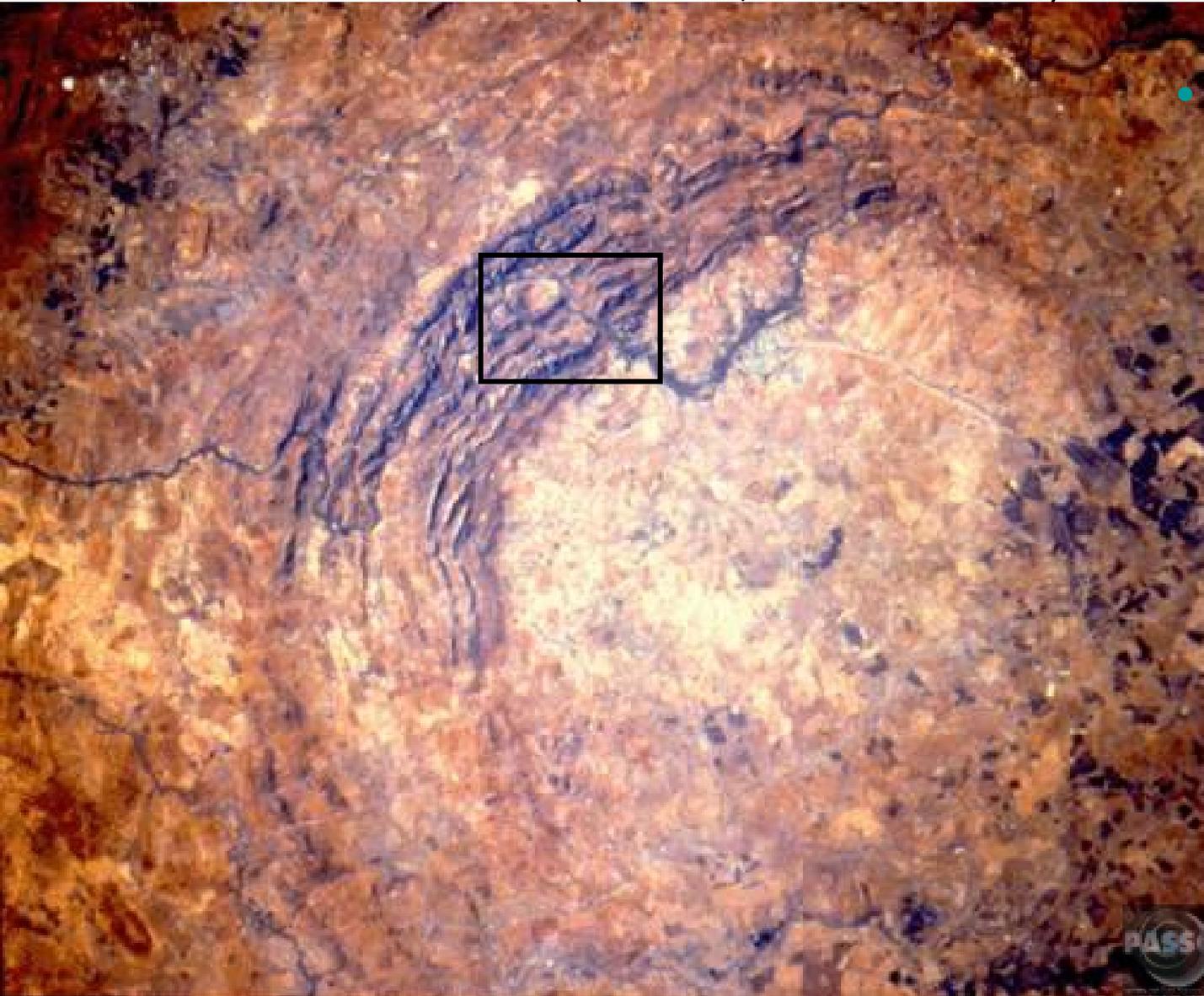
1 – раннедокембрийские кратоны; 2 - сиалические ядра – нуклеары; 3 – направления простираения зеленокаменных поясов; 4 – границы современных континентов; 5 – палеопротерозойские астроблемы: (а) крупные установленные, (б) предполагаемые и прочие (в). 6 – архейская астроблема Манитсоок.
 Контурсы кратонов (по L. Pesonen et. al, 2001; J. Valley, 2006 с дополнениями)

● **а) СХЕМАТИЧЕСКАЯ ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА КААПВААЛЬСКОГО КРАТОНА И б) ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА КУПОЛА ВРЕДЕФОРТ, ФОРМИРОВАНИЕ КОТОРОГО СВЯЗАНО С ИМПАКТНЫМ СОБЫТИЕМ 2,02 МЛРД. ЛЕТ НАЗАД (ПО С. LANA et al., 2004)**



- **Метаморфическая зональность купола Вредефорт. Гранулитогнейсовое ядро возрастом 3,1 млрд. лет и граниты, связанные с импактным событием. По периферии - амфиболитогнейсовое обрамление. Начальный диаметр структуры оценивается в 250–300 км. Размер ударника – до 20 км. Скорость падения 20 км/с.**
- **В центре купола расположен массив импактно-генерированных гранофировых гранитов**

Ядро купола Вредефорт (диаметр 70-80 км) на космическом снимке Space Shuttle STS 511-33-56AA высокого разрешения (PASSC, Canada. 2007)



Внешняя амфиболито-гнейсовая зона ядра купола интенсивно деформирована конформно центральной гранулитогнейсовой части кольцевой структуры, которая образована архейскими (3,1 млрд. лет) породами средней коры, выдвинутыми в её верхние горизонты в результате обратной реакции на ударное воздействие астероида (релаксации).

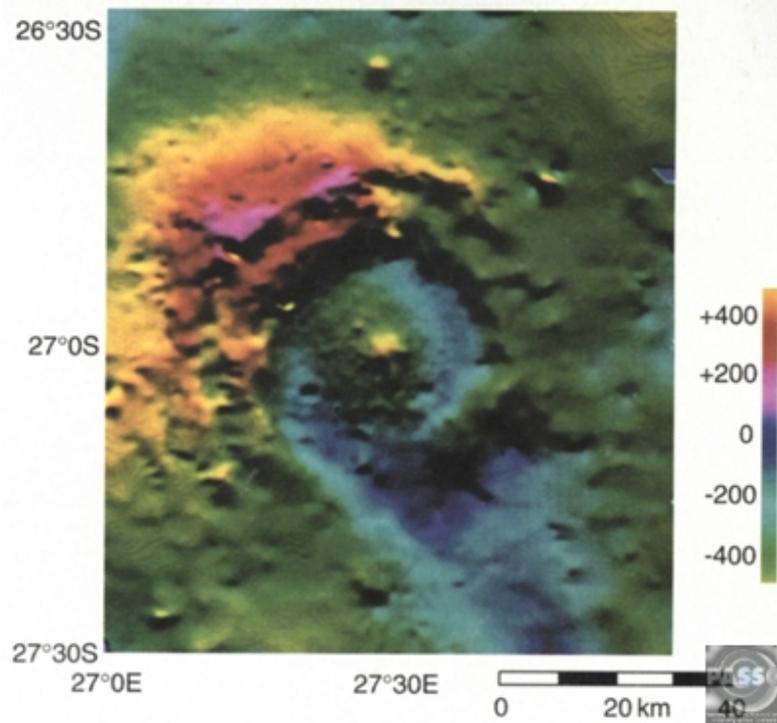
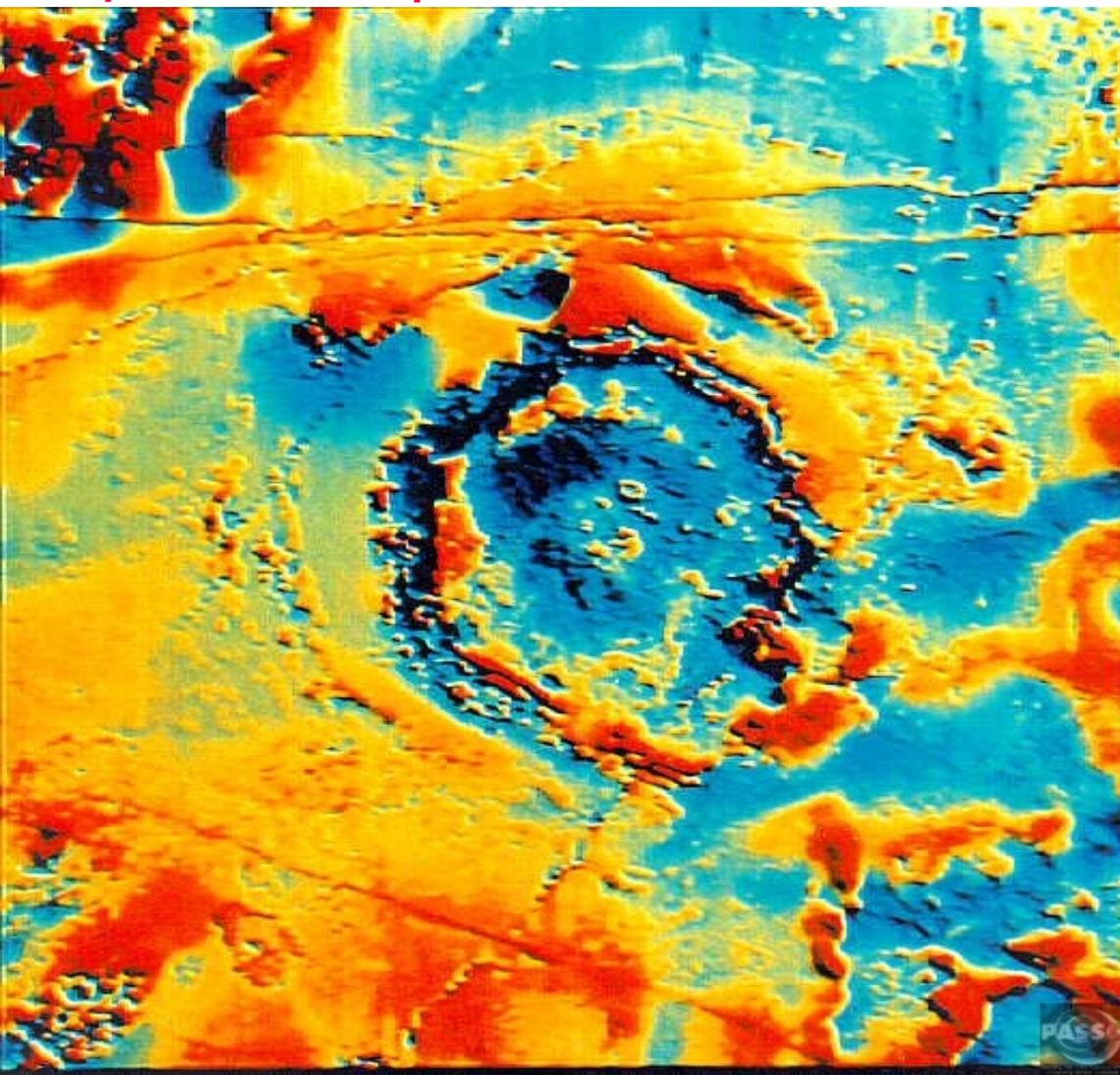


Характер раздробленности (ударной конусоватости) и конические структуры метаморфических пород во внешней амфиболито-гнейсовой зоне купола Вредефорт. Видна иерархическая размерность блоков (округленно 10 x 10,5 x 5, 2,5 x 25 и т. д. км), ограниченных дуговыми и радиальными линеаменентами.



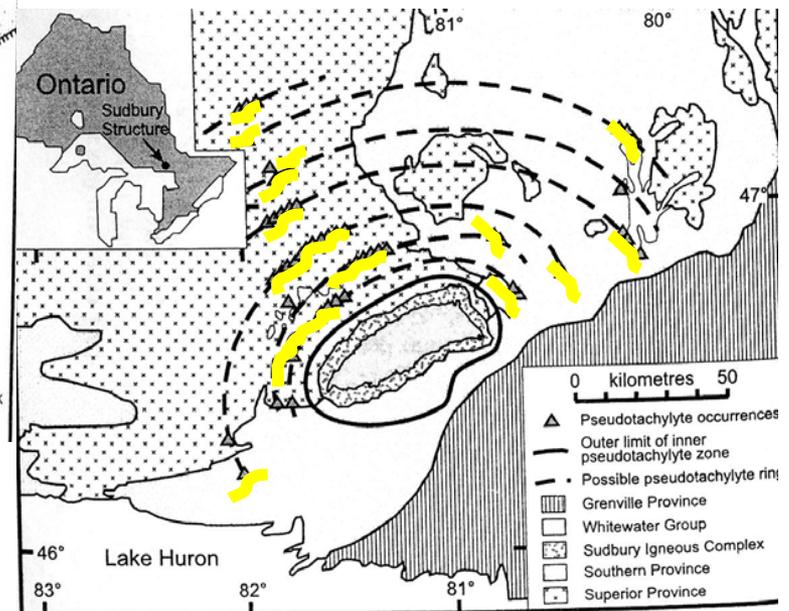
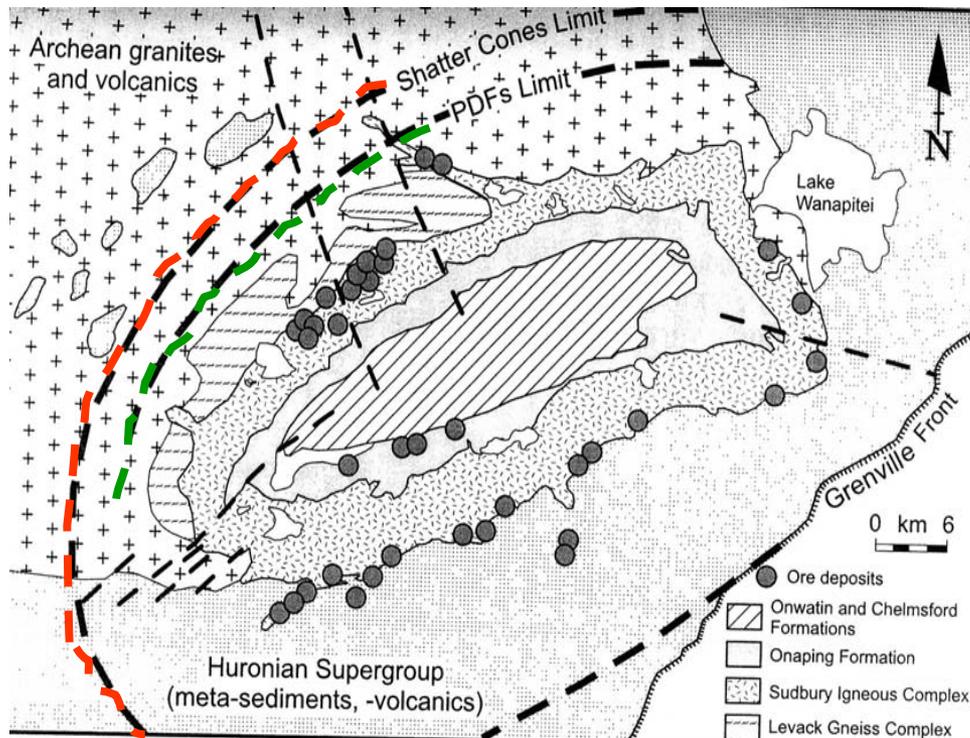
Кольцевая зональность аномального магнитного и гравитационного (в редукции Буге) полей импактной структуры Вредефорт (Uwe Reimold, PSSC. 2007). *Под воздействием постшоковых температур, близких к T точки Кюри, меняются магнитные характеристики пород: происходит накопление остаточного магнетизма, меняющегося в результате шокового распада мафических минералов.*

- Ударная трещиноватость приводит к разуплотнению коры, проникает до мантии и тем самым влияет на характер поля силы тяжести.



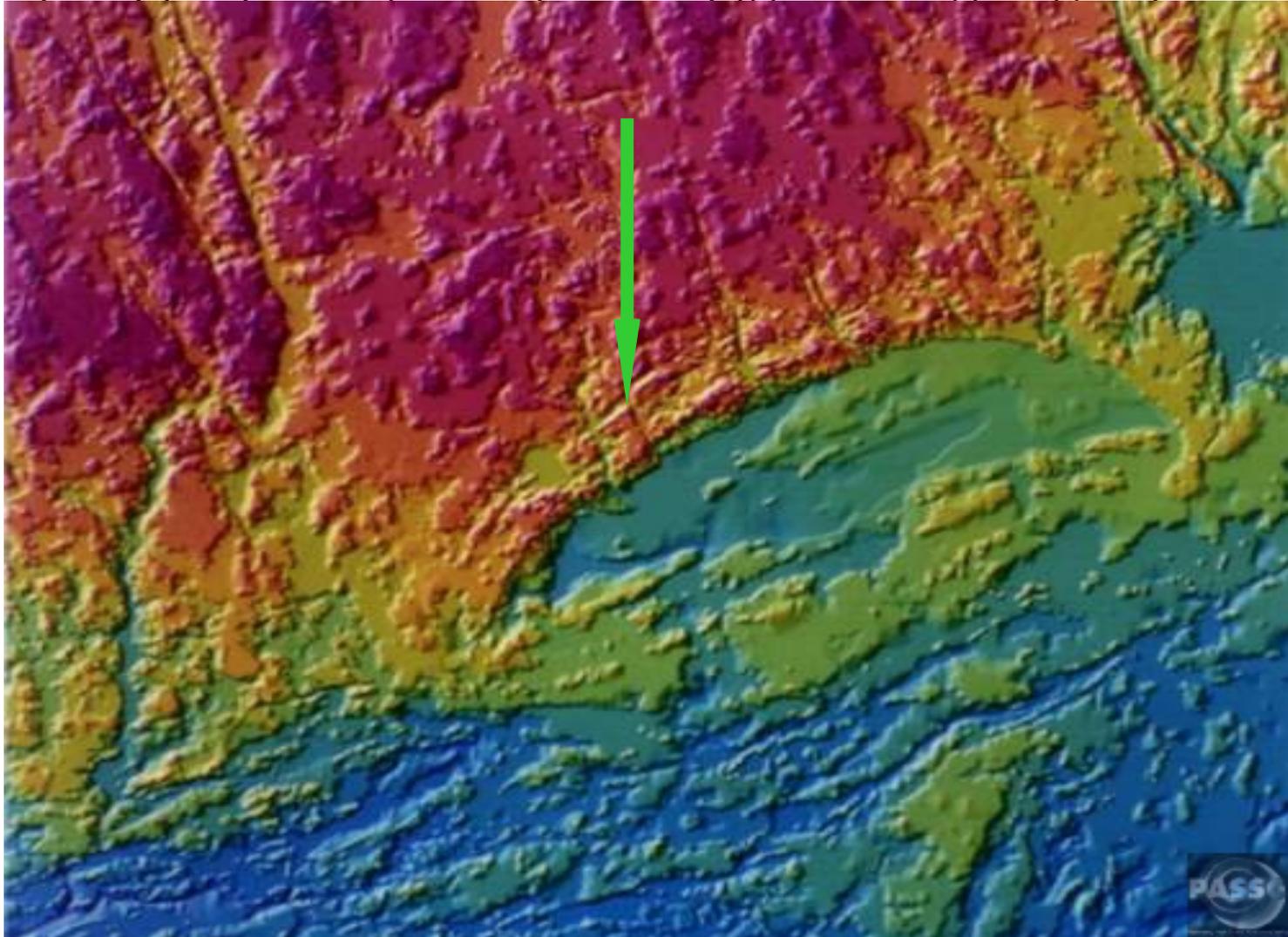
Схемы геологического строения района Садбери, размещения рудных месторождений и границ распространения индикаторов импактного события (1850 ± 3 млн. лет) в радиусе 250 км (**конусов разрушения**, **планарных деформаций** в минералах – PDF и **псевдотахилитов**).

В центре структуры расположен импактно-генерированный расслоенный интрузивный комплекс Садбери (Grieve, A. Therriault, 2000)

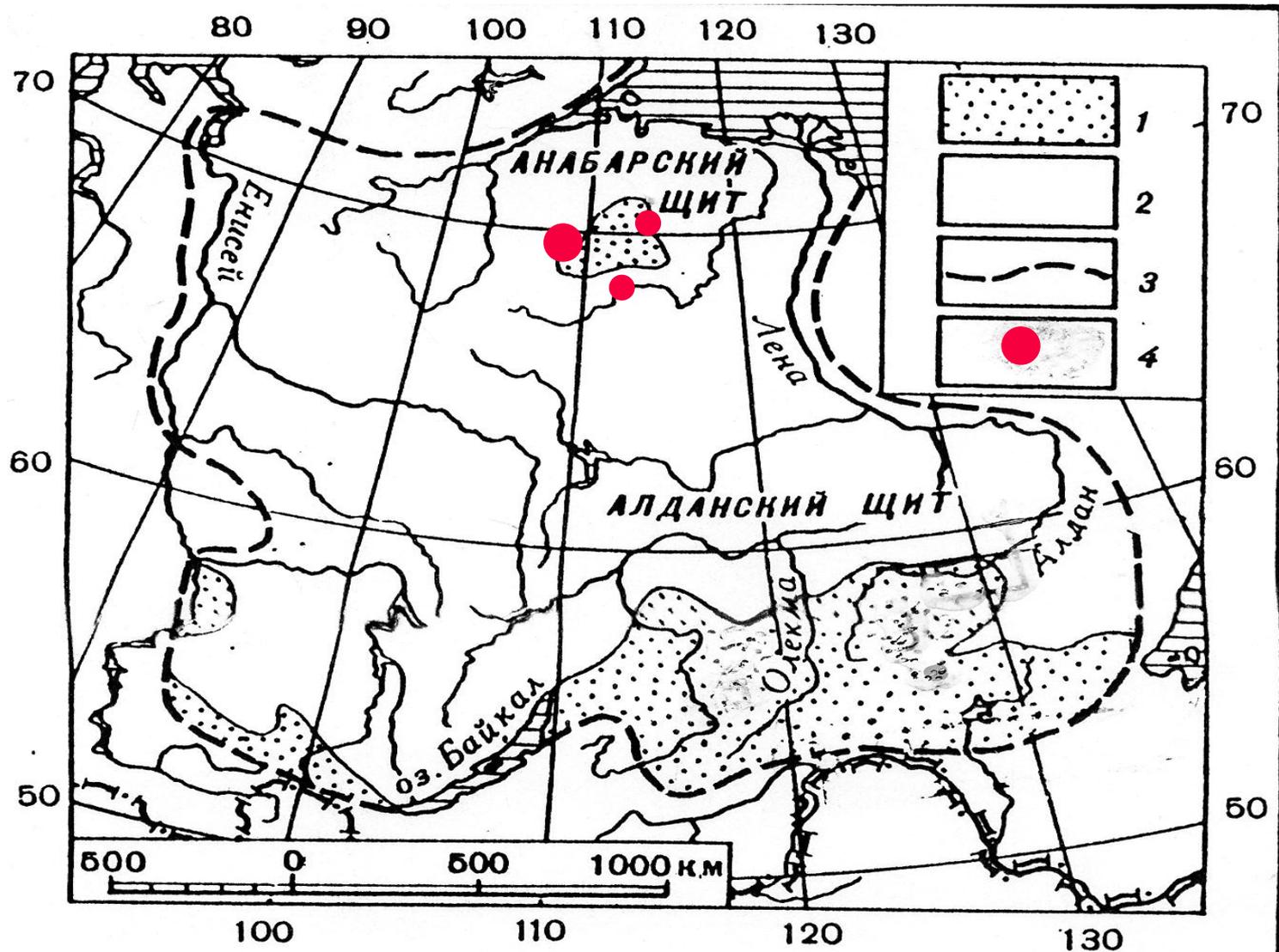


Цифровая рельефная модель структуры Садбери (PASS, 2007)

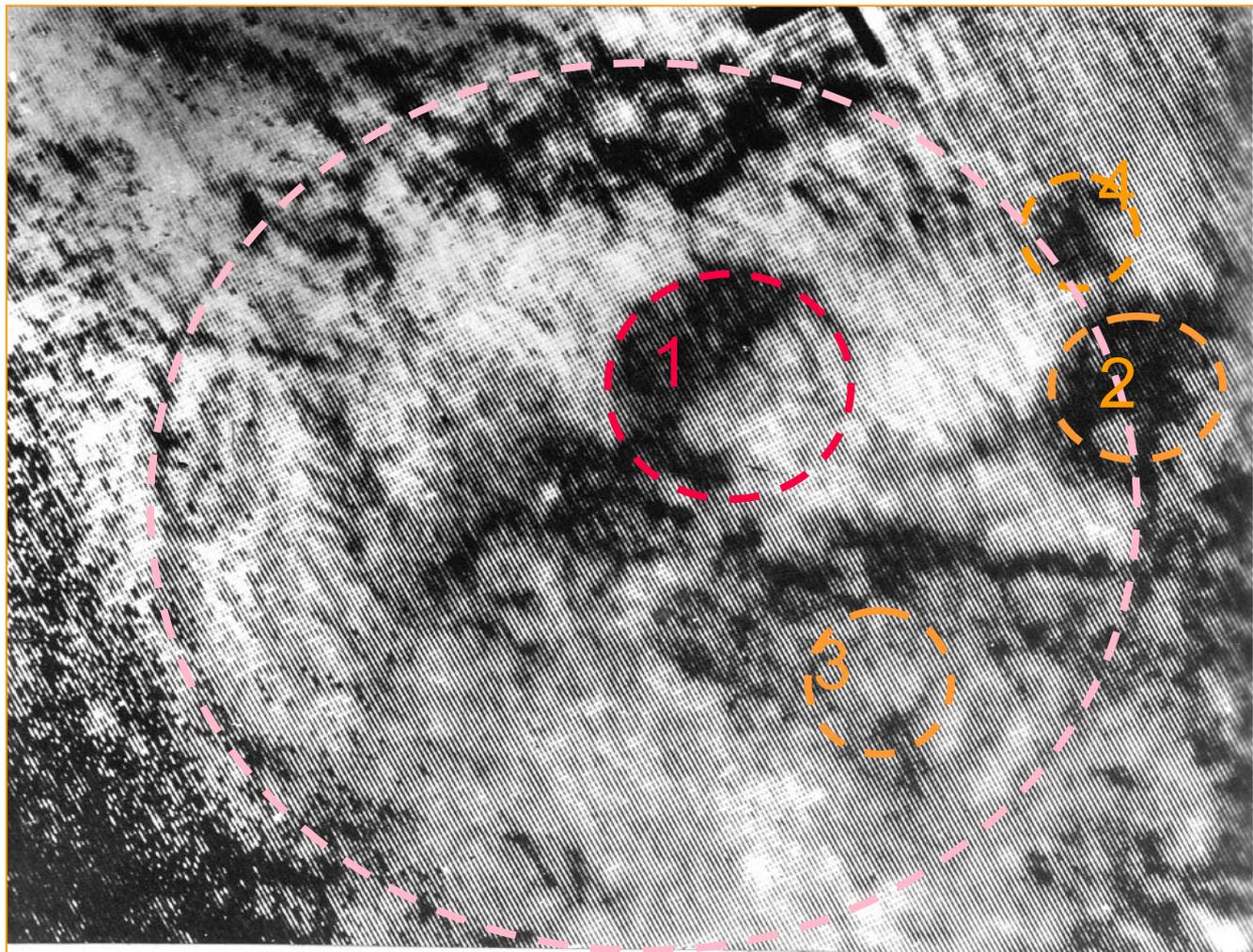
Обратим внимание на прямоугольные блоки ударной кусковатости, ограниченные дугowymi и радиальными линеаменами в районе развития кристаллических пород Канадского щита. Радиальные разломы контролируют размещение офсетных рудоносных даек долеритов.



Обзорная карта Сибирской платформы: положение Котуйканской, Куанамскри и Арга-Салинской кольцевых структур



- **Космический снимок низкого разрешения ESSA-8**
- **м-ба 1:5 000 000. Северная часть Сибирской платформы**



Котуйканская
(1),

Куанамская (2),

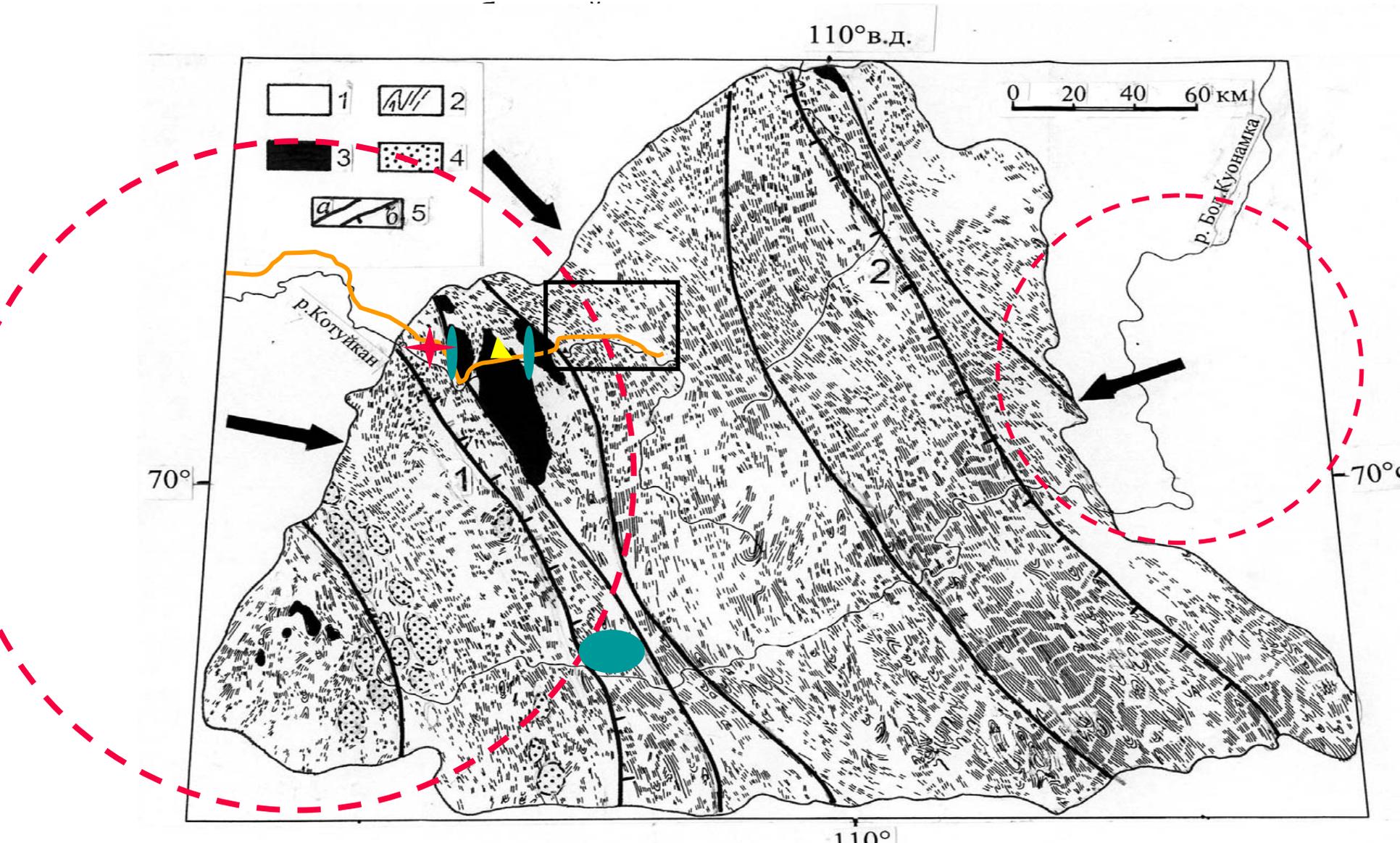
Арга-
Салинская
(3)

кольцевые

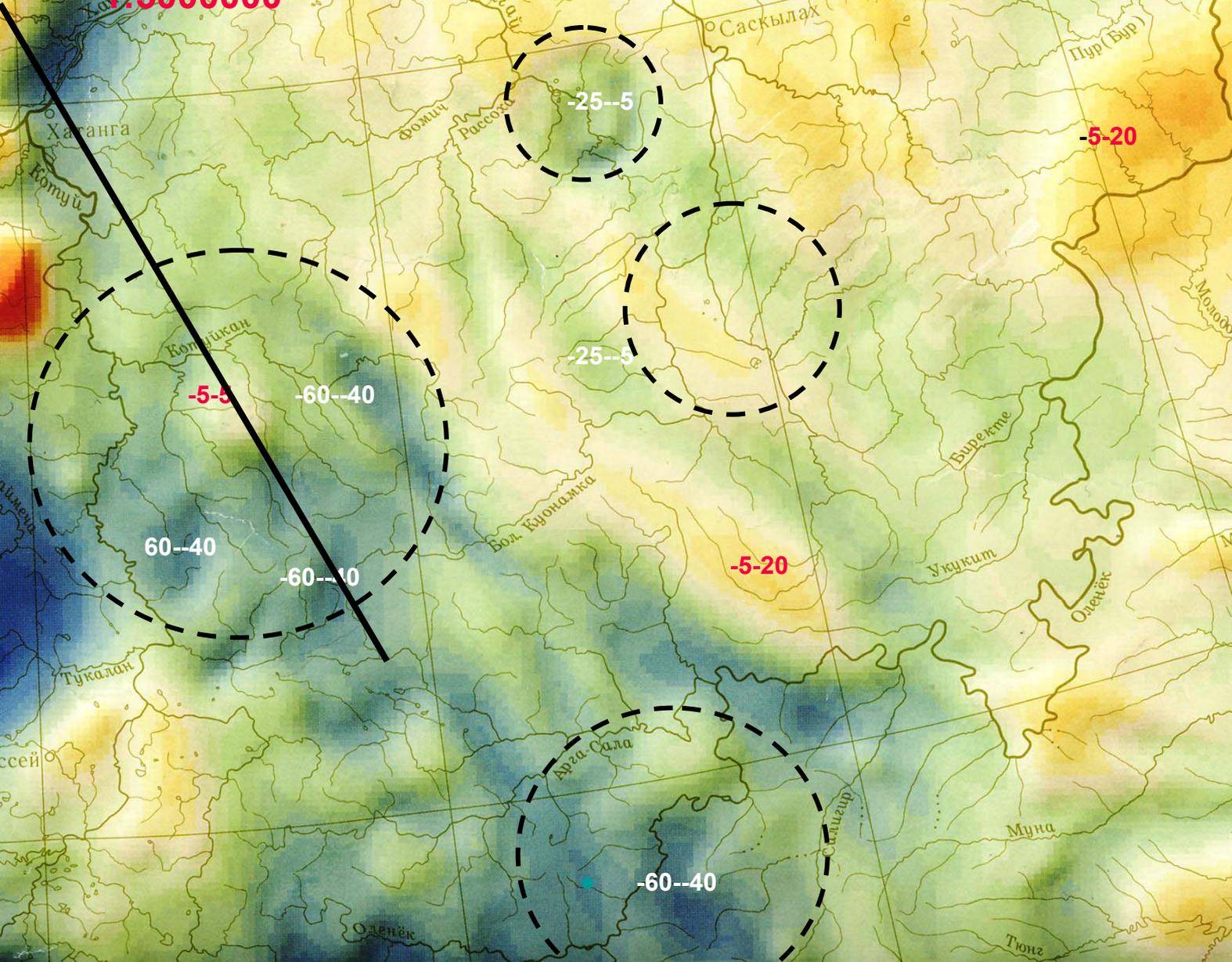
структуры.

Папигайский
кратер (4).

Простирание кристаллизационной сланцеватости и зон древних разломов Анабарского щита по материалам дешифрирования аэрофотоснимков (по Л.И. Шахотько). Выделены: Котуйканская кольцевая структура, которая пересекает древние линейные направления кристаллизационной сланцеватости; массивы анортозитов; места находок конусов разрушения,

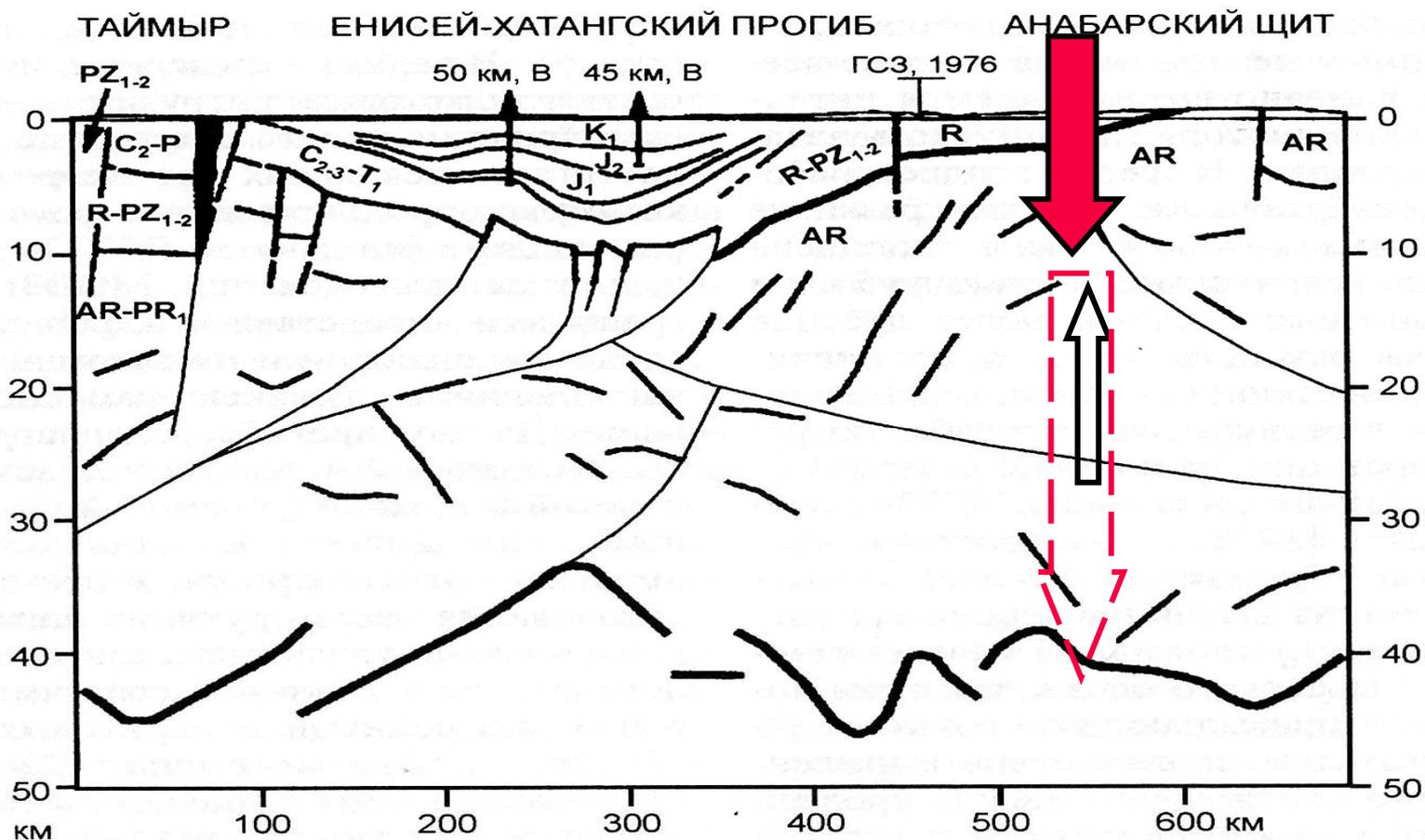


Гравиметрическая карта района Анабарского щита и прилегающей территории в редукции Буге масштаба 1:5000000



Котуйканская, Арга-Салинская структуры, а также Поппайгайский метеоритный кратер совпадают с ареалами разуплотнения

Линия профиля МОВЗ



Эффекты глубинной ударной деформации и постударной релаксации



Рис. 4. Глубинный разрез земной коры Енисей-Хатангского прогиба вдоль профиля МОВЗ р. Маган–р. Тарей (ГЕОН, 1981 г.).

1 – поверхность дорифейского фундамента и Мохоровичича, 2 – сейсмические границы по данным МОВЗ, 3 – сейсмические границы по данным ОГТ, 4 – разломы и зоны тектонических контактов между коровыми террейнами (пунктир), 5 – крупные интрузивные тела, 6 – пересечения с другими профилями ГСЗ и МОВЗ.

По С.Л. Костюченко, 2000, с дополнением

Ортогональная система блоковой структуры фундамента (кусоватость), обусловленная пересечением дуговых и радиальных линейаментов Котуйканской кольцевой структуры. Это результат шокового тектогенеза или импактного землетрясения, приведшего к формированию трещинной паутины (cracknet)



5 км

17.6 км

Image © 2008 TerraMetrics

© 2007 Google™

Координаты 70°25'26.33" С 108°20'29.05" Е

Потоковая передача 100%

Высота камеры 60.73 км

A

Некоторые радиальные трещины «залечены» мезопротерозойскими дайками долеритов, которые, вместе с приразломной гидросетью, подчеркивают полигональную делимость коры.



5 км

Микробрекчии - наивысшая степень раздробленности в иерархической системе кусковатости. Видны различно ориентированные «окатанные» меланократовые включения наиболее плотных пород среди и раздробленного и метаморфизованного матрикса.



***Левый берег р. Котуйкан, в 11 км ниже устья р. Арбын.
Метаморфизованные брекчии – еще один макроиндикатор импактного
события.***

***Обломки амфиболитов в кварц-полевошпатовом матриксе секутся
прожилком псевдотахилитов***



В русле р. Котуйкан в 3 км выше устья р. Меркю между Западным и Центральным массивами анортозитов встречаются неокатанные глыбы деформированных конусов разрушения, которые развиваются по полосчатым бластомилонитам.



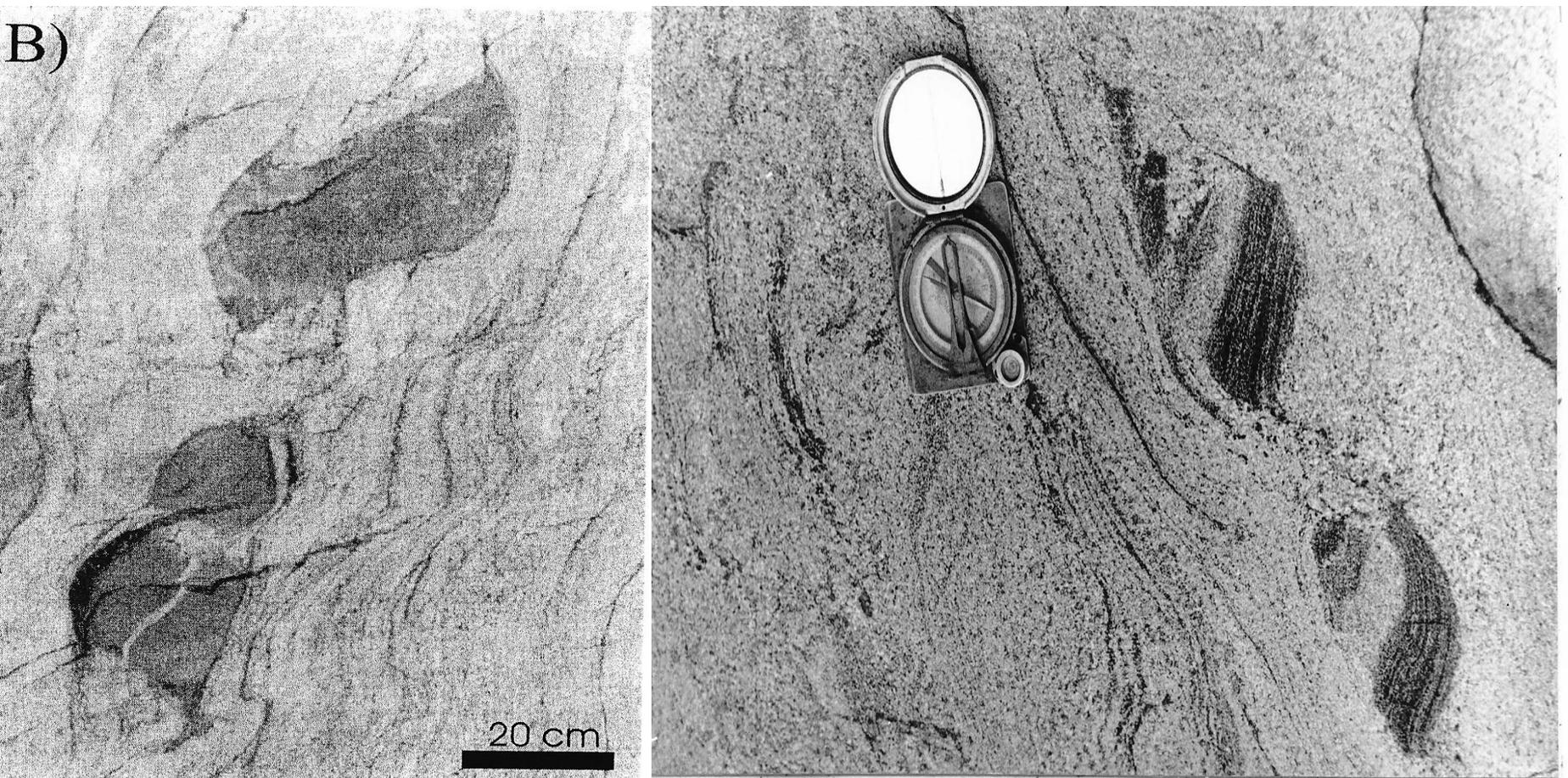
Левый берег р. Котуйкан, 16 км выше устья р. Меркю.

Клиновидный и ромбоэдрический кливаж или конические структуры в метаморфических породах, которые интерпретируются как одна из форм шоковых деформаций.

Вид сверху (2 x 1,5 м)

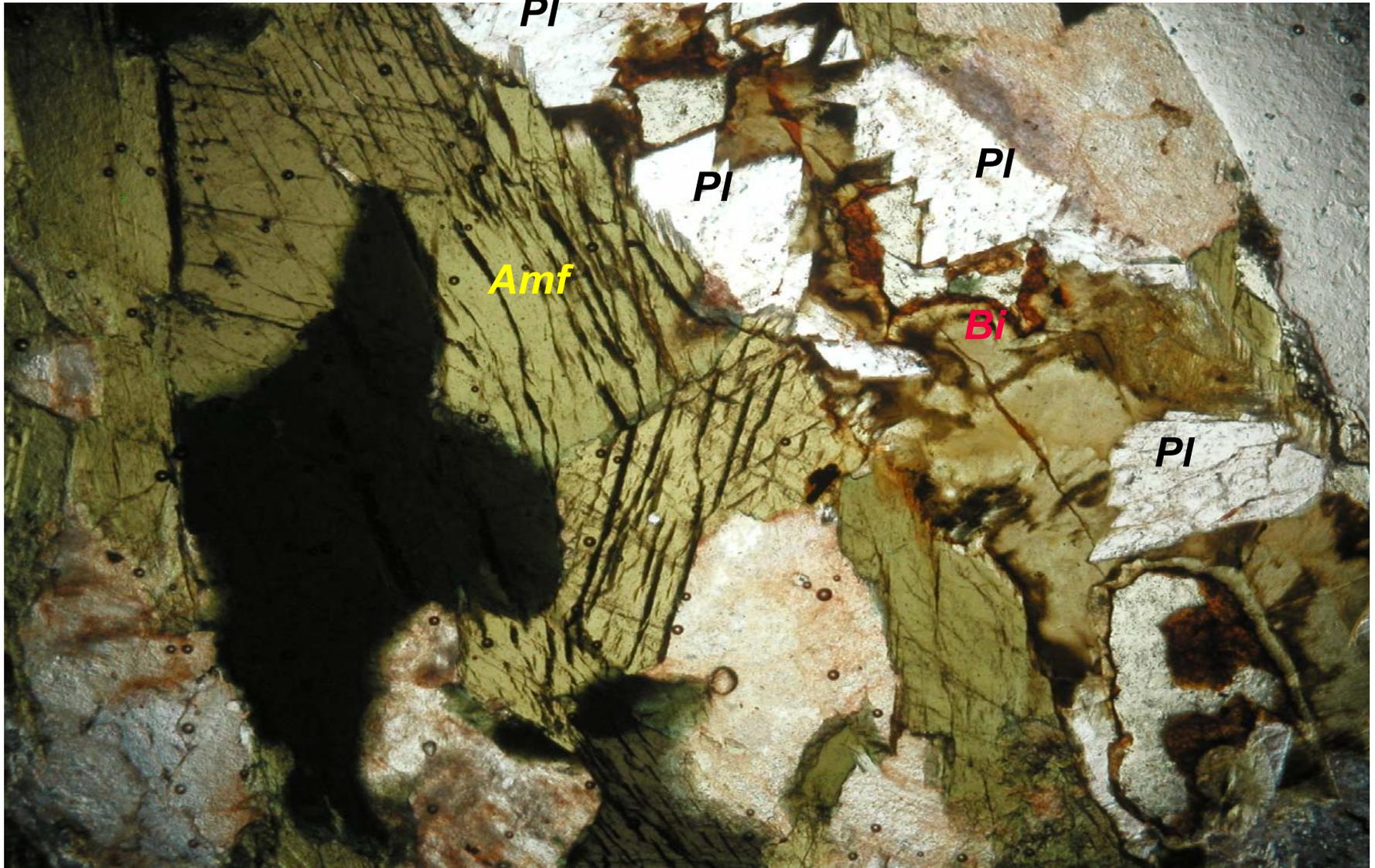


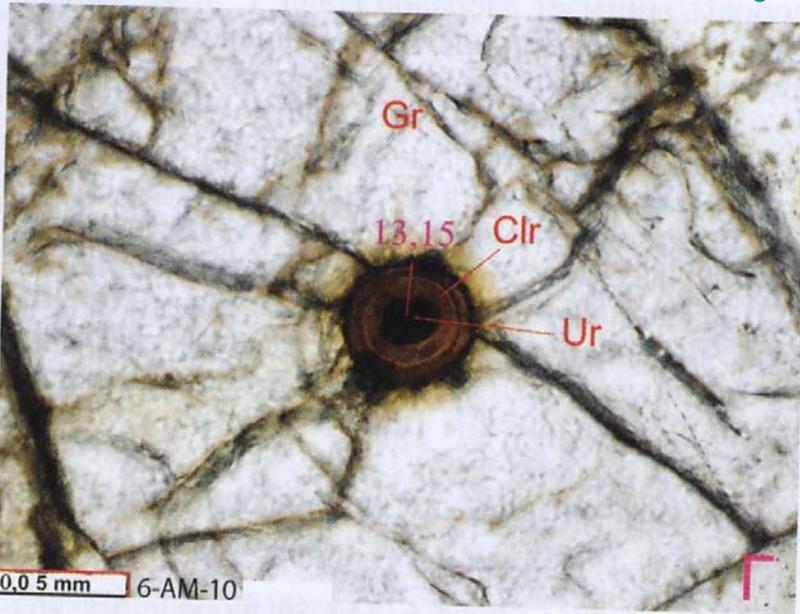
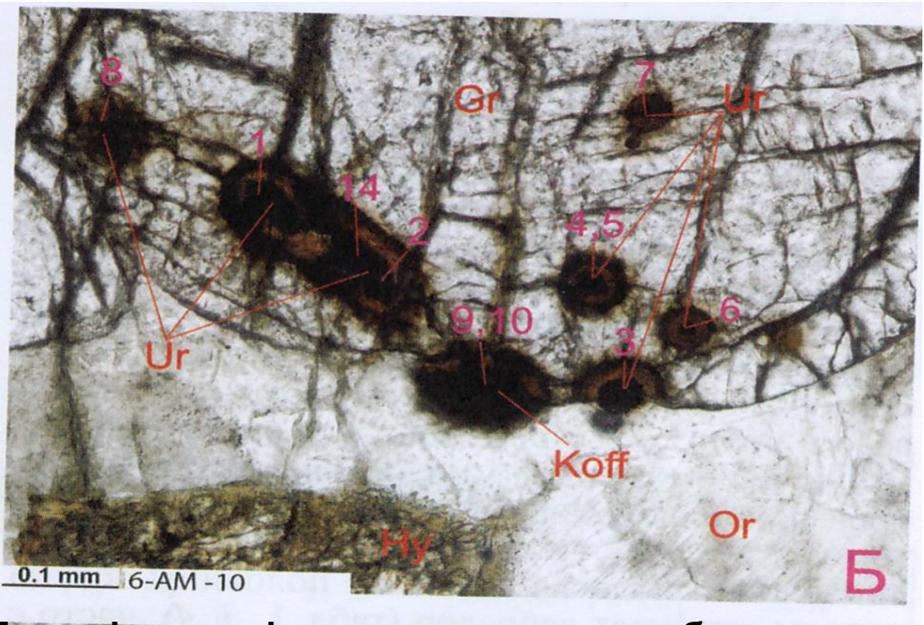
Слева будинированные амфиболитовые мигматиты вытянутые в сопряженные пластические сдвиги во внешней амфиболито-гнейсовой области купола Вредефорт. Это структуры типа S3 последнего предположительно синимпактного этапа вязких деформаций, завершившихся постимпактным этапом формирования псевдотахилитов (С. Lana, 2003). Справа аналогичные структуры в амфиболитовых мигматитах Котуйканской кольцевой структуры (р Котуйкан, левый берег, 11 км ниже устья р. Арбын)



Планарные деформации в минералах (PDF)

Ромбовидная система микротрещин в зерне амфибола и разрыв зерен плагиоклаза в амфиболитах, ассоциирующихся с псевдотахилитами, как показатель шокового метаморфизма





Микрофотографии меланократового биотит-гиперстен-гранатового гнейса на р. Котуйкан, в пределах Котуйканского купола. Видны деформации граната с уранинитом (UO_2) и коффенитом $U(SiO_4)$, пояса смятия и излома биотита. Первичный уранинит имеет возраст **2214 ± 77 млн. лет** (U-Pb-метод). Время образования коффенита и деформированного уранинита - **1963 ± 56 млн. лет** (U-Pb-метод, А.И. Ларичев и др., 2008). Это совпадает со средним возрастом псевдотахилитов (**1900 ± 50 млн. лет**), или временем шокового метаморфизма, что также подтверждается характером планарных элементов в гранате и биотите (полосы смятия и излома («kink-bands» по Schneider, 1972).

Сравнение деформационных структур в кварце из эндербитов Анабарского щита на р. Котуйкан (по В.Е. Сонюшкину, 1988 – избирательное травление, растровый электронный микроскоп) и в диаплектовом кварце из Усть-Карской астроблемы (по Е.П. Гурову и Е.П. Гуровой, 1991)

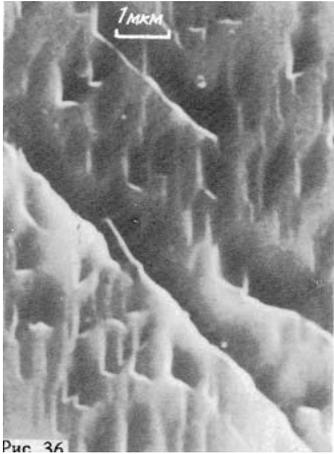


Рис. 36

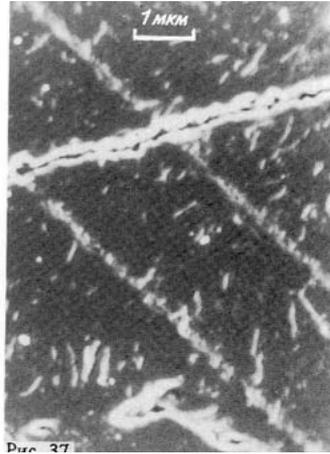
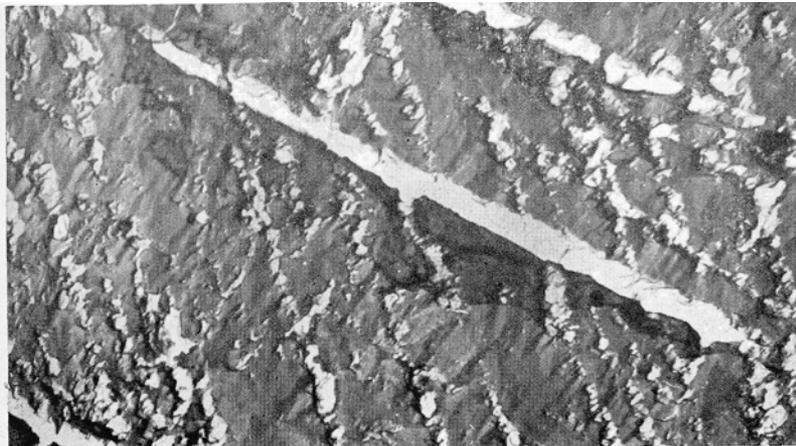


Рис. 37

Деформации палеостресса и динамической раскристаллизации в условиях амфиболитовой фации в архейских эндербитах краевой части Котуйканской структуры



Система элементов в диаплектовом кварце, выполненная аморфной стеклообразной фазой. Усть-Карская астроблема. Увел. в оригинале 10000

**Псевдотрахилиты типа В из мощных жилоподобных тел
Sm-Nd-возрастом 1936 ± 30 млн. лет**

● № 22

SiO₂=64,99

TiO₂=0,66

Al₂O₃=14,3

MgO=2,55

CaO=3,74

Na₂O=3,34

K₂O=2,52

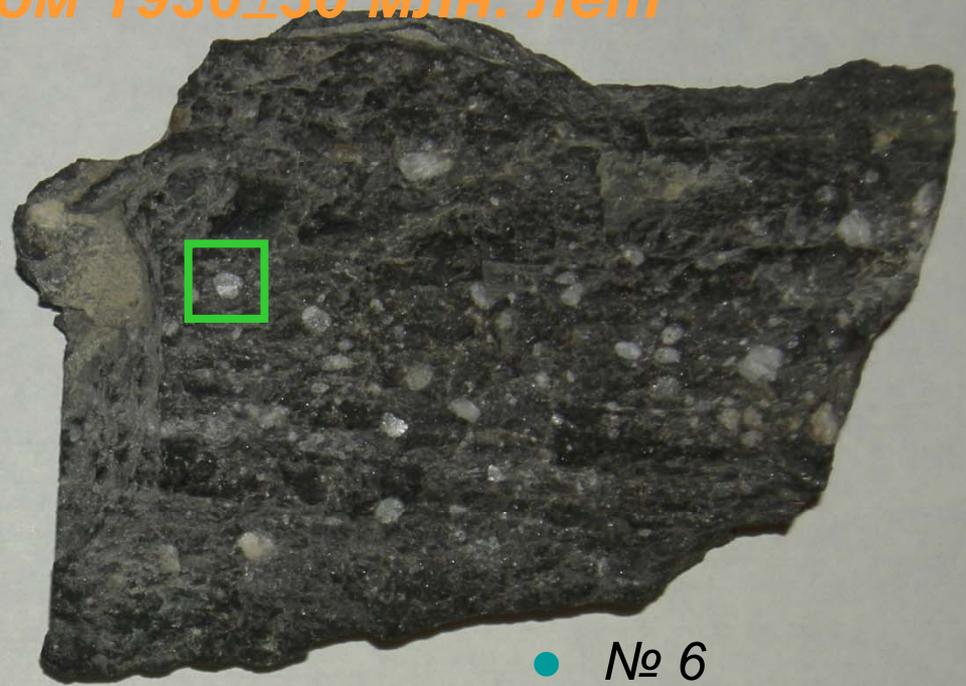
ppm:

Co=17

Cr=68

Ni=40

Zr=263



● № 6

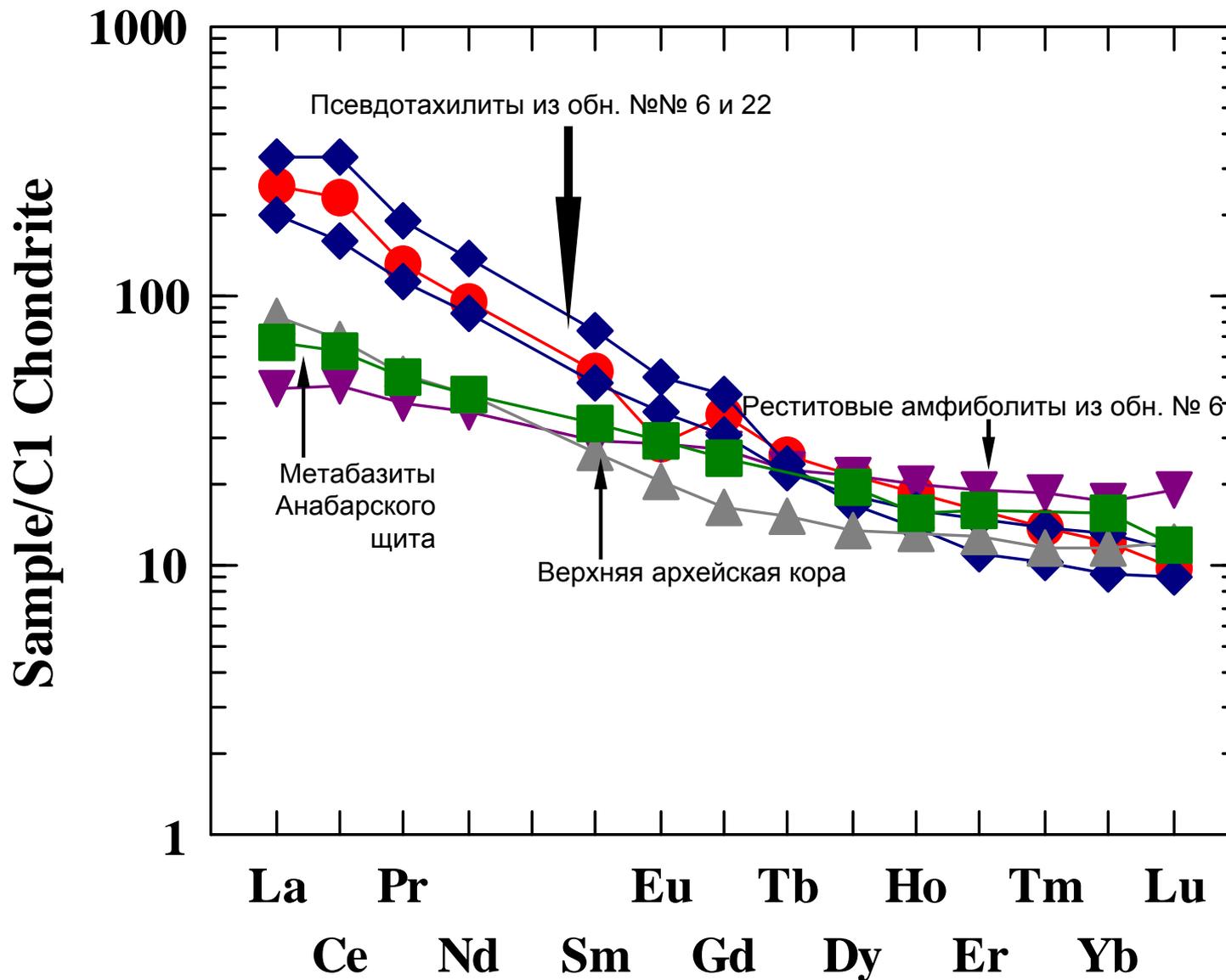
SiO₂=56,01; TiO₂=1,03; Al₂O₃=13,89; MgO=4,94;

CaO=5,99; Na₂O=3,11; K₂O=0,24

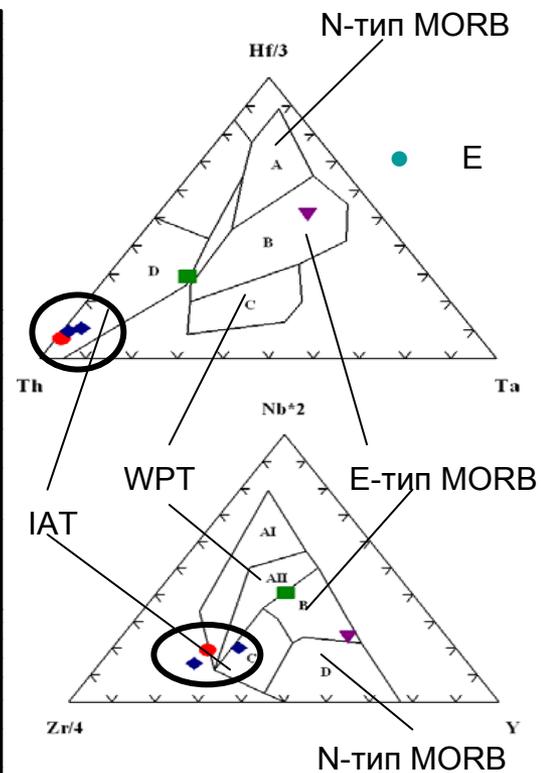
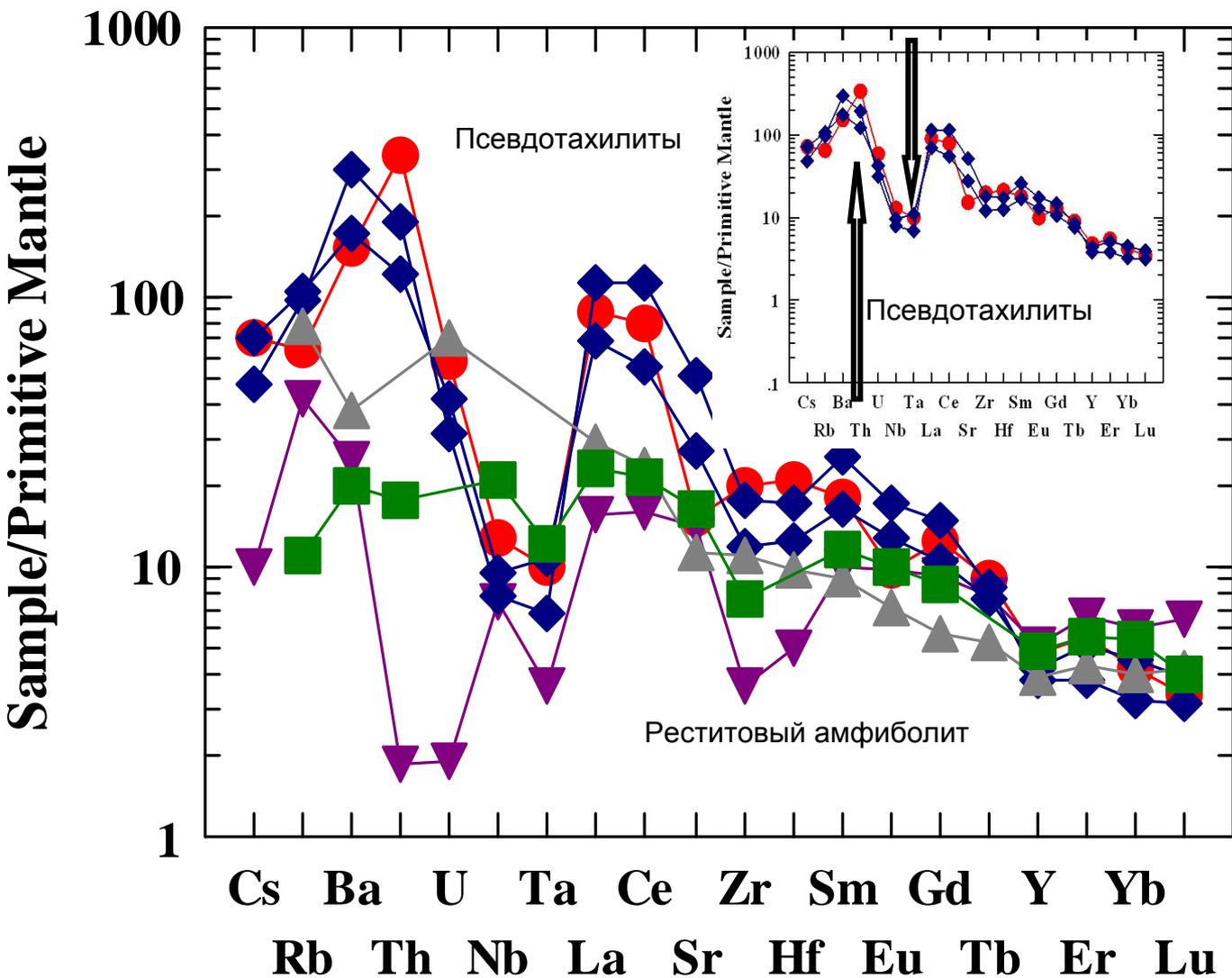
ppm: Co=36, Cr=170, Ni=87, Zr=184



- НОРМИРОВАННЫЕ ПО ХОНДРИТУ СОДЕРЖАНИЯ РЗЭ В ПСЕВДОТАХИЛИТАХ, АССОЦИИРУЮЩИХ С НИМИ АМФИБОЛИТАХ, А ТАКЖЕ В МЕТАБАЗИТАХ АНАБАРСКОГО ЩИТА И ВЕРХНЕЙ АРХЕЙСКОЙ КОРЕ (ПО С. ТЕЙЛОРУ И С. МАК-ЛЕННОНУ, 1988) КАК СВИДЕТЕЛЬСТВО НИЗКОЙ СТЕПЕНИ ФРИКЦИОННОГО ПЛАВЛЕНИЯ АРХЕЙСКОГО СУБСТРАТА. (Анализы выполнены в Институте геохимии СО РАН)



Спайдер- и дискриминантные диаграммы для тех же пород, подтверждающие их принадлежность к разным петрогенетическим типам. Псевдотахилиты - продукт фрикционного плавления архейского субстрата **в режиме шокового стресса (сжатия)**. Их схожесть с геохимическими показателями для островодужных обстановок фанерозоя (Ta-Nb минимум) является **свидетельством конвергентности этого критерия, определяющего геодинамический режим, но не обстановку.**



На крыльях валоподобного Центрального массива анортозитов Sm-Nd-возрастом 1850 млн.лет виден наклон в сторону западного и восточного контактов скорлуповато-плитчатой отдельности по трещинам L и полосчатости, или линейных структур, течения F. Доказательство пластичного выжимания «анортозитовой каши» в верхние горизонты коры в результате импактного события.

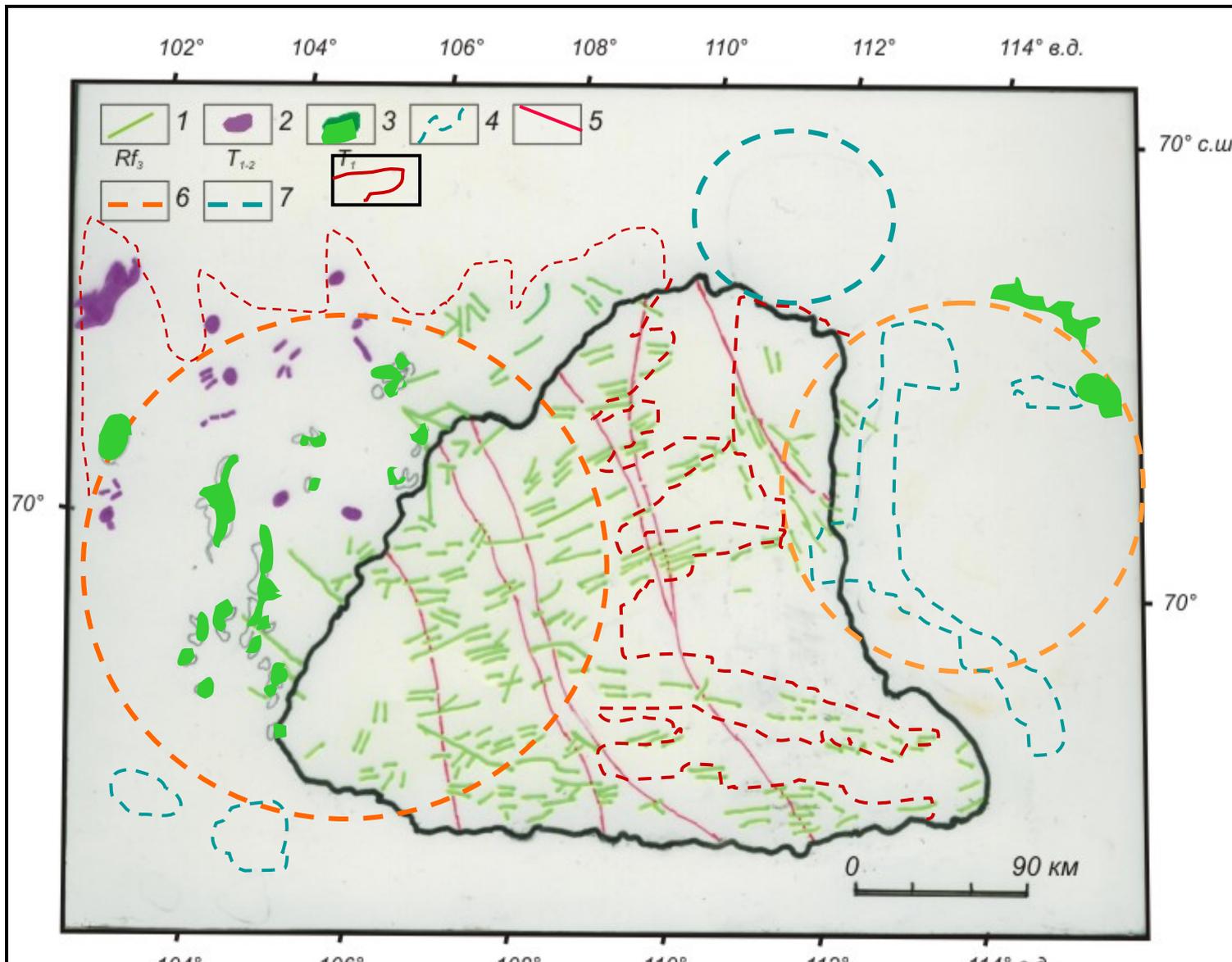


*Маганский анортозитовый массив
выделяется на фоне хаотичной
системы трещин внутри
Котуйканской кольцевой
структуры*

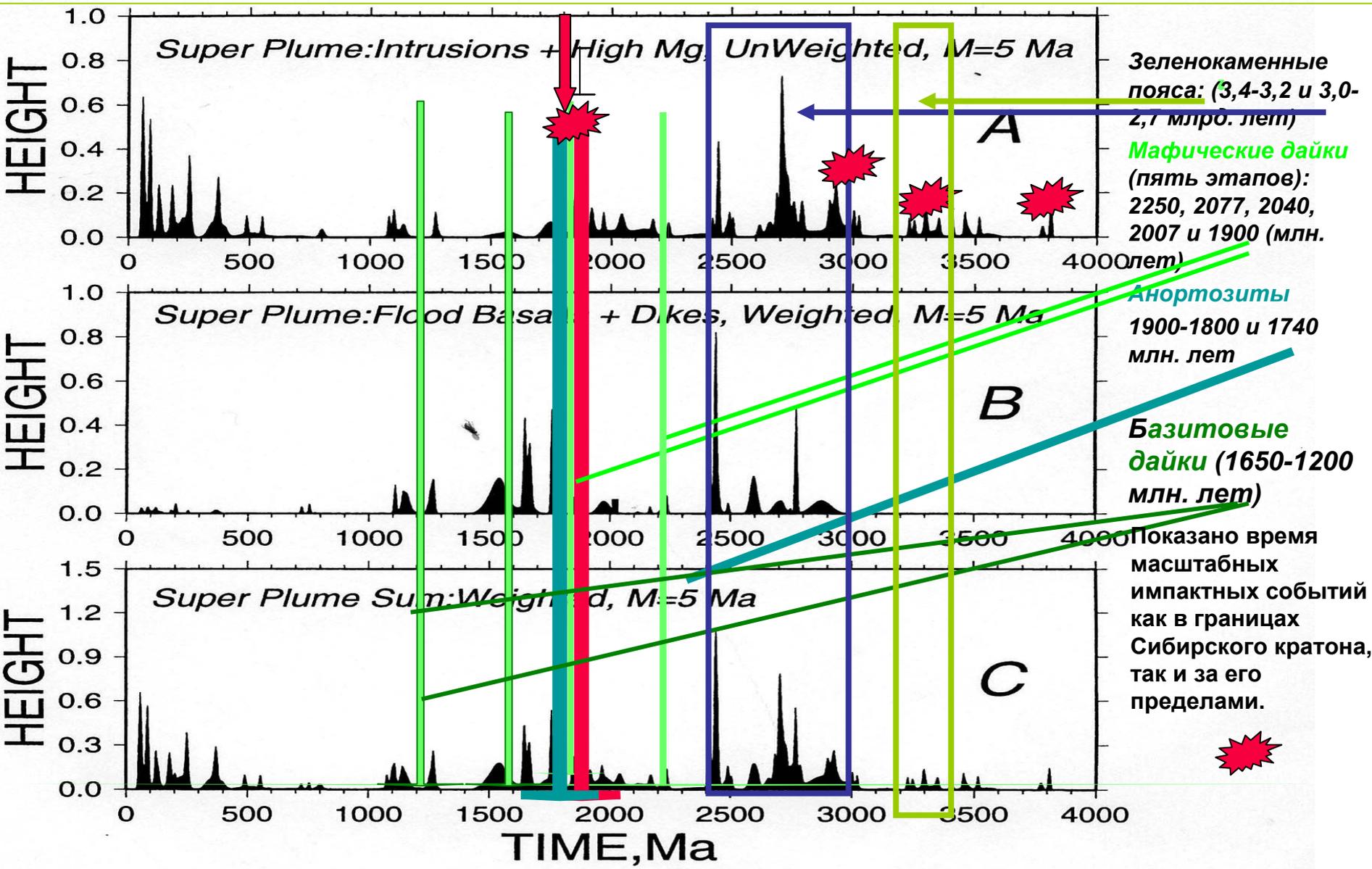


Последствия палеопротерозойского Котуйканского импактного события в мезопротерозое (возраст мафических даек - от 1730 до 1503 млн. лет (Р. Эрнст и др., 2008) и в фанерозое (триас)

Структурный парагенез мантийного полихронного магматизма и радиальных глубинных зон трещиноватости, генетически связанных с древнейшим импактным событием. Радиальная система трещин, пересекающая древние структурные направления, дренирует мантию.

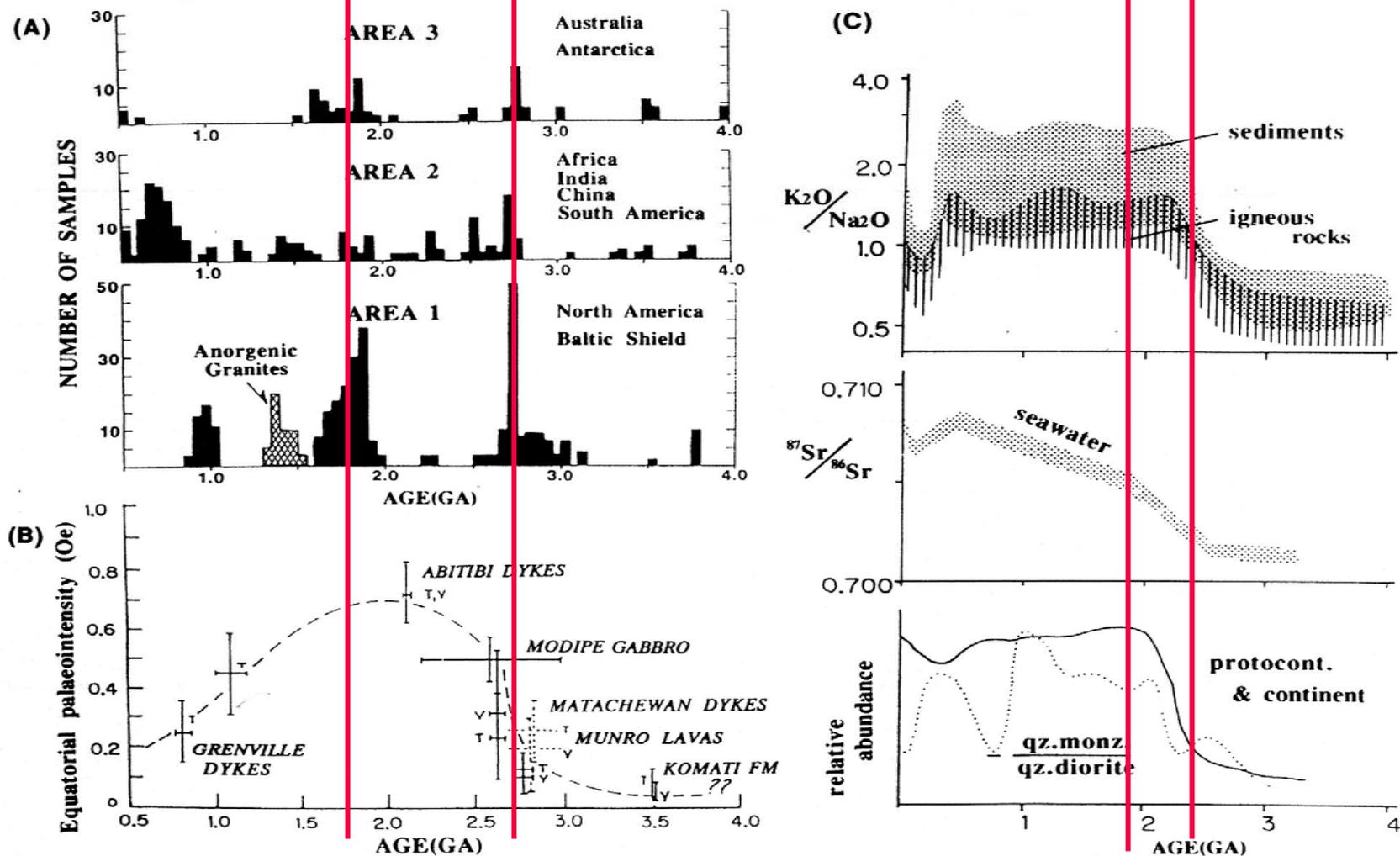


Временные ряды мировых суперплюмовых (D.H. Abbot, A.E. Isley, 2002) и импактных событий.
 Выделены интервалы масштабных процессов формирования зеленокаменных поясов первого (3,4-3,2 млрд. лет) и второго поколений (3,0-2,7 млрд.лет), палео-протерозойского термотектогенеза (2,25-1,74 млрд. лет) и мезопротерозойского магматизма (1,65-1,2 млрд. лет)



Исторические вариации (A) частоты радиометрических возрастов магматических пород (по Condie, 1989); (B) интенсивности магнитного поля (по Hale, 1987); хим. состав воды и коровых пород (по Veiser, 1985) Граница AR-PR –в интервале от 2,8 до 1,8 млрд. лет назад – катастрофический коллапс устойчивого плотностного расслоения ядра.

● M. Kumazava et. al, 1994



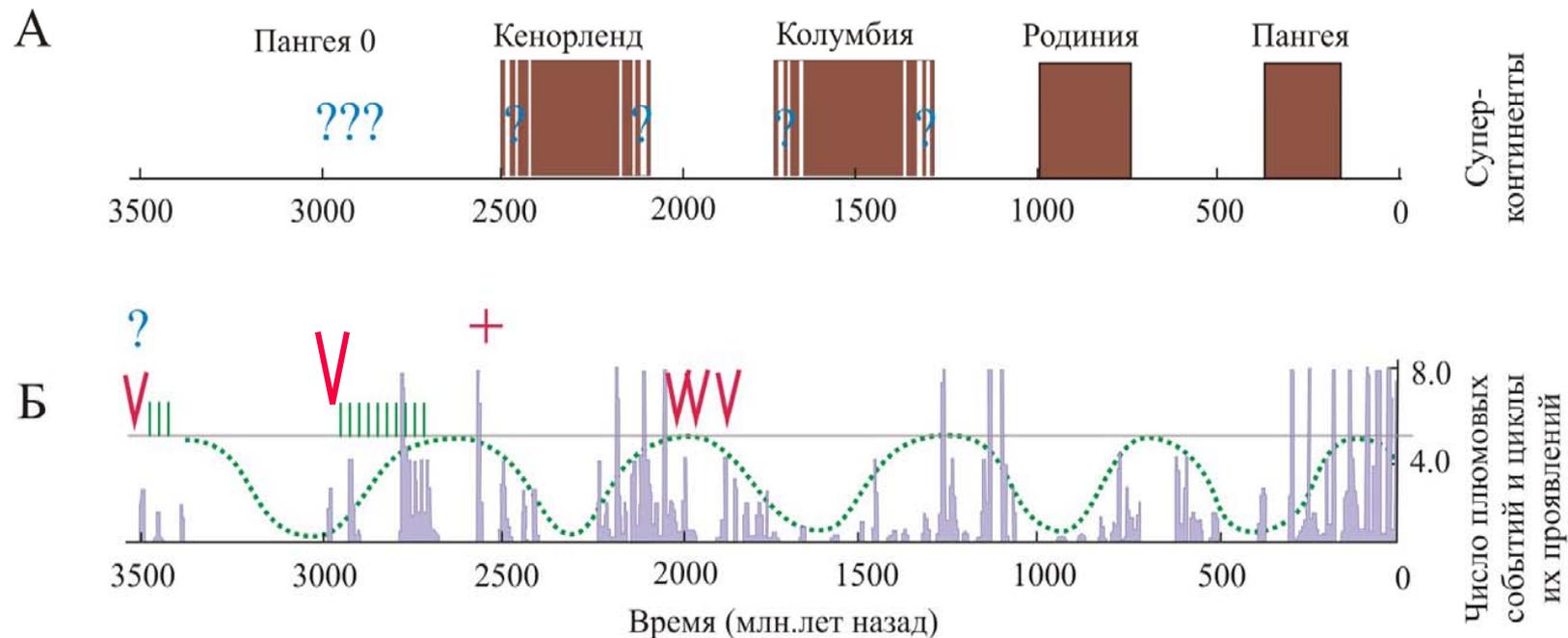
● Выделенные события ассоциируют с радикальным замедлением скорости вращения Земли

Fig. 1. Historical variation of (A) frequency of radiometric ages of igneous rocks (reproduced from Condie, 1989), (B) geomagnetic field intensity (reproduced from Hale, 1987), and (C) chemical compositions of sea water and crustal rocks (reproduced from Veiser, 1984). Note that an occurrence of a drastic change in the state of the whole earth is suggested at the age between 2.5 and 3.0 Ga.

Совпадение высокоэнергетических импактных и плюмовых событий с образованием и распадом **суперконтинентов Пангея 0, Кенорленд и Колумбия**, а также - с формированием **зеленокаменных поясов первого и второго поколений** и **гранитоидов мантийной природы**.

Всё это свидетельствует о возможном влиянии **масштабных ударных процессов** на ход необратимого ротационно-плюмового режима тектоно-магматической эволюции ранней Земли.

КУЗЬМИН и др.



Заключение

- **Высокоэнергетические массивованные удары астероидов в мезоархее, на границе архея и палеопротерозоя и в палеопротерозое могли вызвать изменение осевой скорости вращения Земли, глубоко проникающую деформацию литосферы и импактно-триггерную активизацию мантийных плюмов с катастрофическим коллапсом ядра, а также с соответствующими тектоно-магматическими последствиями, включающими рифтогенез и формирование зеленокаменных поясов первого и второго поколения с фазами расширения, сжатия и гранитообразования, полихронный мантийный магматизм и необратимый процесс формирования и распада суперконтинентов Пангея 0, Кенорленд и Колумбия в пространстве между критическими широтами $\pm 35^\circ$.**

**Благодарю за
внимание !**

