

ПРИРОДА ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ

В. С. Шкодзинский



Владимир Степанович Шкодзинский,
доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН

Замечательные ювелирные и технические свойства алмазов и их очень высокая стоимость (для ювелирных кристаллов тысячи долларов за карат, равный 0,2 г) стимулируют постоянные попытки найти новые месторождения этого минерала. Для их эффективного поиска очень важно выяснение генезиса алмазов, содержащих их кимберлитов, закономерностей распространения алмазоносных пород в земной коре и природе этих закономерностей. До последнего времени решить эти задачи было очень трудно, так как все попытки их решения предпринимались на основании господствовавшей в геологии гипотезы холодной гомогенной аккреции (объединения частиц при образовании) Земли. Полученные за последние десятилетия доказательства горячего гетерогенного её формирования [1, 2] неожиданно позволили впервые убедительно объяснить многочисленные особенности кимберлитов и содержащихся в них алмазов, известные закономерности их распространения и выявить новые.

Первые доказательства горячей аккреции были получены для Луны, на которой с помощью сейсмографа, установленного американскими космонавтами, было выявлено присутствие анортозитовой коры мощностью до 100 км и более. Такая кора могла образоваться только путём всплытия плагиоклаза в кристаллизовавшемся океане магмы глубиной около 1000 км [2]. О присутствии подобного океана на Земле свидетельствует существование трендов магматического фракционирования (изменения состава расплава при кристаллизации) в мантийных ксенолитах (обломках глубинных пород) из кимберлитов и в раннедокембрийских комплексах Алданского щита в Якутии. На это указывает уменьшение изотопного возраста и температуры кристаллизации различных пород в них в полном соответствии с последовательностью образования этих пород при фракционировании.

Об этом же свидетельствуют признаки очень высокой температуры на земной поверхности в раннем архее

На фото сверху – волшебный мир бриллиантов (<http://classpic.ru/blog/brillianty-36-foto.html>)

(до 900 – 1000 °С) и существование в раннедокембрийских кристаллических комплексах и в ксенокристаллах клинопироксена из кимберлитов очень низких геотермических градиентов (2 – 3,5 °/км), близких к адиабатическому градиенту для расплавов (0,3 °/км). Они резко отличаются от современных градиентов (до 30 °/км и более). Все эти и многие другие данные указывают на образование древней кристаллической коры и мантии путём фракционирования расслоенного по составу глобального океана магмы со средней глубиной около 250 км [1], возникшего под влиянием импактного (от ударов) тепловыделения при аккреции Земли, и в результате выделения тепла распада короткоживущих изотопов.

Вследствие возрастания плотности с глубиной (от 2,3 до 2,8 г/см³) за счёт изменения состава в слоистом магматическом океане после прекращения аккреции не возникла обширная конвекция, и он длительно затвердевал сверху вниз. Примерно до 2,6 млрд лет назад происходила кристаллизация его верхнего кислого слоя с формированием преимущественно ортогнейсовых (магматических) комплексов и гранитоидов кислой кристаллической коры, а также небольшого количества тел парапород (изменённых осадочных образований). В дальнейшем затвердевали средние и основные по составу слои магматического океана, и формировались характерные для древних платформ автономные анортозиты с изотопным возрастом 2,8 – 1,2 млрд лет, а из остаточных расплавов – субщелочные и щелочные магматические породы.

Кристаллизация бедного кремнекислотой пикритового слоя привела к образованию щелочных ультраосновных и карбонатитовых расплавов. Затвердевание самого нижнего очень богатого магнием перидотитового слоя обусловило прекращение внедрения коматиитовых магм (близких по составу к перидотитам) в зеленокаменных (низкотемпературных метаморфических) поясах. Судя по экспериментальным данным, на последних этапах кристаллизации перидотитового слоя возникали кимберлитовые остаточные расплавы. Изотопный возраст карбонатитов и кимберлитов в среднем равен соответственно 0,688 и 0,236 млрд лет [1]. Он указывает на последовательное опускание фронта затвердевания в постаккреционном магматическом океане с течением времени, связанное с остыванием его в результате кондуктивной теплоотдачи вверх.

Судя по содержанию в кимберлитах до тысячи хондритовых норм накапливающихся в расплавах лёгких редких земель, кимберлитовые остаточные расплавы возникали после кристаллизации перидотитового слоя примерно на 99,9 – 99,99 %. Это является причиной очень высокого содержания в них некоторых расплавофильных (концентрирующихся в расплавах) химических компонентов (H₂O, CO₂, K₂O), незначительного объёма кимберлитовых расплавов в мантии и обычно небольшого размера сформированных ими тел в земной коре (десятки – сотни метров), а также низкотемпературности их магм (около 500 °С после взрыва) [1].

Низкотемпературность привела к быстрому затвердеванию путём остеклования или кристаллизации ким-

берлитовых магм на поздних стадиях подъёма вследствие выделения из них при декомпрессии сильнейших плавней – летучих компонентов. Дальнейший подъём сопровождался взрывом верхних частей кимберлитовых колонн под влиянием высокого внутреннего давления законсервированной затвердеванием газовой фазы. Это объясняет образование кимберлитами магмами преимущественно трубок взрыва и брекчий, обычно отсутствие кимберлитовых лав на земной поверхности, процессов магматического фракционирования и осаждения высокоплотного алмаза в трубках. Оно свидетельствует о несостоятельности надежд некоторых геологов найти в глубинных частях кимберлитовых трубок крупные скопления алмаза, возникшие путём предполагаемого его гравитационного осаждения в менее плотном расплаве. Раздвижение продуктов фракционирования перидотитового слоя под океаническими областями поднимавшимся и растекавшимся веществом плюмов (потоков всплывавшего горячего мантийного вещества) при формировании этих областей является причиной, казалось бы, загадочного отсутствия в них кимберлитов.

Увеличение содержания свободного углерода в остаточных расплавах при кристаллизации перидотитового слоя, вследствие незначительной растворимости этого компонента в возникавших породообразующих минералах, обусловило длительную (в течение примерно 3 млрд лет) кристаллизацию в них алмазов. Небольшая концентрация углерода в расплавах объясняет незначительное содержание алмазов (обычно менее 1 г/т) даже в самых богатых кимберлитах. Большое число выходов ковалентных свободных связей в торцах слоёв роста на алмазах по сравнению с поверхностью приводило сначала к послойной их кристаллизации с образованием идеальных плоскогранных октаэдров.

Медленное снижение температуры в раннем магматическом океане обусловило очень длительный рост первых кристаллов, объясняет присутствие в кимберлитах единичных алмазов-гигантов (массой до сотен карат) и их преимущественно (93 – 94 %) октаэдрическую огранку. Увеличение концентрации кремнекислоты в расплавах по мере фракционирования сопровождалось возрастанием их вязкости на несколько порядков. Это вызвало сильное снижение скорости диффузии в них углерода и увеличение степени пересыщения их этим компонентом.

Вследствие этого увеличивалась скорость зарождения новых слоёв роста на кристаллах алмаза, уменьшалась их площадь, увеличивалась их толщина, и происходила эволюция морфологии возникавших кристаллов от гладкогранных октаэдров к грубослоистым октаэдрам и округлым додекаэдроэдрам и далее к кубам и агрегатам. Уменьшение сечения иногда присутствовавших внутренних блоков в кристаллах по мере их роста было причиной появления между ними глубоких трещиноподобных полостей, ошибочно рассматривающихся иногда как следствие процессов растворения алмазов.

Возрастание степени пересыщения расплавов углеродом обусловило постепенное сокращение при кристаллизации алмазов роли послойного роста и возрастание роли нормального радиального. Радиальный

рост привёл к возникновению на поздних алмазах большого количества различных скульптур (наростов и впадин на их поверхности). Накопление расплавофильных компонентов в остаточных расплавах было причиной неравномерного возрастания их содержания в поздних алмазах, особенно азота и легкого изотопа углерода, и эволюции состава минеральных включений в них от перидотитового к эклогитовому и далее к кимберлитовому.

Внедрение алмазоносных кимберлитовых магм в тех или иных участках земной коры должно было определяться одновременно двумя факторами – присутствием кимберлитовых остаточных расплавов в мантии под этими участками и возникновением под ними тектонических структур, благоприятных для подъёма расплавов. Установленное в прошлом веке знаменитое эмпирическое правило Клиффорда полностью обусловлено первым фактором. По этому правилу алмазоносные кимберлиты присутствуют только в тех участках древних платформ (на кратонах), где распространены кристаллические комплексы с возрастом более 1,6 млрд лет. Модель горячего образования Земли впервые полностью объясняет это правило. По этой модели древние кристаллические комплексы и кимберлитовые остаточные расплавы являются соответственно малоглубинными и глубинными продуктами фракционирования одного и того же слоистого магматического океана. В регионах, где нет этих комплексов и, следовательно, отсутствовали продукты фракционирования океана магмы, в общем случае, отсутствовал и его перидотитовый слой, генерировавший кимберлитовые остаточные расплавы.

Это объясняет также приуроченность наиболее богатых алмазами кимберлитов к участкам платформ, имеющих очень глубокое (250 – 400 км) залегание подошвы континентальной литосферы (относительно холодной жёсткой верхней части коры и мантии), т. е. литосферные корни [3]. Очевидно, что в таких корнях остаточные кимберлитовые расплавы зарождались в условиях наиболее высокого давления, благоприятного для алмазообразования. На краях платформ обычно отсутствовали самые глубинные части литосферы, видимо, вследствие эрозии их астеносферными течениями, возникшими в подстилающей более горячей конвектировавшей астеносферной мантии. Это является причиной значительно меньшего распространения здесь кимберлитовых полей (рис. 1) и их незначительной алмазоносности. Число карбонатитсодержащих комплексов на окраинах платформ, наоборот, увеличивается. Это обусловлено образованием их в менее глубинном пикритовом слое. Он не подвергался процессам эрозии под влиянием астеносферных течений, но, видимо, деформировался и подогревался ими. Это привело к более интенсивному подъёму из него карбонатитовых остаточных расплавов.

Самым благоприятными для образования высокоалмазоносных кимберлитов должны быть участки, содержащие наиболее мощную мало нарушенную поздними тектоническими процессами кристаллическую кору, в которых сохранился и её верхний слой, сложенный биотитовыми, амфиболовыми гнейсами и зеленокаменными поясами, и не обнажаются в среднем более

глубинные гиперстенные гнейсы. В таких участках нижние части литосферы, генерировавшие кимберлитовые магмы, также должны быть мало нарушены. Поэтому в них чаще могли зарождаться высокоалмазоносные кимберлиты (рис. 2). Из рисунка видно, что с уменьшением

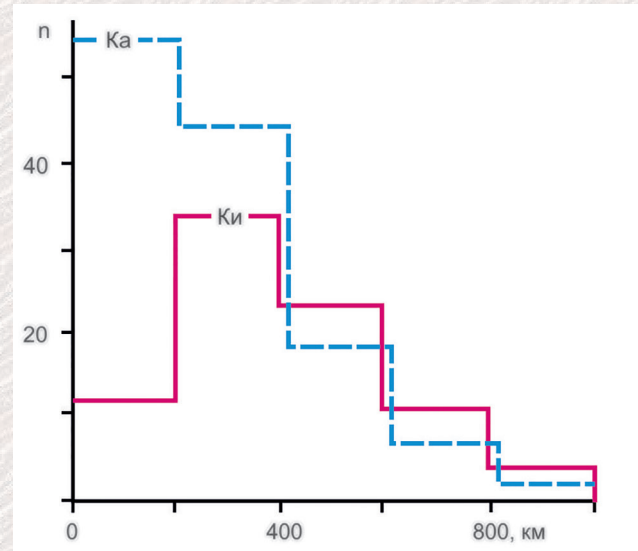


Рис. 1. Соотношение количества (n) кимберлитовых полей (Ки) и карбонатитовых комплексов (Ка) на платформах и расстояния до их ближайшего края. Построен по данным [4]

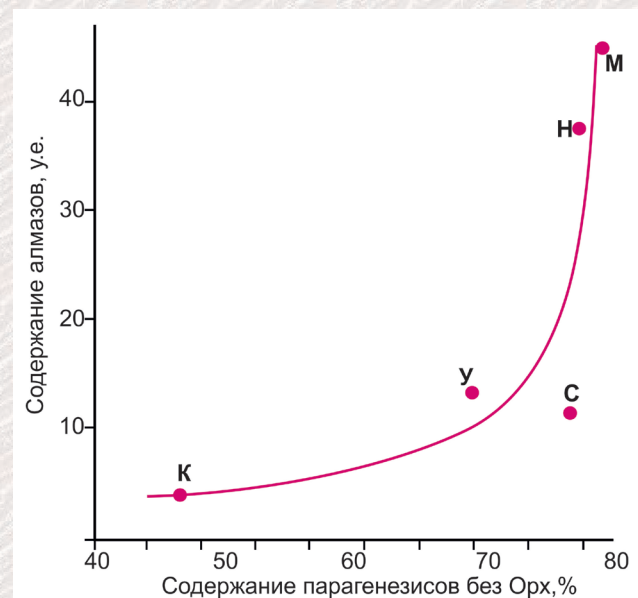


Рис. 2. Соотношение доли безгиперстенных кристаллических пород среди коровых ксенолитов и содержания алмазов в кимберлитах Якутии.

Трубки: К – «Комсомольская»; М – «Мир»; Н – «Нюрбинская»; С – «Сытыканская»; У – «Удачная». Используются данные [1, 3]

среди коровых ксенолитов доли безгиперстеновых гнейсов и кристаллических сланцев в кимберлитовых трубках Якутии резко возрастает содержание алмазов. Эта особенность содержания алмазов в кимберлитах согласуется с правилом Клиффорда и дополняет его.

Вследствие большой мощности перидотитового слоя магматического океана (около 80 км) кимберлитовые остаточные расплавы возникали в нём одновременно на различной глубине. Поэтому в участках присутствия высокоалмазоносных кимберлитов могли внедряться и их слабоалмазоносные и неалмазоносные менее глубинные разности. Очевидно, что большое скопление трубок на небольших участках чаще всего должно быть связано с формированием их путём внедрения кимберлитовых остаточных расплавов со всех уровней перидотитового слоя. Это согласуется с наблюдающейся обратной зависимостью между числом алмазоносных кимберлитов и их общим количеством в полях (рис. 3).

Иногда встречающееся размещение алмазоносных магматических пород вне кратонов (например, трубка «Аргайл» в Австралии) чаще всего относится к лампроитам (содержащим больше калия и кремнекислоты, чем кимберлиты). Их магмы и должны были формироваться преимущественно вне кратонов, поскольку большинство этих магм образовалось путём фракционирования магматических очагов в плюмах [1]. Такие случаи не опровергают правило Клиффорда, поскольку оно относится только к кимберлитам. Но, видимо, изредка возможно наложение складчатости на края кратонов с уже сформированными алмазоносными кимберлитами. Поэтому правило Клиффорда имеет вероятностный, а не абсолютный характер.

Подъём кимберлитовых остаточных расплавов с глубины 150 – 250 и иногда более километров в жесткой континентальной литосфере возможен только в случае интенсивных её тектонических деформаций. Кимберлитовые остаточные расплавы должны были выжиматься по возникавшим при этих деформациях зонах растяжения. Поэтому участки появления таких деформаций на древних платформах должны были быть благоприятными для внедрения кимберлитов.

Наиболее мощные тектонические деформации на древних платформах происходили под влиянием подъёма и растекания вещества мантийных плюмов при образовании рифтов (вытянутых прогибов). В литературе [4] отмечалась связь кимберлитов и карбонатитов с этими структурами. При этом большинство кимберлитов размещается на расстоянии 150 – 250 км от рифтов, а карбонатитов – в рифтах (рис. 4). Это связано со смещением кимберлитогенерировавшего нижнего перидотитового слоя за пределы рифтов в результате растекания под литосферой вещества плюма, обусловившего возникновение этих структур. В генерировавшем карбонатиты вышерасположенном пикритовом слое почти не происходили такие смещения. Это привело к подъёму карбонатитовых остаточных расплавов преимущественно в испытывавших растяжение внутренних частях рифтов.

Мощные субмеридиональные зоны растяжения возникли в литосфере под влиянием западного дрейфа

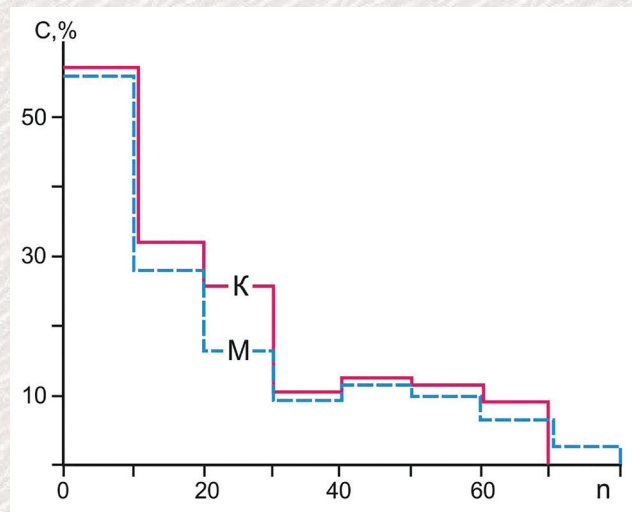


Рис. 3. Соотношение доли алмазоносных трубок (С) с общим количеством тел (n) кимберлитов (К) и магматических пород (М) в кимберлитовых полях

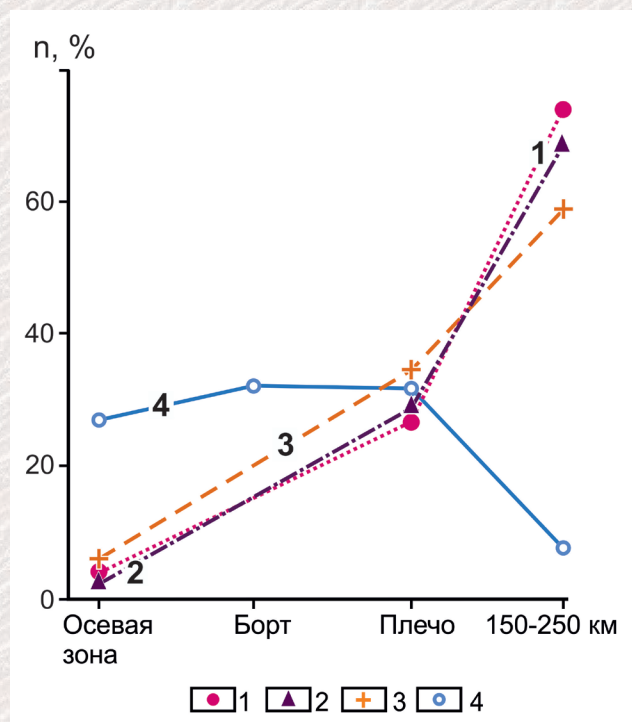


Рис. 4. Содержание кимберлитовых тел (1), полей алмазоносных кимберлитов (2), алмазоносных кимберлитовых трубок (3) и карбонатитовых массивов (4) в различных частях рифтов [4]

континентов вследствие несколько различной скорости движения передовых и тыловых частей литосферы при этом дрейфе [1]. Он обусловлен давлением смещавшихся на запад под влиянием силы Кориолиса всплывавших горячих струй мантийного вещества. Эта сила

связана с вращением Земли вокруг своей оси. Её влиянием обусловлена асимметрия Тихого океана, выражающаяся в положении оси его растяжения в восточной части (в значительной мере под Американским континентом), а зон погружения океанической литосферы под островными дугами – в западной. Западным дрейфом континентов обусловлена приуроченность кимберлитовых полей Якутии, Архангельской провинции и многих других регионов к протяжённым (до многих сотен километров) субмеридиональным зонам. С этим же связан контроль большинства кимберлитов и карбонатитов линияментами (тектоническими разломами, поясами даек) субмеридионального простираения (рис. 5).

Казалось бы, удивительной особенностью областей распространения кимберлитов является постоянное присутствие в них траппов – вулканических базальтов гигантского объёма (до нескольких миллионов км³) и застывших на глубине. Как иллюстрирует рис. 6, существует прямая корреляция между площадью, занятой траппами на различных континентах, и количеством присутствующих на них кимберлитовых полей и карбонатитосодержащих комплексов. Это связано с интенсивными деформациями континентальной литосферы под влиянием подъёма мантийных плюмов и внедрения большого количества основных магм. Возникшие при этом зоны растяжения в литосфере служили путями подъёма кимберлитовых и карбонатитовых магм.

Таким образом, полученные в последние десятилетия данные о горячей аккреции Земли и фракционировании на ней глобального океана магмы позволяют объяснить главные особенности образования и размещения алмазосодержащих кимберлитов. Вследствие распространения в прошлом океана магмы на всей поверхности Земли кимберлиты должны были формироваться на всех древних платформах, что существенно расширяет перспективы обнаружения новых месторождений алмазов. Но на некоторых участках они могут быть перекрыты мощными толщами более молодых осадочных пород, что сильно затрудняет их поиски.

Список литературы

1. Шкодзинский, В. С. Петрология литосферы и кимберлитов (модель горячей гетерогенной аккреции Земли) / В. С. Шкодзинский. – Якутск : Издательский дом СВФУ, 2014. – 452 с.
2. Snyder G.A., Borg L.E., Nyquist L.E., Taylor L.A. Chronology and isotopic constrains on Lunar evolution // The origin of the Earth and Moon. – Univ. of Ariz. Press, 2000. – P. 361–395.
3. Розен, О. М. Сибирский кратон : формирование, алмазосодержание / О. М. Розен, А. В. Манаков, Н. Н. Зинчук. – М. : Научный мир, 2006. – 210 с.
4. Фролов, Ф. А. Карбонатиты и кимберлиты (взаимоотношения, минералогия, прогноз) / Ф. А. Фролов, А. В. Лапин, А. В. Толстов. – М. : НИИ – Природа, 2005. – 540 с.

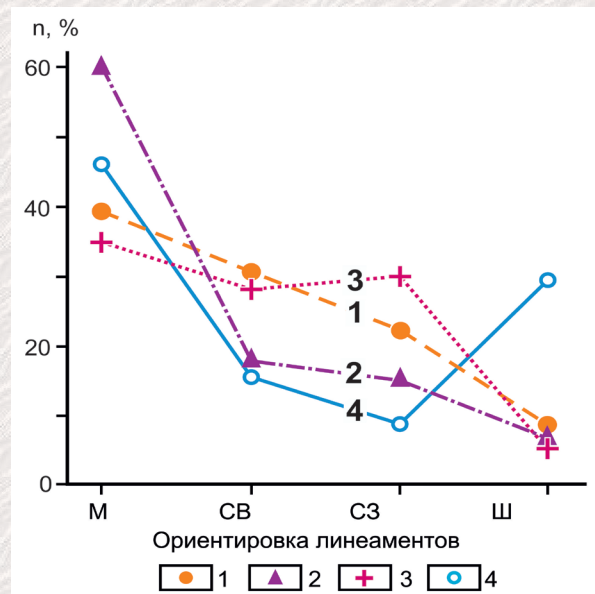


Рис. 5. Количество кимберлитовых тел (1), полей алмазосодержащих кимберлитов (2), алмазосодержащих кимберлитовых трубок (3) и массивов карбонатитов (4), контролируемых линияментами субмеридиональной (М), северо-восточной (СВ), северо-западной (СЗ) и субширотной (Ш) ориентировки. Построен по данным [4]

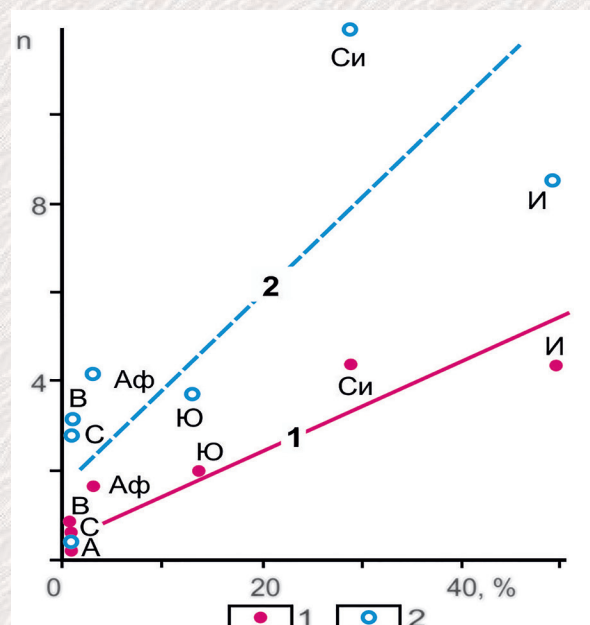


Рис. 6. Прямая зависимость количества (n) кимберлитовых полей (1) и карбонатитовых комплексов (2) на 1 млн км² от процентной доли площади, занятой траппами, на Австралийской (А), Африканской (Аф), Восточно-Европейской (В), Индийской (И), Северо-Американской (С), Сибирской (С) и Южно-Американской (Ю) платформах. Построен по данным [4]