

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОДИНАМИКА

УДК 551.242.51 (571.5)

**КОТУЙКАНСКАЯ КОЛЬЦЕВАЯ СТРУКТУРА: ВОЗМОЖНОЕ СВИДЕТЕЛЬСТВО
МАСШТАБНОГО ИМПАКТНОГО СОБЫТИЯ НА СЕВЕРЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА**

М.З. Глуховский, М.И. Кузьмин*

Геологический институт РАН, 119017, Москва, Пыжевский пер., 7, Россия

** Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

На севере Сибирской платформы выделена Котуйканская кольцевая структура, которую по дистанционным, космогеологическим, тектоническим, геофизическим, структурно-вещественным и изотопно-геохронологическим критериям можно идентифицировать как крупную палеопротерозойскую астроблему Земли, сравнимую с такими близкими по возрасту импактными структурами, как Вредефорт и Садбери. Кроме того, здесь же выявлены косвенные признаки еще двух крупных структур подобного генезиса. Тем самым подтверждается предположение многих ученых о массивированной бомбардировке поверхности ранней Земли крупными астероидами и о возможном влиянии масштабных импактных событий на динамику мантии Земли и ротационный режим планеты, т.е. на ход ее тектонической эволюции, включая процессы тектоники плит.

Импактные структуры, астроблемы, кольцевые структуры, Сибирский кратон.

**THE KOTUIKAN RING STRUCTURE AS POSSIBLE EVIDENCE FOR A LARGE IMPACT EVENT
IN THE NORTHERN SIBERIAN CRATON**

M.Z. Glukhovskii and M.I. Kuz'min

Remote-sensing, cosmogeological, tectonic, geophysical, structural, compositional, isotopic, and geochronological criteria permit identifying the Kotuikan ring structure in the northern Siberian Platform as a Paleoproterozoic large astrobleme, close in age to the Vredefort and Sudbury impact structures. Also, indirect evidence for two more large impact structures was obtained here. This confirms widely hypothesized massive bombardment of the early Earth by asteroids and a possible effect of large impact events on the Earth's mantle dynamics and rotation regime, that is, the tectonic evolution of our planet, including plate tectonics.

Impact structures, astroblemes, ring structures, Siberian craton

ВВЕДЕНИЕ

Дистанционное изучение поверхности каменных планет Солнечной системы привело к признанию важности импактных событий в их развитии. Удары крупных астероидов оказали влияние не только на формирование своеобразного рельефа этих планет, но иногда и на динамику внутрипланетных процессов, включая тектонику плит, и появление на поверхности планет следов, оставленных мантийными плюмами [Morgan et al., 2000]. С ударами крупных астероидов связывают замедление скорости и изменение направления осевого вращения планет с прямого на обратное. Такими примерами могут служить Уран и, возможно, Венера. Подобные высокоэнергетические события не могли не коснуться и Земли, особенно на ранних стадиях ее развития, во многом определив необратимый и нелинейный ход ее внутрипланетных эндогенных процессов и геодинамической эволюции [Флоренский и др., 1983; Марков, Федоровский, 1986; Grieve, 1987; Хаин, 2000, 2003; Pirajno, 2001; Баренбаум, 2002; Катастрофическое..., 2005; Koeberl, 2006; Хаин, Короновский, 2007; Сазонова, 2008]. При этом надо учитывать более интенсивное гравитационное поле Земли по сравнению с другими планетами земной группы. Поэтому количество импактных событий на ранней Земле было почти в 50 раз больше, чем на этих планетах [Pirajno, 2001]. Следы этих древних событий почти не сохранились, поскольку в настоящее время только 30 % поверхности Земли имеет возраст менее 200 млн лет.

Сибирская платформа является широким полем для поисков древних астроблем. В ее пределах (в отличие от других древних платформ) до сих пор не удавалось выявить признаков крупного импактного события докембрийского возраста. Известно, что к одному из таких признаков относят кольцевые структуры, которые видны на космических снимках Земли. Такие структуры разного диаметра давно выделялись и на Сибирской платформе. Наиболее крупные из них диаметром от 400 до 1100 км интерпретировались как сиалические ядра (нуклеары), а структуры меньшего размера относились к метаморфогенному типу — гранитогнейсовым куполам или овалам [Глуховский, 1990]. Среди них, в частности, выделялась Котуйканская кольцевая структура (ККС), природа которой оставалась не вполне выясненной. Ее условно относили к метаморфогенному типу, хотя она не обладала признаками, характерными для таких структур [Розен и др., 1986; Глуховский, 1990].

Целью настоящего исследования является идентификация ККС как древнего глубокоэродированного ударного кратера путем выявления разномасштабных критериев импактного события. В работе приводятся также некоторые признаки двух погребенных структур подобного типа в других местах. В заключение кратко рассмотрим вопросы, связанные с импактными событиями палеопротерозоя и их последствиями, как они могли влиять на динамику внутренних и внешних оболочек планеты, включая активизацию мантийных плюмов и связанных с ними особенностей магматизма, а также на ход процессов плитотектоники.

Статья основана на данных, полученных в ходе многолетних работ [Глуховский, 1990], но часто с иной интерпретацией материала, а также с использованием литературных источников.

КРАТКИЙ ОБЗОР ПРЕДСТАВЛЕНИЙ ОБ ИМПАКТНЫХ СОБЫТИЯХ НА РАННИХ ЭТАПАХ РАЗВИТИЯ ЗЕМЛИ

К наиболее ранним событиям такого рода относят удар о Землю протопланеты размером с Марс, который мог вызвать образование Луны за счет вырванного из мантии Земли и из этой протопланеты вещества [Тетерев и др., 2004; Koeberl, 2006; Valley, 2006; Хаин, Короновский, 2007]. Последующие удары массивных метеоритов поразили Землю около 4.5 млрд лет назад и создали адские экстремальные условия формирования и рециклирования протокры [Valley, 2006]. После этого Луна и ранняя Земля испытали, по крайней мере, еще три масштабных фазы астероидной бомбардировки [Koeberl, 2006]. Это так называемая «поздняя тяжелая бомбардировка» (ПТБ) около 3.90—3.85 млрд лет, с которой связывают образование лунных бассейнов, а также следующие за ней бомбардировки — около 3.4—2.5 и 2.0 млрд лет назад.

Теоретически подсчитано, что в течение фазы ПТБ на Землю за счет ее размеров и гравитационного притяжения упало больше тел, чем на Луну. Их количество достигало 40 при размерах ударников от 100 до 2000 км и адекватных им диаметрах ударных кратеров от 1000 до 5000 км [Тетерев и др., 2004; Светцов, Шувалов, 2005]. Эти кратеры могли оказаться центрами ударной трещиноватости, по которым поднимался мантийный материал в виде плюмов [Pirajno, 2001]. Здесь, возможно, происходил рециклинг первичной базитовой протокры, что приводило к росту сиалических ядер [Марков, Федоровский, 1986; Глуховский, 1990]. По всей видимости, следы этих событий были стерты с лица планеты в ходе последующих экзогенных и эндогенных процессов, связанных, в частности, с тектоникой плит. В то же время следы структур, связанных с импактами, могли сохраниться в пределах фундаментов древних платформ в виде изометричных или близких к ним сиалических ядер, выделяемых нами в виде нуклеаров [Глуховский, 1990]. Эти ядра видны на космических снимках низкого разрешения в виде крупных кольцевых структур, которые часто совпадают с изометричными аномалиями вертикальной составляющей магнитного поля Земли (по данным ИСЗ «Magsat» [Haines, 1985]). Как оказалось, количество выделенных таким образом нуклеаров диаметром от 400 до 4000 км колеблется от 38 до 40 [Глуховский, 1990], что соответствует теоретическим расчетам возможного числа астероидов фазы ПТБ [Тетерев и др., 2004].

Прямые следы структур следующей, архейской, фазы импактных событий на Земле также не сохранились. Однако следует заметить, что в зеленокаменных поясах первого поколения возрастом 3.47—3.20 млрд лет: Барбертон (Barberton) в Южной Африке и кратон Пилбара (Pilbara) в Австралии обнаружены горизонты эджекитов (брекчий) и сферулитов — пород импактного происхождения. Сферулы содержат Fe, Ni, Cr, Co и Sc, а также элементы платиновой группы, типичные для метеоритов, и часто сопровождаются аномалией Ir [KYTE et al., 2003; Glikson, Vickers, 2006; Koeberl, 2006]. Считают, что эти горизонты отражают одно или несколько масштабных импактных событий, среди которых предполагается падение крупного астероида размером 20—50 км и формирование соответствующего кратера диаметром от 300 до 800 км. Эти события вызвали импакт-триггерную реактивацию мантийной конвекции, которая сопровождалась глубокими расколами кристаллического фундамента сформированной к тому времени протоконтинентальной коры, рифтогенезом, накоплением вулканогенно-осадочных толщ и ко-

ровым анатексисом. Надо отметить, что некоторые геологи не согласны с этими выводами, считая, что геохимические аномалии (сферулы и эджекиты) имеют вторичное происхождение [Reimold et al., 2000].

Если для первых 2.5 млрд лет жизни Земли структурные признаки астероидной бомбардировки фактически отсутствуют, то прямые свидетельства палеопротерозойской импактной фазы сохранились более или менее отчетливо. Все они видны на космических снимках в виде разновеликих кольцевых структур. К крупным астроблемам относятся глубокоэродированные ударные кратеры Вредефорт (Vredefort) в Южной Африке диаметром 300 км и возрастом 2023 ± 4 млн лет и Садбери (Sudbery) на Канадском щите диаметром 250 км и возрастом 1850 ± 3 млн лет [Kumazawa et al., 1994; Grieve, Therriault, 2000; Налдретт, 2003; Lana et al., 2003, 2003а, 2004; Катастрофические..., 2005; Lighfoot, Zotov, 2005; Koeberl, 2006]. Три крупные астроблемы расположены на Балтийском щите и три в Австралии (в скобках название, диаметр, возраст). На Балтийском щите — Кеурусселка (Keurusselka, 30 км, около 1800 млн лет) и Паасселка (Paasselka, 10 км, около 1800 млн лет) в Финляндии, а также Суавьярви (Suavjarvi, 16 км, около 2400 млн лет) в Центральной Карелии. В Австралии — кратеры Шумейкер (Shoemaker, 30 км, 1630 ± 5 млн лет), Яррабубба (Yarrabubba, 30 км, 2000 млн лет) и Амелия Крик (Amelia Creek, 20 км, 1640 млн лет) [Машак, Орлова, 1986].

К настоящему времени на Земле установлено до 189 импактных структур. Все они имеют размеры меньшие, чем Вредефорт и Садбери, — от нескольких десятков метров до 50—60 км [Катастрофические..., 2005]. Исключение составляют астроблемы Маникуагуан в Канаде, провинция Квебек (Manicouagan, 100 км, 214 млн лет), Чиксулуб в Мексиканском заливе (Chicxulub, 170 км, 65 млн лет), Попигай на севере Сибирского кратона (Popigay, 100 км, 36 млн лет) [Grieve, Therriault, 2000; The Earth...].

Очевидно, что обнаружены далеко не все древние крупные импактные структуры, формирование которых охватывает более половины возраста Земли, когда об ее поверхность могло удариться от 100 до 200 и более крупных метеоритов [Grieve, 1987; Koeberl, 2006; Хаин, Короновский, 2007]. Об этом, в частности, свидетельствует статистическое сопоставление возрастных этапов астероидных бомбардировок Луны с признаками ударных структур, а также докембрийского плюмового магматизма и наиболее энергичного роста континентальной коры на Земле [Condie et al., 2001; Abbot, Isley, 2002; Condie, 2002]. Оно показало высокую степень корреляции между этими событиями (доверительный уровень от 90 до 97 %) и подтвердило как архейские (3.45—3.2 и 2.7—2.5 млрд лет), так и палеопротерозойскую (2.1—1.8 млрд лет) импактные фазы. Как видно из перечня древних импактных структур, они установлены в пределах Африканского, Канадского, Австралийского и Балтийского кратонов. В то же время в пределах Сибирского кратона древние импактные структуры и сопряженные с ними глубинные процессы, затрагивающие мантию, практически не описаны. Этим определяется наша попытка обратить внимание на такие явления, обнаруженные на Анабарском щите в бассейне р. Котуйкан.

КРИТЕРИИ КОТУЙКАНСКОГО ИМПАКТНОГО СОБЫТИЯ

Котуйканская кольцевая структура (ККС) расположена на севере Сибирской платформы (см. рис. 1, 2). Ее диаметр — 250 км, координаты центра — $69^{\circ}03'$ с.ш. и $104^{\circ}25'$ в.д. Для доказательства Котуйканского импактного события ниже приводятся мега-, макро- и микроскопические критерии, выработанные на основе мирового опыта по изучению крупных астроблем [Фельдман и др., 1981; Melosh, 1997, 2003; Катастрофические..., 2005; Сазонова, 2008; The Earth...].

Мегаскопические критерии. К этим критериям относятся: отражение ККС на космических снимках низкого и среднего разрешения, а также крупные геолого-структурные особенности ее внутреннего строения, характер геофизических аномалий и глубинные неоднородности. ККС дешифрируется на всех без исключения космических снимках, полученных с разных спутников (см. рис. 2), а также [Розен и др., 1986, рис. 5; Глуховский, 1990, рис. 17]. Ее западный сегмент охватывает область развития платформенного чехла, а меньший по размерам, восточный, занимает западную часть Анабарского щита. Подчеркнем, что ее дуговые элементы в пределах Анабарского щита большей частью дисконформны по отношению к линейной северо-западной структуре архейского фундамента, который служил ударной мишенью для крупного астероида, что характерно для древних изометричных импактных структур [The Earth...]. Особенно четко ККС видна на снимках, снятых поздней осенью и весной во время сохранения снежного покрова. На общем светлом фоне западный сегмент структуры выделяется темным фототонном, а ее восточный сегмент — серым, осложненным узкими дуговыми темными полосами (см. рис. 2). Аэровизуальные и наземные наблюдения показали, что эти особенности космического фотопортрета ККС связаны с характером ландшафта. Так, в пределах платформенной части развита лесотундра и лиственничная тайга, не выходящие за пределы внешнего контура структуры, за которым простирается типичная тундра. На Анабарском щите — это разветвленная система гидросети с залесенными долинами на преобладающем сером фоне каменных развалов склонов и водоразделов.

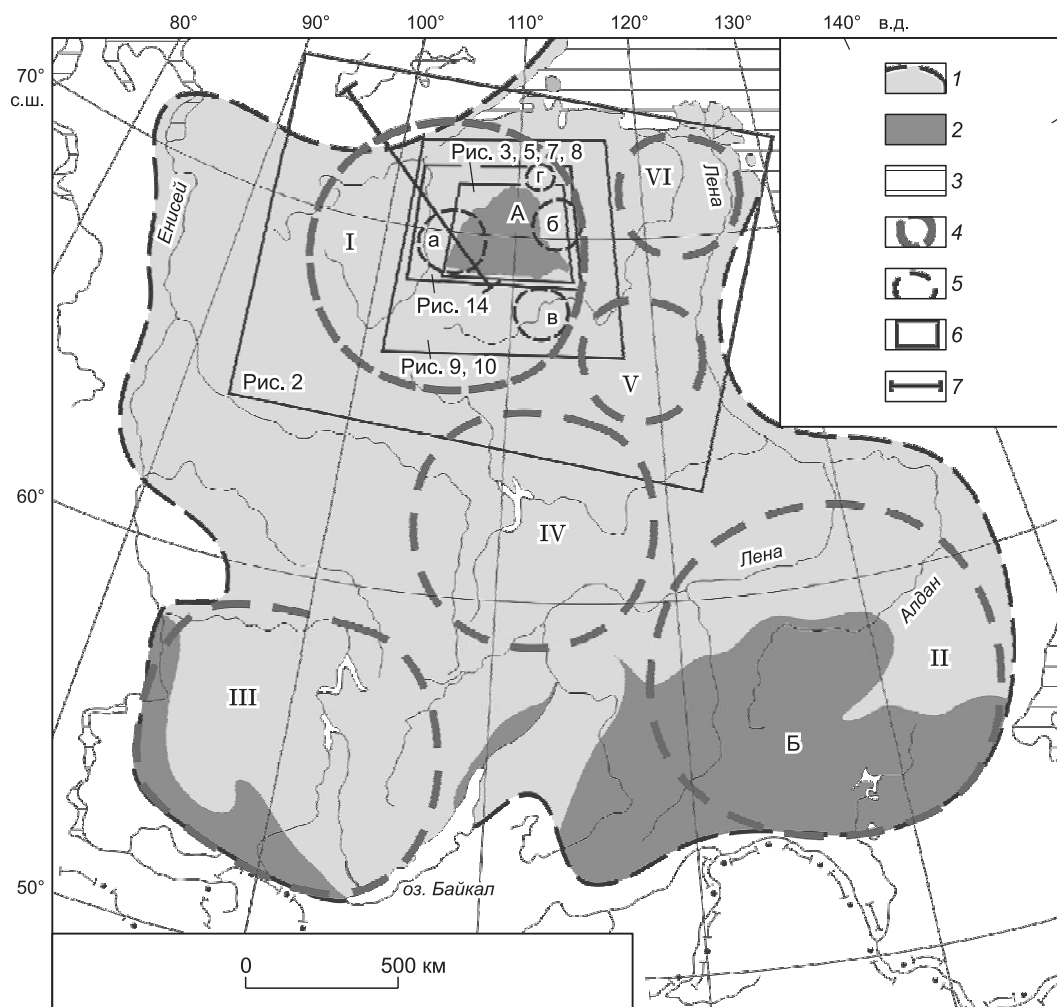


Рис. 1. Схематическая карта Сибирской платформы с элементами нуклеарной тектоники фундамента, кольцевыми структурами, по [Глуховский, 1990], линией профиля МОВЗ, по [Костюченко, 2000].

1 — Сибирская платформа и ее границы; 2 — щиты и другие выступы фундамента; 3 — акватории морей Лаптевых и Охотского; 4 — границы сиалических ядер — нуклеаров; 5 — кольцевые структуры предположительно импактного происхождения; 6 — контуры рисунков и их номера; 7 — линия профиля МОВЗ (см. рис. 9). Обозначения структур. Нуклеары: I — Хета-Оленекский, II — Алдано-Становой, III — Ангарский, IV — Вилюйский, V — Тунгский, VI — Оленекский. Щиты: А — Анабарский, Б — Алданский. Кольцевые структуры: а — Котуйканская, б — Куонамская, в — Арга-Салинская, г — Попигайская.

Дуговые линеаменты ККС, частично согласуются с северо-западным генеральным простиранием кристаллизационной сланцеватости архейских метаморфических образований и древних разломов Анабарского щита, но в основном пересекают их (рис. 3), что, как подчеркнуто выше, типично для крупных импактных кольцевых структур.

Западная половина ККС перекрыта платформенным чехлом. По этой причине о строении внутренней части ККС и внешней зоны шокового воздействия можно судить на основании изучения ее Анабарского сегмента. В пределах этого сегмента выделяются две положительных морфоструктуры — купола (см. рис. 3). Один из них — Котуйканский (80×40 км) — расположен в краевой северо-восточной части структуры (рис. 4), другой — Маганский (60×30 км) — на ее юго-западе. В пределах Котуйканского купола локализованы три сближенных сигарообразных тела позднепротерозойских анортозитов: Западный, Центральный и Восточный. В границах Маганского купола анортозиты слагают относительно небольшие тела. Механизм образования куполов с анортозитами будет рассмотрен позже при обсуждении вопроса об оригинальных последствиях импактного события. Здесь лишь подчеркнем, что на космических снимках среднего и высокого разрешения видно, что Котуйканский и Маганский купола в сравнении с окружающей рамой слабо затронуты трещинной тектоникой, в то время как за их предела-

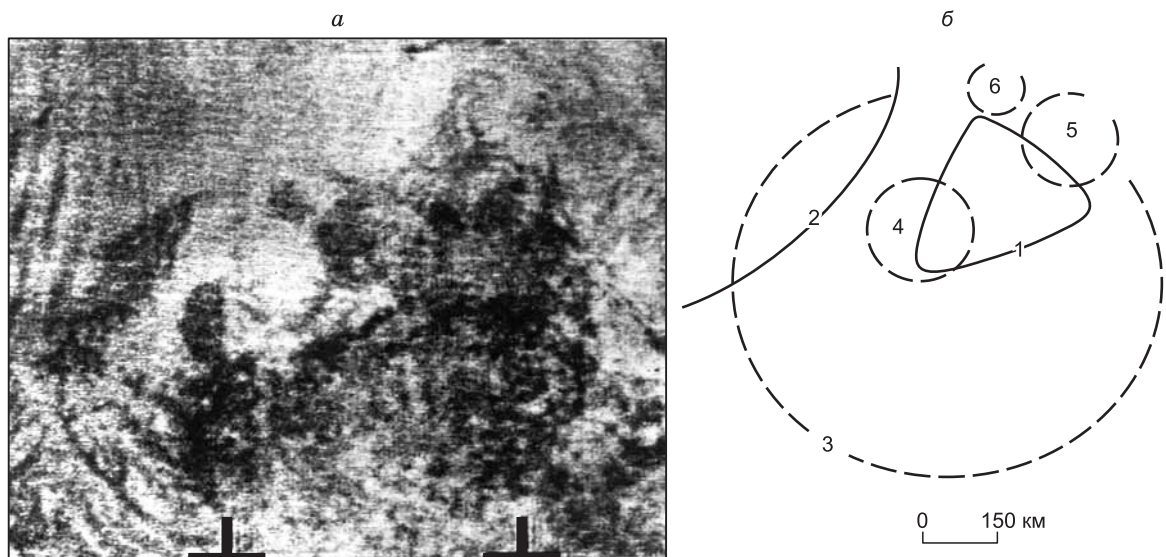


Рис. 2. Космический снимок низкого разрешения ESSA-8. М-б 1:15 000 000.

Дата съемки 27.03.72 (а) и схема его дешифрирования (б).

На схеме (б): 1, 2 — геологические границы Анабарского щита (1) и Енисей-Хатангской депрессии (2); 3 — граница Хета-Оленекского нуклеара; 4—6 кольцевые структуры: 4 — Котуйканская, 5 — Куонамская, 6 — Попигайская.

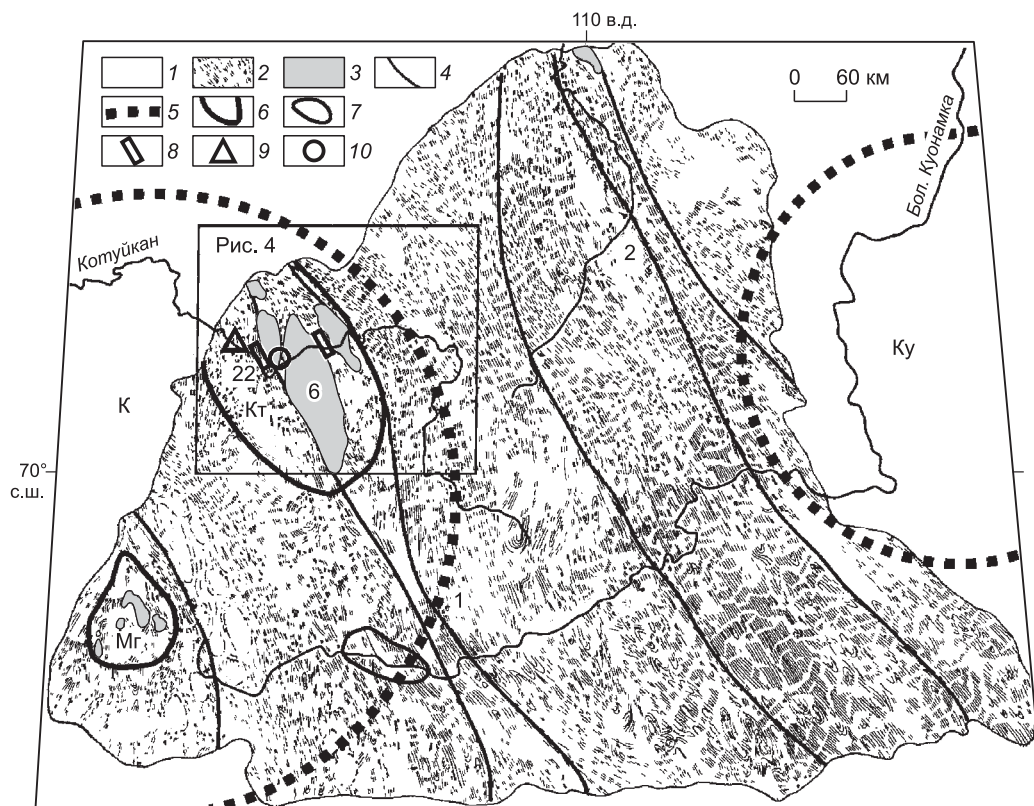


Рис. 3. Структурная карта Анабарского щита с элементами кольцевых структур.

1 — платформенный чехол; 2 — структурные линии нерасчлененного архейского гранулитогнейсового комплекса (по материалам дешифрирования аэрофотоснимков, выполненных Л.И. Шахотько); 3 — массивы палеопротерозойских анортозитов; 4 — главные разломы (1 — Котуйкан-Моонхолинский, 2 — Билляхский); 5 — фрагменты кольцевых структур (К — Котуйканская и Ку — Куонамская); 6 — границы купольных морфоструктур с массивами анортозитов (Кт — Котуйканская, Мг — Маганская); 7—10 — места находок макроскопических признаков импактного события: 7 — ареал распространения псевдотахилитов типа А, 8 — дайкоподобные тела псевдотахилитов типа В с обозначением объектов № 6 и 22, 9 — брекчии, 10 — деформированные конусы разрушения.

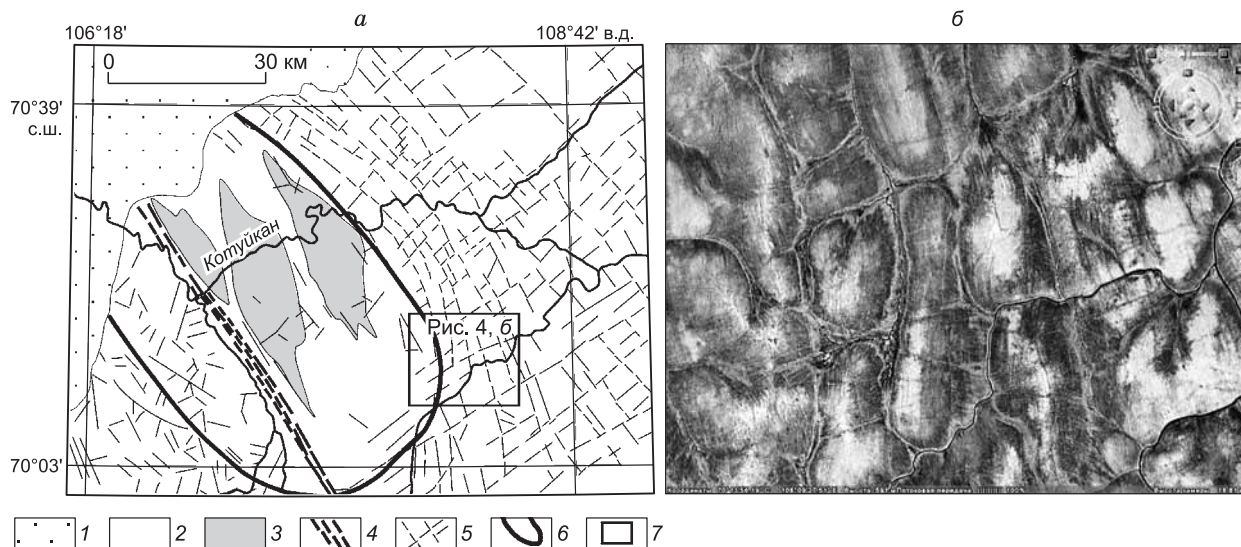


Рис. 4. Схема трещинной тектоники бассейна среднего течения р. Котуйкан (а), составленная по данным дешифрирования космического снимка Google Earth. Фрагмент этого снимка (б).

На схеме (а): 1 — платформенный чехол; 2 — нерасчлененные образования архейского гранулитогнейсового комплекса; 3 — тела анортозитов; 4 — бластомилониты зоны древнего разлома; 5 — элементы трещинной тектоники; 6 — граница Котуйканской купольной морфоструктуры. На снимке (б) за границей купола видны: система ортогональных блоков и тонкие серые линии ССВ простираения. Это дайки долеритов, трассирующие радиальные разломы.

ми, во внутренней части ККС, отмечается развитие своеобразной радиально-кольцевой системы трещин. В краевой зоне структуры и в более широкой полосе ее внешнего обрамления (особенно там, где ее дуговые линеаменты согласны с простираем метаморфических толщ) кристаллический фундамент расколот на ортогональные блоки, ограниченные дуговыми и радиальными разломами. По этим разломам развита пересекающаяся система речных долин, заросших лесом и кустарником (см. рис. 4, а, б). Кроме этого, многие радиальные разломы «залечены» мезопротерозойскими дайками диабазов, что затрудняет визуальную оценку количества и размерности блоков на основании только ландшафтного анализа (см. рис. 4, б). В среднем ортогональные блоки с размером сторон от нескольких сотен метров до 5—6 км постепенно увеличиваются в восточных румбах до размеров 15×15 км, а затем и вовсе исчезают. Таким образом, намечается иерархия блоков, которые ближе к центру структуры (к западной границе щита) последовательно делятся на менее крупные элементарные куски в виде мелких глыб и брекчий, наблюдаемых на водоразделах, склонах и в днищах долин. Такая иерархия кусковатости является одним из признаков масштабного взрыва [Садовский, 1979], который тем не менее не вызвал кардинальную деформацию сублиннейной структуры архейского кристаллического фундамента (см. рис. 3). Это говорит о вибрационном характере движений, типичном для масштабного импактного события [Melosh, 2003].

Для определения преобладающего направления трещиноватости и ее возможной связи с ККС и ареалом ее геодинамического влияния было исследовано распределение плотности линеаментов по показателю отношения их длины к единице площади с помощью компьютерной программы «Arc View» со встроенным модулем «Spatial Analyst», разработанной в ФГУНПП «Аэрогеология». В итоге была получена рельефная картина трещиноватости (с шагом относительного показателя между изолиниями 50). Как видно (см. рис. 4, 5), поля с высокой плотностью линеаментов охватывают Анабарский сегмент ККС, не затрагивая новые купола с анортозитами, что было отмечено выше. Видно также, что поля относительно высокой трещиноватости выступают далеко за пределы ККС в виде протяженных радиальных зон, секущих древние северо-западные тектонические направления (см. рис. 5). Подобная лучевая система трещин видна на Луне (ударные кратеры Коперник, Тихо и Кеплера). Там лучи радиальных выбросов из кратеров во много раз превосходят их диаметры, а сами выбросы сохраняются, скорее всего, благодаря соответствующей системе трещин и мелких вулканических аппаратов.

Таким образом, иерархический характер блокового строения Анабарского щита обусловлен пересечением радиальных и дуговых трещин и разломов в зоне геодинамического влияния ККС. Это можно связать с масштабным импактным событием. Судя по этим структурным особенностям, ударная трещиноватость в условиях, когда мишенью служили архейские метаморфические образования, развивалась как горизонтально, так и на глубину. Оценку глубины кратера и зоны брекчирования в зависимости от

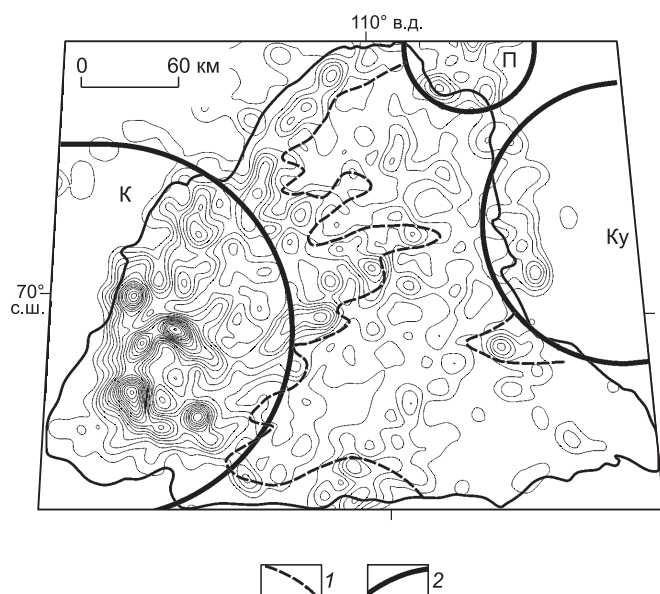


Рис. 5. Карта распределения плотностей трещиноватости на Анабарском щите по данным компьютерной обработки линейной сети.

Шаг относительной плотности изолиний — 50.

1 — границы максимальной плотности трещиноватости; 2 — фрагменты кольцевых структур: Котуйканской (К), Куонамской (Ку) и Попигайской (П).

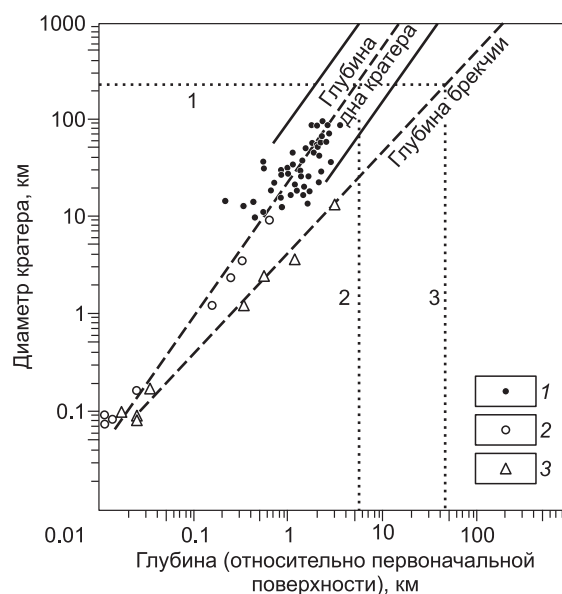


Рис. 6. Диаграмма зависимости глубины кратеров и брекчий от диаметров земных и лунных кратеров, по [Ронка, 1968].

Пунктирными линиями показаны: диаметр ККС (1) и соответствующие ему глубины дна кратера (2) и зоны брекчирования (3) относительно первоначальной поверхности. 1 — лунные кратеры, класс 1; 2 — земные кратеры; 3 — глубина брекчии.

диаметра кратера можно провести с помощью эмпирической диаграммы Л.Б. Ронка [Ронка, 1968]. Как видно на графике (рис. 6), глубина Котуйканского кратера диаметром 250 км относительно первоначальной поверхности достигала 6—7 км, а глубина брекчирования около 50 км. Данный вывод подтверждается анализом гравитационного и магнитного полей (рис. 7, 8) и профиля МОВЗ (рис. 9), а также присутствием мощных тел псевдотахилитов, формирующихся на этих глубинах (см. ниже). Рассмотрим в связи с этим графиком особенности геофизических полей и глубинного строения ККС.

Даже после процессов разрушения и глубокой (до 7—10 км) эрозии кратеров такого масштаба в земной коре сохраняются структуры их основания со следами изменений, возникших при воздействии невообразимо больших давлений от ударных волн и температур. В частности, ударная трещиноватость может проникать до глубины, равной 1/3 диаметра структуры, а разломы, связанные с ударом, достигать вдвое большей глубины, что согласуется с относительными величинами прочности для сжатия и сдвига в гранитогнейсах. Все это приводит к разуплотнению коры, а разломы и трещины могут проникать в мантию и влиять на характер поля силы тяжести [Ронка, 1968]. Под воздействием постшоковых температур, близких к температуре точки Кюри, могут меняться и магнитные характеристики пород: происходит накопление остаточного магнетизма, меняющегося в результате шокового распада мафических минералов [Lana, 2003a]. Обо всем этом и свидетельствуют аномальные гравитационное и магнитное поля ККС.

Так, общее гравитационное поле района ККС (в редукции Буге) в целом характеризуется дефицитной плотностью, но также подчеркивает конфигурацию кольцевой структуры, осложняясь лепестковыми выступами, возможно, связанными с радиальной системой ударной трещиноватости (рис. 7). Внутри структуры выделяется изометричная аномалия избыточной плотности, связанная, вероятнее всего, с нескрытым массивом ультраосновных пород, появление которых, равно как и других подобных массивов, может быть связано с подъемом мантийного материала сквозь импактно деформированную литосферу.

Магнитное поле структуры характеризуется кольцевой зональностью положительных и отрицательных аномалий, особенно отчетливых в ее центре (рис. 8). Причем рисунок магнитных аномалий четко отличается от характера линейных аномалий, свойственных региональной картине строения аномального магнитного поля.

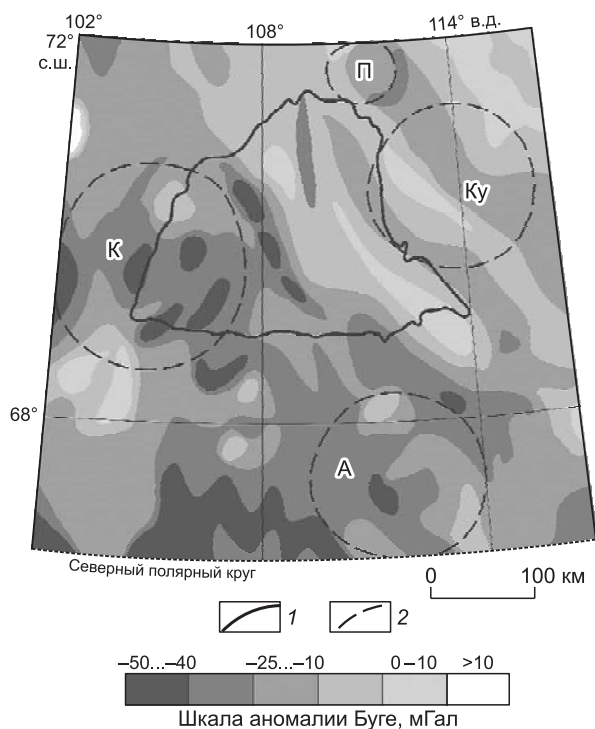


Рис. 7. Карта гравитационного поля Анабарского щита и прилегающих территорий в редукции Буге (по [Гравиметрическая..., 2004] с упрощением и дополнениями).

1 — границы Анабарского щита; 2 — кольцевые структуры: Котуйканская (К), Куонамская (Ку), Арга-Салинская (А), Попигайская (П).

По своим гравитационным и магнитным характеристикам ККС вполне удовлетворительно сопоставляется с такими крупными (в различной степени эродированными) импактными структурами Земли, как Вредефорт и Чиксулуб [Melosh, 1997; Grieve, Therriault, 2000; The Earth...].

Важным мегаскопическим критерием крупного импактного события является глубинное строение ископаемого кратера, которое во многом зависит от геологического строения мишени, параметров ударника (или кинетической энергии удара), постимпактных процессов релаксации и модификации, а также глубины эрозионного среза. Установлено, что единым для всех импактных структур является положение эффективного центра взрыва, вызванного ударником.

Этот эмпирически вычисленный центр расположен ниже уровня поверхности мишени на глубине, равной диаметру ударника. При этом ударный фронт, распространяющийся на глубину и в обе стороны от центра удара, имеет полусферную оболочку, формирующуюся через некоторое время после удара [Turtle, Pierazzo, 1998; Turtle et al., 2003].

Особенности глубинного строения ККС видны на разрезе земной коры вдоль профиля МОВЗ: р. Маган — р. Тарей [Карта..., 2000] (рис. 9, б). Они рассматриваются в сравнении с соизмеримым, но менее эродированным кратером Чиксулуб [Morgan et al., 1997, 2000; Grieve, Therriault, 2000], глубинное строение которого видно на более детальном сейсмическом профиле, пересекающем кратер с востока на запад (см. рис. 9, а). На нем кроме сейсмических границ, отражающих субгоризонтальные разделы третичного осадочного бассейна, распознается внешняя кольцевая структура в виде глубоких коровых отражающих слоев с падением 30—40° к ее центру (см. рис. 9, а). Эти данные позволили предполагать, что средняя и нижняя кора двигалась вниз и вовнутрь за счет обрушения кратера по многокольцевой системе, что одновременно привело к деформации и опусканию поверхности Мохо на 1—2 км в радиусе 35—55 км от центра [Morgan et al., 1997, 2000]. Внешнее кольцо структуры диаметром 250 км интерпретируется как надвиг: это сближает кратер Чиксулуб и купол Вредефорт, где отмечен аналогичный характер глубоких чешуйчатых надвиговых систем [Brink et al., 1997, 1999].

Рассмотрим отрезок профиля МОВЗ Маган — Тарей, который пересекает ККС и зону

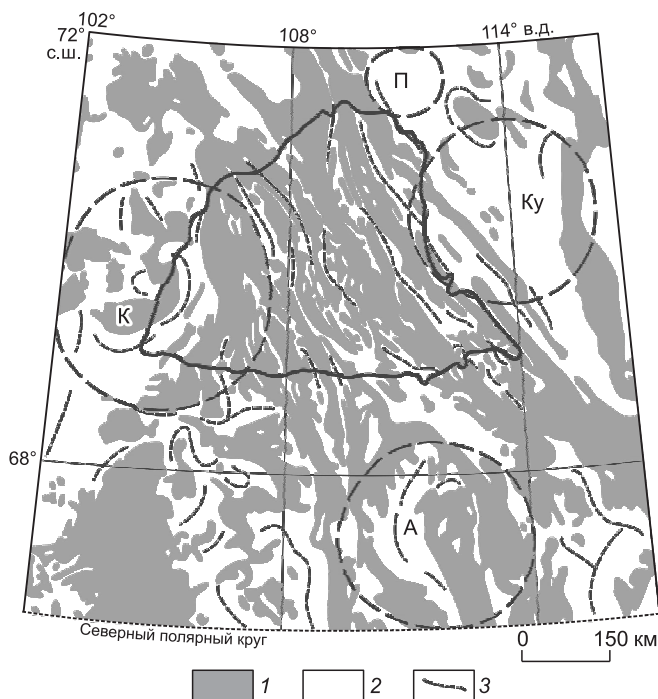


Рис. 8. Карта аномального магнитного поля Анабарского щита и прилегающих территорий (по [Карта..., 2000] с упрощением и дополнениями).

1, 2 — интенсивность магнитного поля: 1 — от 0 до 1000 нТл, 2 — от 0 до -1000 нТл; 3 — оси отрицательных аномалий. Остальные усл. обозн. см. на рис. 7.

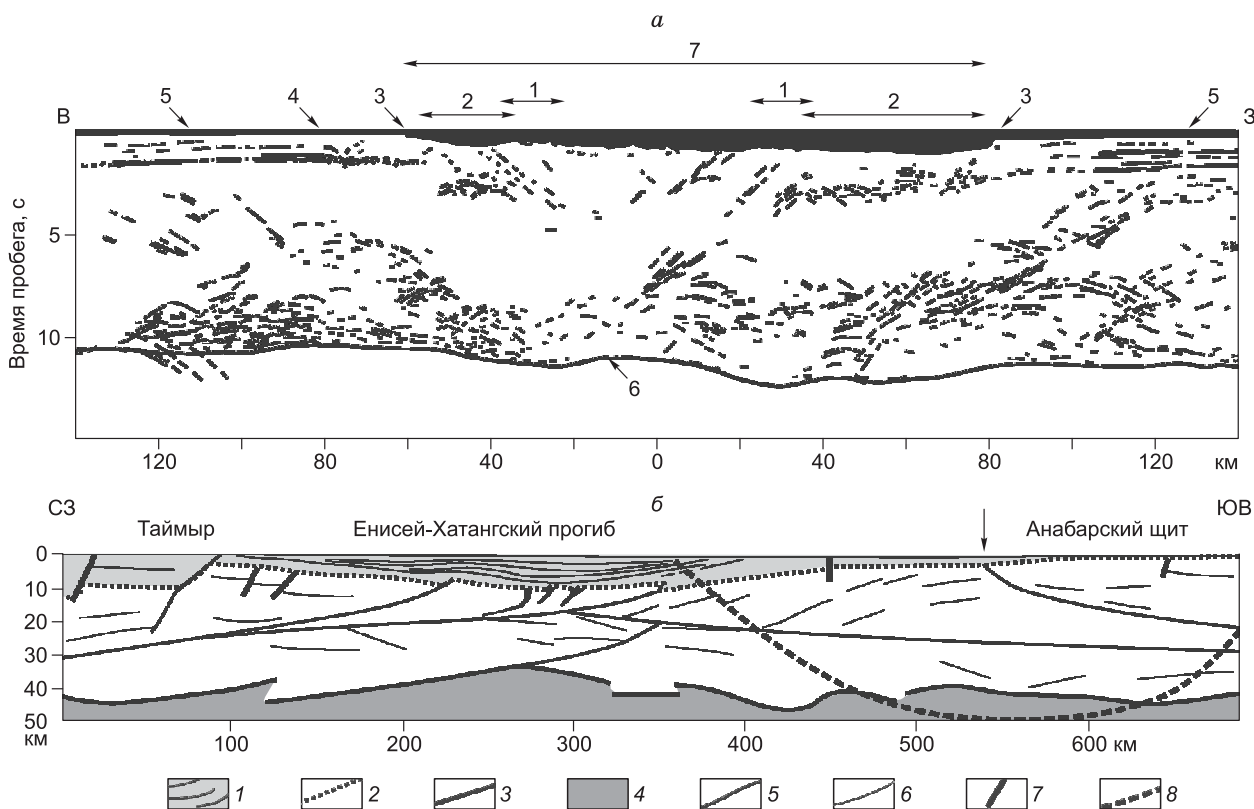


Рис. 9. Глубинные разрезы земной коры кратера Чиксулуб (а) и Котуйканской кольцевой структуры (б).

а — сейсмический профиль отраженных волн через кратер Чиксулуб (по [Grieve, Theriault, 2000; Morgan et al., 1997, 2000]). Вертикальный масштаб — двустороннее время пробега сейсмической волны в секундах. По горизонтали — радиальная дистанция от центра взрыва. Расстояние до мантии 33—35 км. Цифры и стрелки на профиле (а) согласно оригиналу обозначают: 1 — кольцевые возвышенности; 2 — зоны террас; 3 — кратерный вал; 4 — внешнее кольцо; 5 — дальнейшее кольцо; 6 — граница Мохо; 7 — постимпактный третичный осадочный бассейн (черный цвет). В пространстве между границей Мохо и подошвой третичного бассейна разными линиями (сплошными и пунктирными) выделены отражающие сейсмические границы.

б — глубинный разрез земной коры вдоль профиля МОВЗ р. Маган — р. Тарей, от Таймыра, через Енисей-Хатангский прогиб и западную часть Анабарского щита и пересекающий ККС (ГЕОН, 1981, по [Костюченко, 2000] с изменением соотношений вертикального и горизонтального масштабов и дополнениями). 1 — нерасчлененные осадочные отложения позднего докембрия и фанерозоя; 2, 3 — поверхности: 2 — дорифейского фундамента и 3 — Мохо; 4 — верхняя мантия; 5, 6 — сейсмические границы в консолидированной коре: 5 — по данным общей глубинной точки (ОГТ), 6 — по данным МОВЗ; 7 — разломы; 8 — условная граница ударной полусферы. Стрелкой показан предполагаемый центр удара.

ее внешнего геодинамического влияния (см. рис. 9, б). Этот отрезок захватывает часть Таймыра, Енисей-Хатангский прогиб и западный край Анабарского щита. Здесь можно условно выделить ударную полусферу, включающую (с учетом гравиметрических данных) зону дробления и разломы верхней, средней и нижней коры. Хорошо видна деформированная поверхность Мохо и частично мантии до глубины 50 км. Обоснование таких параметров ударной полусферы, зависящих от энергии удара, отраженной в диаметре кольцевой структуры, вполне гармонирует с диаграммой зависимости глубины кратера (6—7 км) и зоны брекчирования (50 км и более) от этого диаметра (см. рис. 6). Кроме этого, на профиле МОВЗ отражающие сейсмические границы в верхней части коры полого расходятся в разные стороны от теоретически предполагаемого эффективного центра удара, определяя возможное положение центрального постимпактного поднятия (см. рис. 9, б). При этом надо учесть то, что, в отличие от кратера Чиксулуб, самые верхние горизонты консолидированной коры ККС со всеми ее возможными неоднородностями были уничтожены в ходе процессов постимпактной эрозии и денудации глубиной в 6—7 км. В нижней части полусферной оболочки, которая окончательно формируется после удара, наклоны пологих отражающих сейсмических границ субпараллельны границе этой оболочки и также расходятся от центра структуры, но в направлении, противоположном верхним сейсмическим границам. Как отмечалось выше, поверхность Мохо заметно деформирована и вертикально перемещена как в пределах полусферы, так и в некотором удалении от нее. Сравнение положения и степени наклона сейсмических границ кра-

тера Чиксулуб и ККС (с учетом ее эрозионного среза) показывает их относительную схожесть. Это позволяет предположительно рассматривать сейсмические границы ККС и деформации поверхности Мохо как отражение пологих сдвигонадвиговых и вертикальных перемещений средней и нижней коры в результате действия высокоэнергетического удара.

Таким образом, комплекс мегаскопических критериев, типичных для импактных событий, позволяет сделать вывод о парагенетической связи между кольцевой структурой, площадными (в пределах ККС) и радиальными (за ее пределами) системами трещин, геофизическими аномалиями и глубинными неоднородностями и выдвинуть версию о лучевом типе ударного кратера с центром в месте схождения радиальных линейных структур. Сейчас он перекрыт платформенным чехлом. Как показывают множественные числовые расчеты, импактные структуры такого диаметра, как Котуйканская, были образованы в результате столкновения с породами мишени ударника размером от 14 до 20 км со скоростью падения 15—20 км/с и энергией удара от $2 \cdot 10^{22}$ до $4 \cdot 10^{23}$ Дж [Turtle, Pierazzo, 1998; Катастрофические..., 2005]. Такие события сопровождались сверхвысоким давлением и температурой [Turtle, Pierazzo, 1998; Turtle et al., 2003], образованием расплавов, дроблением пород мишени, выбросами, кольцевыми смещениями, модификацией кратеров с образованием многокольцевых структур с внутренними и внешними горками, центральными поднятиями и т. д. [Melosh, 1997].

Макроскопические критерии. К этому классу критериев относят зоны динамического трения, разного рода брекчии, конусы разрушения и псевдотахилиты, которые встречаются в основании эродированных кратеров и привязаны к кольцевым структурам [Фельдман и др., 1981; Melosh, 2003; Сазонова, 2008]. Все эти образования были обнаружены в долине р. Котуйкан, пересекающей ККС вдоль ее субширотного радиуса (см. рис. 3).

Зоны динамического трения образованы маломощными (от первых сантиметров до 1.5—2 м) телами с неясно выраженной полосчатой текстурой, которые сложены средне- и крупнозернистыми псаммитоподобными породами, состоящими из гранулированных зерен кварца и полевого шпата и округлыми (окатанными?) включениями амфиболита (рис. 10, а).

Среди брекчий можно выделить две разновидности. Первая — это мегабрекчии (см. рис. 10, б), представленные тектоническими полигональными блоками метаморфических пород размером до первых метров, разделенные узкими зонами дробления, катаклаза. Часто видны зеркала скольжения, но без видимых крупных перемещений блоков. Иногда эти блоки разделяются узкими зонами динамического трения (см. выше). Представляется, что мегабрекчии и разделяющие их зоны образовались в результате вибрационного трения между небольшими тектоническими блоками. Эта разновидность брекчий и зон трения развита к западу от Котуйканского купола вплоть до границы платформенного чехла. В этом месте чехол сложен осадочными отложениями ильинской свиты мукунской серии среднего протерозоя, которая залегает на гидрослюдисто-кварц-каолининовой коре выветривания мощностью до 10 м и более, развитой на интенсивно раздробленных породах кристаллического фундамента, резко погружающегося в сторону центра ККС. Эти брекчии, которые располагаются ближе к предполагаемому центру взрыва, по существу, относятся к разряду наиболее мелких блоков в отмеченном выше иерархическом ряду кусковатости [Садовский, 1979].

Вторая разновидность брекчий встречена в неокатанных глыбах в русле р. Котуйкан в 3 км ниже устья р. Арбын (см. рис. 3, рис. 10, б, в). Это бесформенные неориентированные разновеликие обломки амфиболита в кварц-полевошпатовом матриксе. Они внешне напоминают агматиты. Высокая степень метаморфизма и, возможно, плавления матрикса позволяет с определенной степенью условности отнести их к представителям нижней импактной автохтонной брекчии, вынесенной к поверхности в ходе формирования Котуйканского купола, так как она располагается вблизи контакта с анортозитами.

Конусы разрушения считают одним из главных свидетельств импактного события. Эти конусы, как правило, хорошо развиваются по осадочным породам и менее характерны для кристаллических образований. Часто конусы подвергаются деформациям и распаду, тогда по внешним признакам они напоминают текстуры типа *cone in cone* («конус в конус»). Такие образования с сохранившимся фрагментом конуса были найдены в русле р. Котуйкан между Центральным и Западным массивами анортозитов (см. рис. 3, рис. 10, г).

Псевдотахилиты также относят к одному из основных макроскопических критериев крупных импактных событий в том случае, когда они пространственно ассоциируют с радиальными и дуговыми элементами кольцевых структур ударного происхождения. Псевдотахилиты обычно формируются в породах верхней и нижней коры в результате быстрого трения и фракционного плавления стенок трещин во время землетрясений и крупных импактных событий [Катастрофические..., 2000; Melosh, 2003; Сазонова, 2008]. Выделяют два морфологических типа псевдотахилитов [Melosh, 2003]: тип А — маломощные (от миллиметров до первых метров) жилородные тела, и тип В — мощные (до 500 м) протяженные тела (дайки) со сложным внутренним строением. Псевдотахилиты Анабарского щита обоих

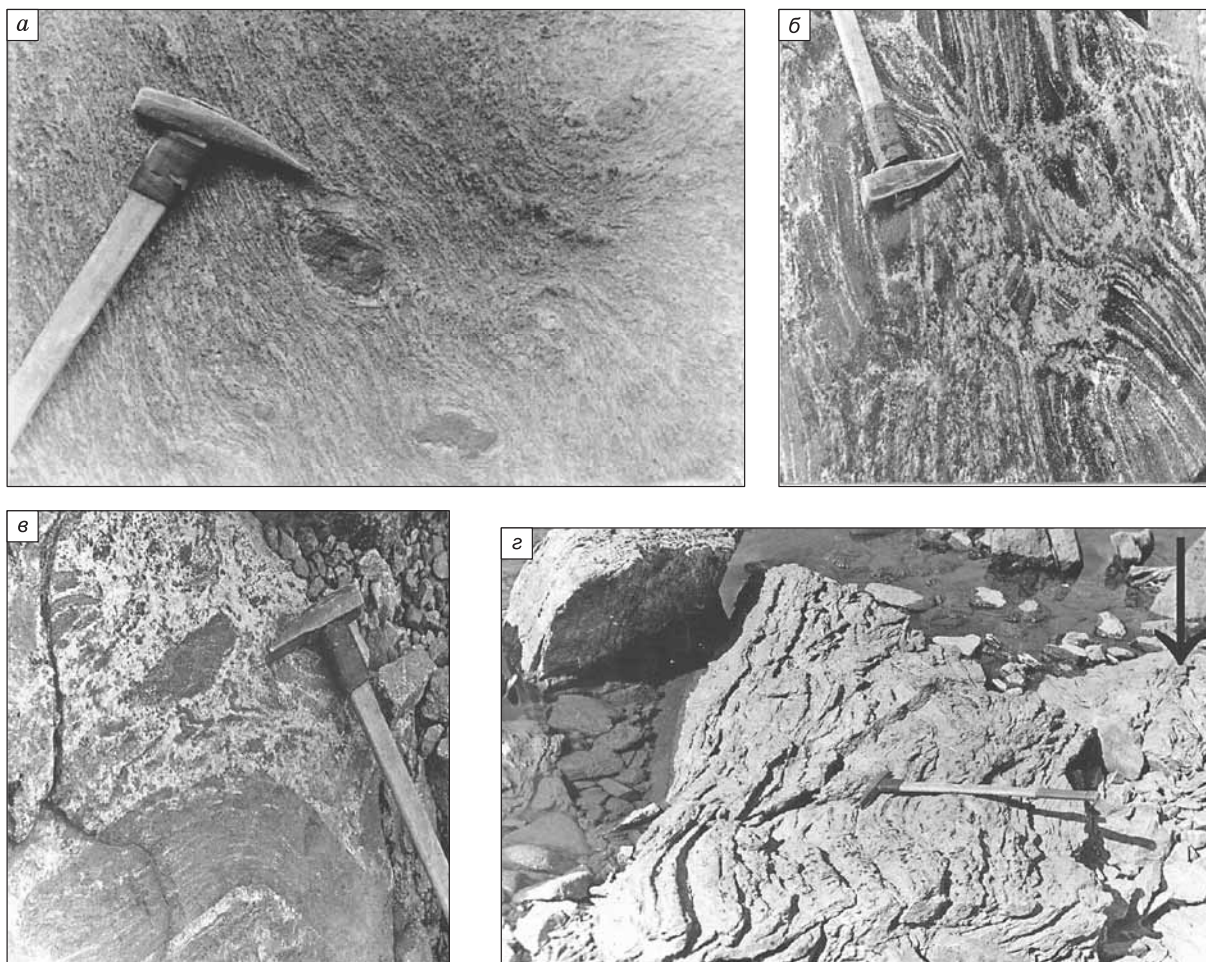


Рис. 10. Макроскопические критерии импактного события (фотографии).

Зона трения между обломками мегабрекчий (а); брекчий аллогенного типа (б, в); деформированные конусы разрушения, стрелкой показан фрагмент сохранившегося конуса (z). Пояснения см. в тексте.

типов развиты на периферии Котуйканской кольцевой структуры, что говорит об их структурно-парагенетической связи (см. рис. 3).

Если псевдотахилиты типа *A* на Анабарском щите, развитые в долине р. Бол. Куонамка (см. рис. 3), были давно детально изучены и описаны [Лутц, Оксман, 1990], то псевдотахилиты типа *B* выделены здесь сравнительно недавно [Глуховский и др., 2009; Глуховский, Кузьмин, 2010]. Два мощных (200—400 м) и протяженных (многим более 1 км) дайкоподобных тела этих пород андезитового состава обнажаются в среднем течении р. Котуйкан (см. рис. 3). Одно из них — № 6 (см. фрагмент на рис. 11) расположено вблизи восточного контакта Центрального массива анортозитов на левобережье р. Котуйкан в районе устья его притока р. Левый Кирисагин-Юрэх. Здесь, в полосе шириной около 400 м, вскрываются узкие (до первых метров) протяженные линзы афанитовых черных пород, которые, благодаря округлым включениям полевого шпата размером до 1—2 см, внешне похожи на миндалекаменные базальты (рис. 12). Они перемежаются с многометровыми полосами мелко- и микрокристаллических меланократовых пород (микроамфиболитов), похожих на роговик или диабаз, — типичный вид девитрифицированных псевдотахилитов [Шорт, 1968]. Иногда на выветрелой поверхности афанитовых пород, включающих обломок пироксен-плагиоклазового кристаллического сланца (видимо, ксенолит материнской породы), видны узоры продольного пластического течения протяженностью более 7 м и шириной от 0.7 до 2—3 м в раздувах (см. рис. 11). Микроамфиболиты тоже обнаруживают внешние признаки пластического течения материала. Среди них иногда встречаются оvoidные структуры размером до 0.5×0.3 м, напоминающие шаровую отдельность. Различие структурных форм в теле псевдотахилитов может свидетельствовать о многократных процессах внедрения расплавленной массы, кристаллизующейся в разных тектонических условиях (сжатия со сдвигом и растяжения). Вверх по течению р. Котуйкан тело

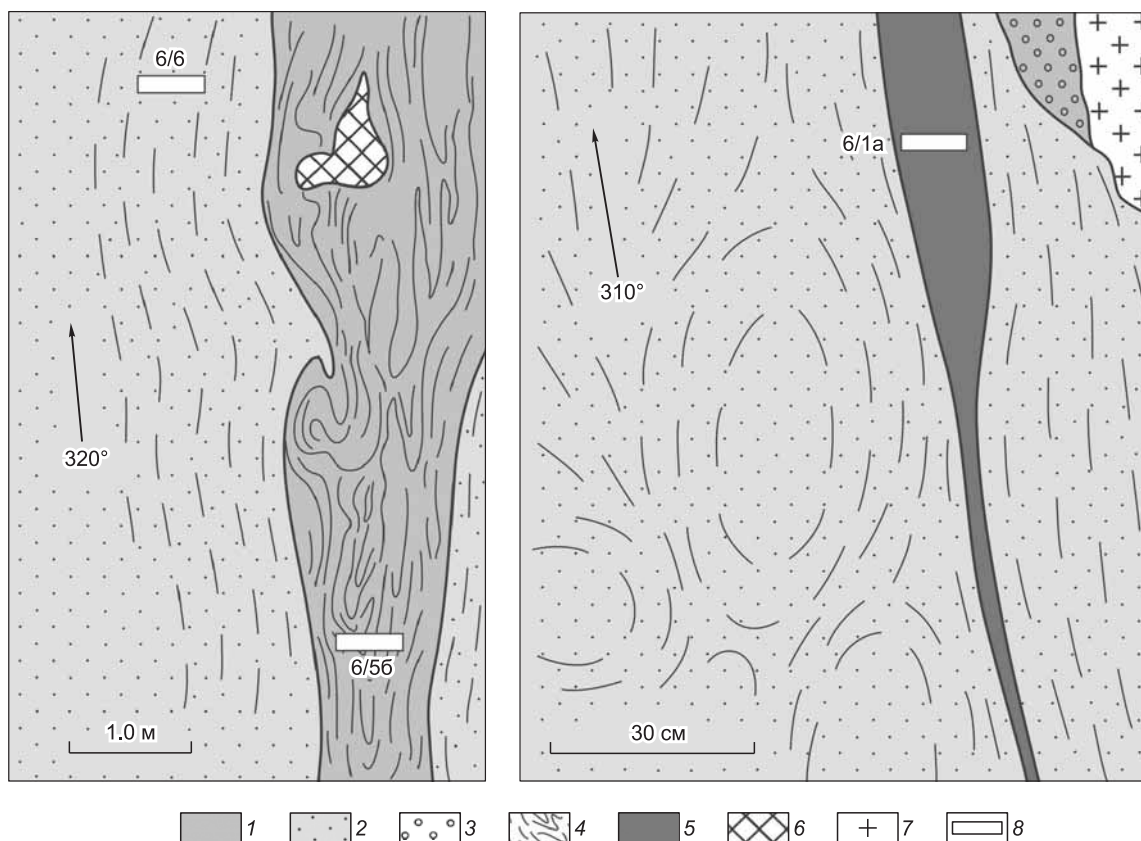


Рис. 11. Зарисовка фрагментов обнажения псевдотахилитов № 6 с указанием мест отбора проб.

Результаты анализов см. [Глуховский и др., 2009; Глуховский, Кузьмин, 2010].

1, 2 — псевдотахилиты: 1 — массивные антрацит-черные, 2 — с раскристаллизованным стеклом (микрозернистые амфиболиты); 3, 4 — текстурно-структурные особенности псевдотахилитов: 3 — с округлыми включениями минералов, 4 — с шаровой отдельностью, со следами сублинейных и пластических сдвигов; 5 — мелкосреднекристаллические реститовые амфиболиты; 6 — пироксеновый кристаллический сланец; 7 — граниты; 8 — места отбора проб и их номера. Стрелкой указан азимут простирания полосчатых структур.

псевдотахилитов постепенно, через полосу инъекционных гнейсов, сменяется порфиробластическими биотитовыми гранитами с возрастом 1.87—1.84 млрд лет (U-Pb-метод по циркону) [Степанов, 1974; Степанюк, 1991]. Это определяет верхнюю возрастную границу псевдотахилитов.

Вторая «дайка» псевдотахилитов шириной 200—250 м и прослеженной протяженностью более 1 км (см. рис. 3, № 22) расположена на правом берегу р. Котуйкан. Она сложена такими же породами, как и в обнажении № 6 (см. рис. 11, а). На изученном участке протяженностью не более 1 км эта «дайка» псевдотахилитов более однородна по составу и имеет резкие контакты с древней зоной бластомилонитов, с одной стороны, и с анортозитами Западного массива — с другой.

Основная масса псевдотахилитов метастабильна и со временем часто раскристаллизуется, особенно в случае наложения термальных процессов, следующих вслед за образованием стекла. Включения в псевдотахилитах играют роль более устойчивых фаз. На краях этих включений выделяются узкие полоски с более крупнозернистым строением раскристаллизованного стекла. Это хорошо видно на фото шлифов (см. рис. 12, б, в). В итоге возникла другая внешне похожая петрографическая разновидность псевдотахилитов, которая отличается от них микрозернистым пылевидным строением основной массы за счет ее раскристаллизации — это, по существу, апопсевдотахилиты или милолистиниты [Rondot, 1989], к которым и относится подавляющая часть псевдотахилитов типа В.

Описание псевдотахилитов, связанных с Котуйканской структурой, их геохимические характеристики, определение возраста и природа приводятся в наших работах [Глуховский и др., 2009; Глуховский, Кузьмин, 2010]. Напомним, что изохронные Sm-Nd- и Rb-Sr-возрасты псевдотахилитов из двух обнажений № 6 и 22 равны соответственно 1856 ± 58 , 1936 ± 30 млн лет и 1859 ± 140 , 1840 ± 110 млн лет. Показатели $\epsilon_{Nd}(T) = -9.6$ и -11.5 , $T_{DM} = 3099$ и 3031 млн лет позволяют считать, что псевдотахилиты

a

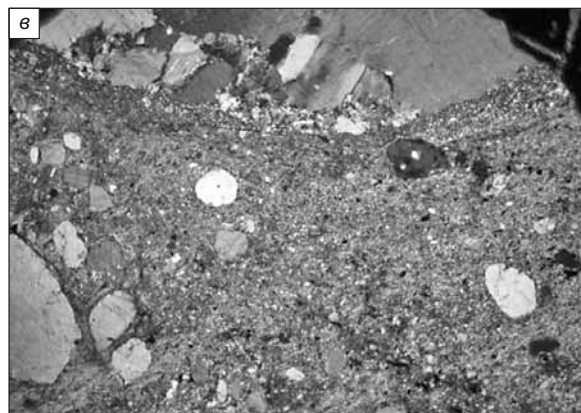
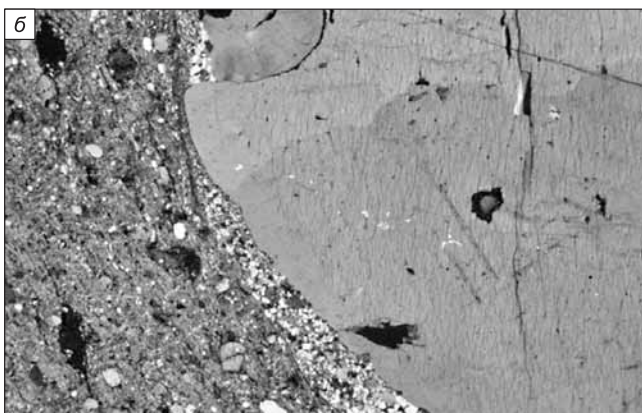
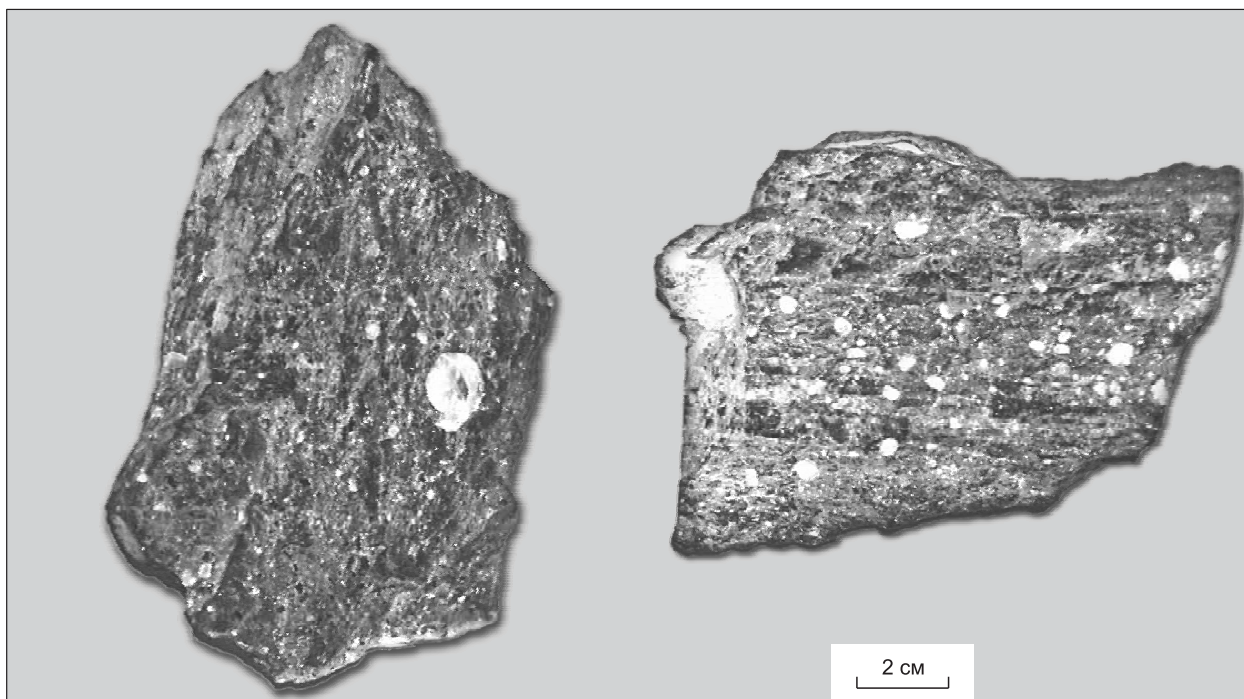


Рис. 12. Псевдотахилиты типа В.

Фотографии образцов (*a*) из обнажений № 22 (слева) и № 6 (справа) и шлифов (*б*, *в*). Шлифы: увеличение 40, николи X. Пояснения см. в тексте.

выплавлялись из архейского корового протолита и превращались в милолистиниты в условиях амфиболитовой фации в течение чрезвычайно короткого периода времени — 1900 ± 50 млн лет [Глуховский и др., 2009]. Именно такие термодинамические условия возникают на периферии крупных импактных структур [Turtle, Pierazzo, 1998; Turtle et al., 2003]. При этом следует отметить, что анортозиты не были вовлечены в процессы выплавления псевдотахилитов, так как на контакте с анортозитами псевдотахилиты не обогащены глиноземом, количество которого в них варьирует от 9.10 до 15.05 % [Глуховский и др., 2009; Глуховский, Кузьмин, 2010].

Итак, большая мощность тел псевдотахилитов и их структурная неоднородность свидетельствуют о неоднократной быстрой смене режимов сжатия и растяжения или вибрации. При сжатии и сдвигах происходило фрикционное плавление субстрата, а при растяжении — раскрытие трещин и внедрение все новых порций расплава. Быстрота этих знакопеременных движений отражена в близких значениях времени закрытия Sm-Nd и Rb-Sr изотопных систем в интервале 1900 ± 50 млн лет [Глуховский и др., 2009], отвечающих соответственно возрасту генерации расплавов и завершающего метаморфизма, протекавшего в условиях давления и температур амфиболитовой фации и приведшего к раскристаллизации

стекла и превращением всей массы псевдотахилитов в милолистиниты. Такой специфический вибрационный геодинамический режим механизма образования мощных тел псевдотахилитов свойствен только масштабным импактным событиям [Melosh, 2003]. Кроме этого, псевдотахилиты могут служить индикатором уровня постимпактного эрозионного среза, поскольку они образуются на относительно небольших глубинах (6—7 км) [Grieve, Theriault, 2000; Melosh, 2003], что подтверждают данные графика (см. рис. 6). Это значение можно условно принять за глубину эрозионного среза ударного кратера, основание которого в настоящее время обнажено на Анабарском щите.

Таким образом, приведенные выше макроскопические критерии в основном подтверждают импактную природу ККС.

К числу **микроскопических критериев** импактного события относят диаплектовые изменения в минералах, которые происходят под воздействием ударной волны. Они выражены в деформации кристаллической решетки, формировании часто ромбовидных и радиальных систем планарных трещин, изгибах двойниковых швов в плагиоклазах и механических деформациях с разрывом минералов и двойниковании, появлении полос смятия в биотите и т. д. [Shneider, 1972; Мащак, Орлова, 1986; Гулов, Гурова, 1991; Сазонова, 2008]. Все эти шоковые признаки были обнаружены в минералах различных пород, развитых в пределах ККС. Обратимся к конкретным примерам (см. рис. 12).

В микроамфиболитах (рис. 13, *а*), ассоциирующих с псевдотахилитами обнажения № 6, в шлифах видна ромбовидная система трещин, по которой произошел механический разрыв зерен плагиоклаза. Эти разрывы заполнены новообразованным биотитом. В срезе зерна трещиноватого амфибола выделяется деформированный и перевернутый фрагмент, который хорошо отличается по цвету. Кроме этого, в округлых включениях плагиоклаза из псевдотахилитов объекта № 22 видна ромбовидная система трещин и подчиненное ей искривление двойникового шва (см. рис. 13, *б*). На микрофотографиях зерен альбита из включений в псевдотахилитах видны две системы микротрещин, ориентированных по двум кристаллографическим направлениям; по тем же направлениям развивается тонкое двойникование — типичный признак механического воздействия [Сазонова, 2008] (см. рис. 13, *в, з*). Все эти примеры подтверждают модель формирования псевдотахилитов в шоково-вибрационном тектоническом режиме.

Недавно [Ларичев и др., 2008] в меланократовых биотит-гиперстен-гранатовых гнейсах на р. Котуйкан (западный край Котуйканского купола) обнаружены кристаллы граната с трещинами, которые по всем структурным признакам можно считать планарными [Сазонова, 2008]. Эти кристаллы в центре и на периферии содержат включения уранинита, коффинита и хлорофеита (см. рис. 13, *д, е*). Помимо этого в наиболее деформированных кристаллах граната отмечены включения биотита с классической шоковой структурой «пояса смятия» (см. рис. 13, *ж*). Возраст вторичных изменений в урансодержащих минералах этих гнейсов равен 1963 ± 56 млн лет (Pb-Pb- и U-Pb-методы). С учетом погрешности он совпадает со средним возрастом образования и раскристаллизации псевдотахилитов — 1950 ± 50 млн лет.

Таким образом, комплекс микроскопических критериев с учетом данных о палеопротерозойском возрасте урансодержащих минералов в породах, подвергшихся шоковому воздействию, в целом подтверждают ударную природу ККС и время импактного события. Вместе с тем необходимо отметить, что в пределах Анабарского щита обнажается лишь краевая зона эродированного ударного кратера, где *PT*-условия шокового метаморфизма не достигали уровня образования таких высокобарических минералов, как коэсит, а также развития планарных деформаций с плавлением стенок трещин в минералах ($P = 5—10$ ГПа и $T = 1173$ К) и массового формирования конусов разрушения ($P = 2—5$ ГПа), согласно модели [Turtle, Pierazzo, 1998; Turtle et al., 2003].

КОСВЕННЫЕ ПРИЗНАКИ ДРУГИХ ИМПАКТНЫХ СТРУКТУР

Некоторые мегаскопические признаки Котуйканского импактного события позволяют выдвинуть предположение о существовании, по крайней мере, еще двух погребенных структур подобного типа, расположенных невдалеке.

Одна из них — Куонамская (диаметр не более 200 км, координаты центра: $70^{\circ}24'$ с.ш. и $114^{\circ}27'$ в.д.). Она расположена к востоку от Анабарского щита (см. рис. 1, 2, 3, 5, 7, 8) и почти полностью перекрыта платформенным чехлом, задевая щит своим западным краем. На всех без исключения космических снимках, включая и последние версии «Google Earth», она выделяется так же отчетливо, как ККС и более молодой (36 млн лет) Попигаийский кратер на севере Анабарского щита. Кроме того, с элементами этой кольцевой структуры связаны повышенная трещиноватость фундамента и дайки мезопротерозойских диабазов, трассирующих конформные субмеридиональные разломы вдоль восточного края Анабарского щита. Однако Куонамская кольцевая структура не отражена в аномальном магнитном и гравитационном полях. Возможно, что это связано с экранирующей ролью платформенного чехла, насыщенного силлами траппов, или с другими причинами.

Вторая кольцевая структура — Арга-Салинская (диаметр около 200 км, координаты центра: $67^{\circ}30'$ с.ш. и $112^{\circ}12'$ в.д.). Она расположена к юго-востоку от Анабарского щита на площади сплошного

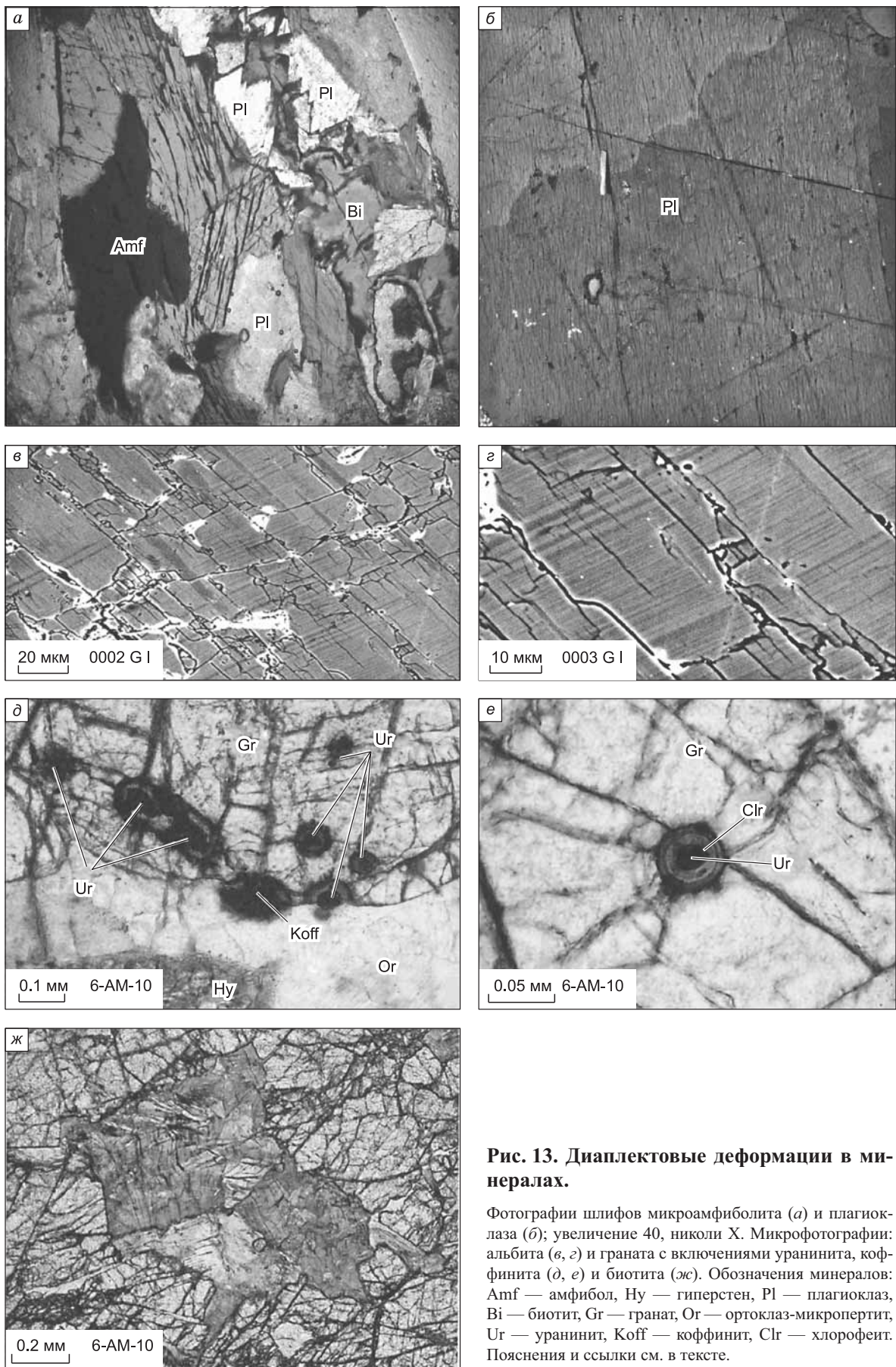


Рис. 13. Диаплектовые деформации в минералах.

Фотографии шлифов микроамфиболита (а) и плагиоклаза (б); увеличение 40, николи X. Микрофотографии: альбита (в, з) и граната с включениями уранинита, коффинита (д, е) и биотита (ж). Обозначения минералов: Amf — амфибол, Hy — гиперстен, Pl — плагиоклаз, Bi — биотит, Gr — гранат, Or — ортоклаз-микрпертит, Ur — уранинит, Koff — коффинит, Clr — хлорофейт. Пояснения и ссылки см. в тексте.

развития платформенного чехла (см. рис. 1). На космических снимках не дешифрируется, но хорошо выделяется благодаря кольцевой зональности аномального магнитного поля на фоне его региональной полосовой структуры. Кроме того, ее гравитационное поле аналогично гравитационному полю ККС (см. рис. 7, 8). Такое кустовое распределение кольцевых структур, если они имеют один возраст и одинаковое происхождение, — явление неслучайное: оно описано для парных систем ударных кратеров на Луне или кратерных полей на Земле, которые связывают с крупными астероидами, легко преодолевшими атмосферу и распавшимися на более мелкие фрагменты [Мейсон, Мелсон, 1973; Баренбаум, 2002].

Все вышеизложенное позволяет думать, что 1900 ± 50 млн лет тому назад на севере (в современных координатах) Сибирского кратона произошло масштабное импактное событие — падение одного крупного (распавшегося на два фрагмента) или трех астероидов. Крупный астероид размером 14—20 км и скоростью падения до 20 км/с привел к образованию кратера диаметром 250 км и глубиной порядка 6—7 км с, а также радиально-кольцевой системы разломов, проникающих до мантии (45—50 км).

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ПОСЛЕДСТВИЯ КОТУЙКАНСКОГО И ДРУГИХ ПРЕДПОЛАГАЕМЫХ ИМПАКТНЫХ СОБЫТИЙ

Все вышеперечисленные критерии, позволяющие рассматривать ККС как глубоко эродированный ударный кратер, отражают стандартные признаки импактного события, характерные для структур подобного типа и масштабов. Вместе с тем анализ строения ископаемых кратеров Вредефорт и Садбери показал, что каждая из этих структур отличается и другими особенностями, связанными с импактным событием и последующими процессами, которые продолжались и после удара в течение длительного периода времени, порядка 30 млн лет [Turtle et al., 2003]. Неповторимым в этом отношении является купол Вредефорт с гранулитогнейсовым ядром диаметром 50 км, отличающимся отсутствием ударной трещиноватости, которая должна была сохраниться даже в случае выдвигания после удара этого ядра с

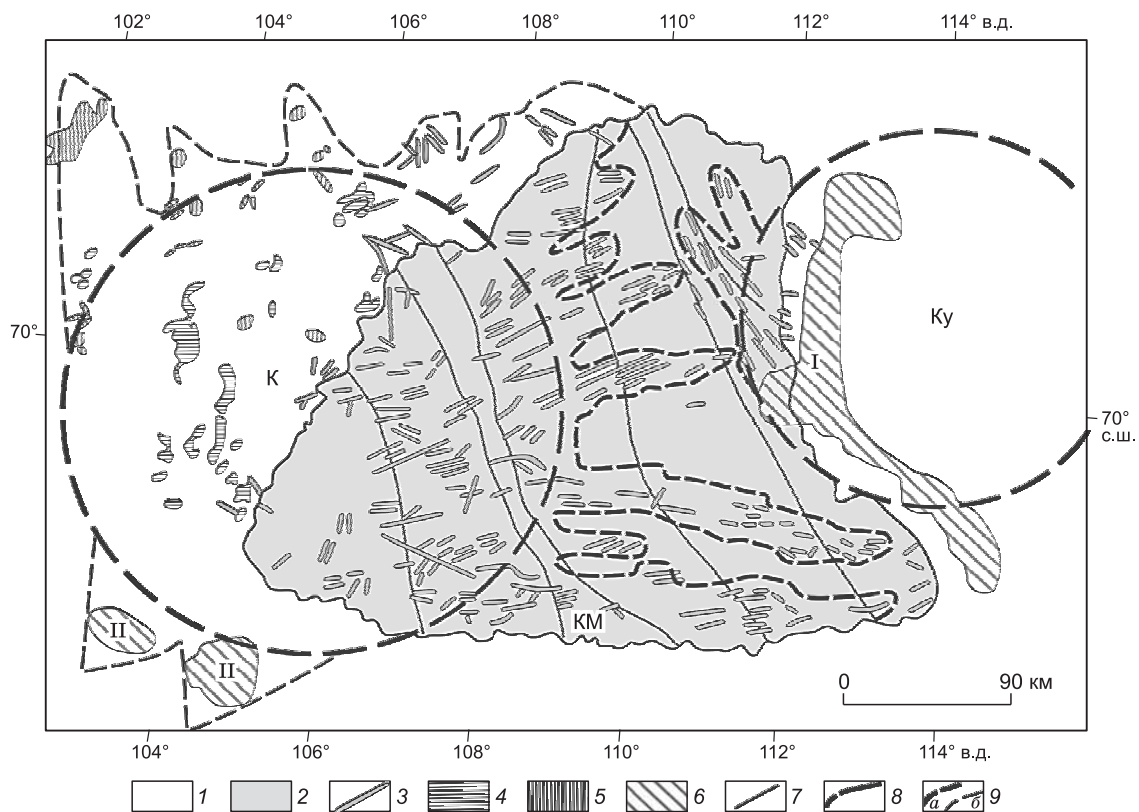


Рис. 14. Положение Котуйканской и Куонамской кольцевых структур и полихронных магматических комплексов (по [Геологическая..., 2000]) в районе Анабарского щита и прилегающей территории.

1, 2 — нерасчлененные образования: 1 — платформенного чехла и 2 — Анабарского щита; 3 — дайки долеритов мезопротерозоя; 4 — силлы габбро-диабазов триаса; 5 — ультраосновные щелочные интрузивы триаса; 6 — поля кимберлитов: триасово-юрских (I) и девонско-каменноугольных (II); 7 — древние зоны разломов: КМ — Котуйкан-Моонхолинская зона; 8 — границы Котуйканской (К) и Куонамской (Ку) кольцевых структур и 9 — ареалы и зоны повышенной магматической проницаемости (а — установленные, б — предполагаемые, скрытые под платформенным чехлом).

уровня средней коры; считают, что эти трещины были уничтожены в ходе постимпактного «термального смягчения» или переплавления [Turtle et al., 2003]. Кроме того, в пределах купола Вредефорт развиты базитовые гранофировые дайки, расплав которых возник в результате удара астероида. Дайки, контролируемые кольцевыми и радиальными разломами, а также гранофировые граниты также непосредственно связаны с ударом [Grieve, Therriault, 2000; Lana et al., 2003, 2003a].

К ближайшим по времени последствиям импактного события в структуре Садбери относится формирование рудоносного (сульфидные медно-никелевые и платинометаллические руды) расслоенного норит-габбро-диорит-гранофирового магматического комплекса Садбери (МКС), слагающего эллиптический массив (27×60 км) мощностью 2.5 км, который сопровождается боковыми — офсетными рудоносными дайками; последние трассируют кольцевой и часть радиальных разломов импактной структуры. Детальные изотопно-геохимические исследования показали, что МКС и его руды образовались из импактного расплава за счет корового источника [Grieve, Therriault, 2000; Налдретт, 2003; Lightfoot, Zotov, 2005].

Обращаясь к Котуйканской структуре, отметим, что к числу геологических проявлений, связанных с импактным событием, можно отнести Котуйканский и Маганский морфоструктурные купола с анортозитами. Анортозиты формировались в условиях гранулитовой фации 2.55 млрд лет назад в нижней коре. Возраст их метаморфизма в амфиболитовой фации 1970 млн лет [Суханов, 1984; Розен и др., 2000] совпадает со временем импактного события. По всей видимости, выжимание «анортозитовой каши» в верхние горизонты коры и их метаморфизм происходили после шокового дробления субстрата, вызванного ударом крупного астероида. Очевидно, внедрение анортозитов можно связать с действием плюмов, вызванных импактным событием, т.е. эти анортозиты, можно сопоставить с автономными анортозитами, возраст которых, правда, несколько выше 2.6—2.9 млрд лет. В это время (2.5—2.2 млрд лет) Сибирская платформа входила в состав архейского суперконтинента Кенорленд (Kenorlanda) и находилась в «горячем» субэкваториальном поясе мантийных плюмов ранней Земли [Глуховский и др., 1994]. Высокоэнергетичный импактный процесс привел к глубоко проникающему дроблению коры и мантии, что впоследствии предопределило и пространственное распределение мезопротерозойского (1730—1503 млн лет) [Эрнст и др., 2008] радиального дайкового роя долеритов в пределах щита, которые частично контролируются разломами, связанными и с Куонамской кольцевой структурой (рис. 14). Внедрение этого роя, судя по возрасту даек, было связано с началом распада суперконтинента Кенорленд (2.0—1.8 млн лет), но еще во время нахождения его в субэкваториальном «горячем поясе» мантийных плюмов. Как видно (см. рис. 4), центр дайкового роя совпадает с центром ККС. Во внутренней области ККС и в зоне ее геодинамического влияния располагаются изверженные породы мантийного происхождения.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полученные результаты по Анабарскому щиту свидетельствуют о нахождении на щите крупной Котуйканской астроблемы, с которой связаны дополнительные, очевидно, одновременные с ней импакты.

Наличие Котуйканской крупной астропроблемы, возможное присутствие в районе Анабарского щита других импактных структур, а также присутствие на Земле других ископаемых кратеров, таких как Вредефорт (Африка) и Садбери (Канада), подтверждают реальность массивированной бомбардировки Земли в раннем протерозое около 2000 млн лет, а их прогнозируемое количество от 100 до 200 [Гуревич, 1983; Хаин, Короновский, 2007; и др.]. В связи с этим возрастает роль суммарного ударного процесса как «спускового крючка» на ход тектонического развития ранней Земли.

Следует заметить, что одновременно с импактными событиями на Земле в интервале 1.9—1.8 млрд лет прослеживается появление базит-ультрабазитовых интрузий в Канаде (Садбери) и куманьенского комплекса на Алданском щите [Гурьянов и др., 2009], с которыми связана Cu-Ni минерализация с повышенными содержаниями Pt группы. Как известно, такой тип базит-ультраосновных интрузий с Cu-Ni с Pt минерализацией характерен для плюма, разбившего Родинию — барбитайский комплекс Восточного Саяна, а также никеленосные с Pt интрузии Сибири (Норильский район), связанные с плюмом, разбившим Пангею. Таким образом, интрузии с Cu-Ni с Pt минерализацией характерны для плюмов, разбивающих суперконтиненты. Таким образом, оценивая имеющиеся данные, можно говорить об одновременном проявлении крупных импактных событий в Сибири, и в других регионах (Африка, Канада), так и расколом первого установленного на Земле суперконтинента Кенорленд, глубинным мантийным суперплюмом. Наличие суперконтинентов и суперплюмов, разбивающих эти суперконтиненты в истории Земли является лучшим доказательством связи тектоники плит с тектоникой плюмов (глубинной геодинамикой) [Кузьмин и др., 2011]. Следует также заметить, что проявление процессов «современного стиля тектоники плит на Земле» приходится на время порядка 2000—2500 млн лет назад [Хаин, 2003], именно в это время сформировался первый суперконтинент. Очевидно, в настоящее время необходимо рассмотреть вопросы глобальных процессов в истории Земли, связанных как с космическими импакт-

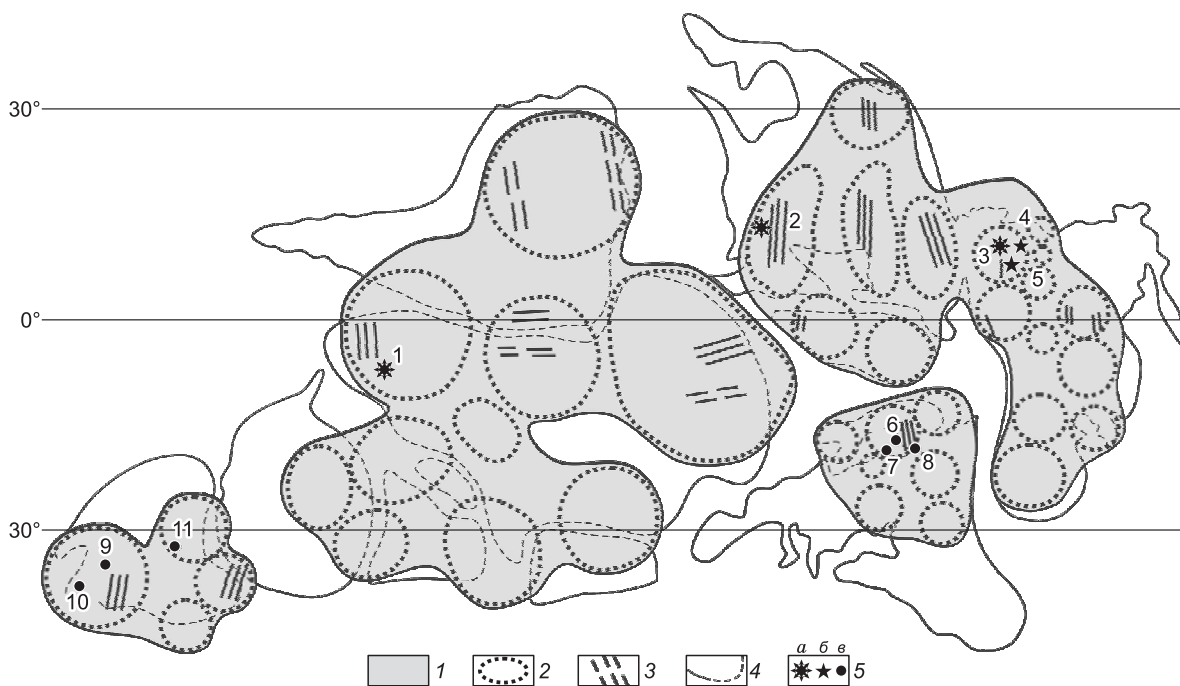


Рис. 15. Гипотетическая реконструкция эуархейского суперконтинента с выделением мест положения палеопротерозойских астроблем.

По материалам [Гуревич, 1983; Михайлов и др., 1986; Саврасов, 1990; Глуховский, 1990; Morgan et al., 1997; Диденко и др., 2005а,б; Метелкин и др., 2005; Ярмолук и др., 2005; Павлов, 2006; Водовозов и др., 2007; Веселовский и др., 2009; и др.]

1 — раннедокембрийские кратоны; 2 — сиалические ядра — нуклеары; 3 — архейские зеленокаменные пояса; 4 — границы современных континентов; 5 — палеопротерозойские астроблемы: а — крупные установленные, б — то же, предполагаемые, в — прочие. Наименование импактных структур: 1 — Вредефорт, 2 — Садбери, 3 — Котуйканская, 4 — Куонамская, 5 — Арга-Салинская, 6 — Кеурусселка, 7 — Паасселка, 8 — Суавъярви, 9 — Шумейкер, 10 — Яррабубба, 11 — Амелия-Крик.

ными, так и с процессами тектоники плит и глубинной геодинамикой (тектоникой плюмов), т.е. с земными и космическими.

Первый земной фактор определяет субэкваториальное положение Сибирского кратона и всего, очевидно, первого суперконтинента (Кенорленд) в пределах так называемого «горячего пояса» ранней Земли [Глуховский и др., 1994] между «критическими широтами» $\pm 35^\circ$ (рис. 15). Его формирование происходило под действием как процессов тектоники плит, так и, возможно, центробежных сил Земли, скорость осевого вращения которой в раннем докембрии во много раз превышала современную [Binder, 1982; Монин и др., 1987; Авсюк, 1996; Хаин, 2000; 2003; Хаин, Короновский, 2007]. Длительное пребывание этого суперконтинента в зоне экватора подтверждается данными современных палеомагнитных исследований и некоторыми палинспастическими реконструкциями [Гуревич, 1983; Саврасов, 1990; Pesonen et al., 2003; Диденко и др., 2005а,б; Метелкин и др., 2005; Веселовский и др., 2009; и др.]. В частности долговременное расположение в высоких широтах континентов в период от 2.45 до 1.77 млрд лет на основании ревизии имеющихся палеомагнитных данных показал Л. Песонен с соавторами [Pesonen et al., 2003].

Второй фактор связан с тем, что вся энергетическая мощь массивированных астероидных ударов в течение всех докембрийских импактных фаз пришлась на протоконтинентальную кору. Это могло привести к импакт-триггерному возбуждению мантии и соответствующим эндогенным процессам, не обязательно в точке удара, т.е. к порождению суперплюмов, поднимающихся, возможно, от слоя D". Следует также учесть, что при уменьшении скорости осевого вращения Земли и отходе Луны [Авсюк, 1996], в субэкваториальной зоне господствовал режим сжатия [Глуховский, 2009].

Следует заметить, эмпирическая кривая темпа удаления Луны от Земли или изменение момента вращения всей системы с единым бариецентром имеет ступенчатый вид [Binder, 1982; Жарков, 1983]. При этом первое заметное уменьшение скорости удаления Луны от Земли произошло в интервале 4.0—3.0 млрд лет, что совпадает с архейской импактной фазой. В дальнейшем, очевидно, 2.5 млрд лет произошло удаление Луны [Авсюк, 1996] и уменьшение скорости осевого вращения Земли в промежутке

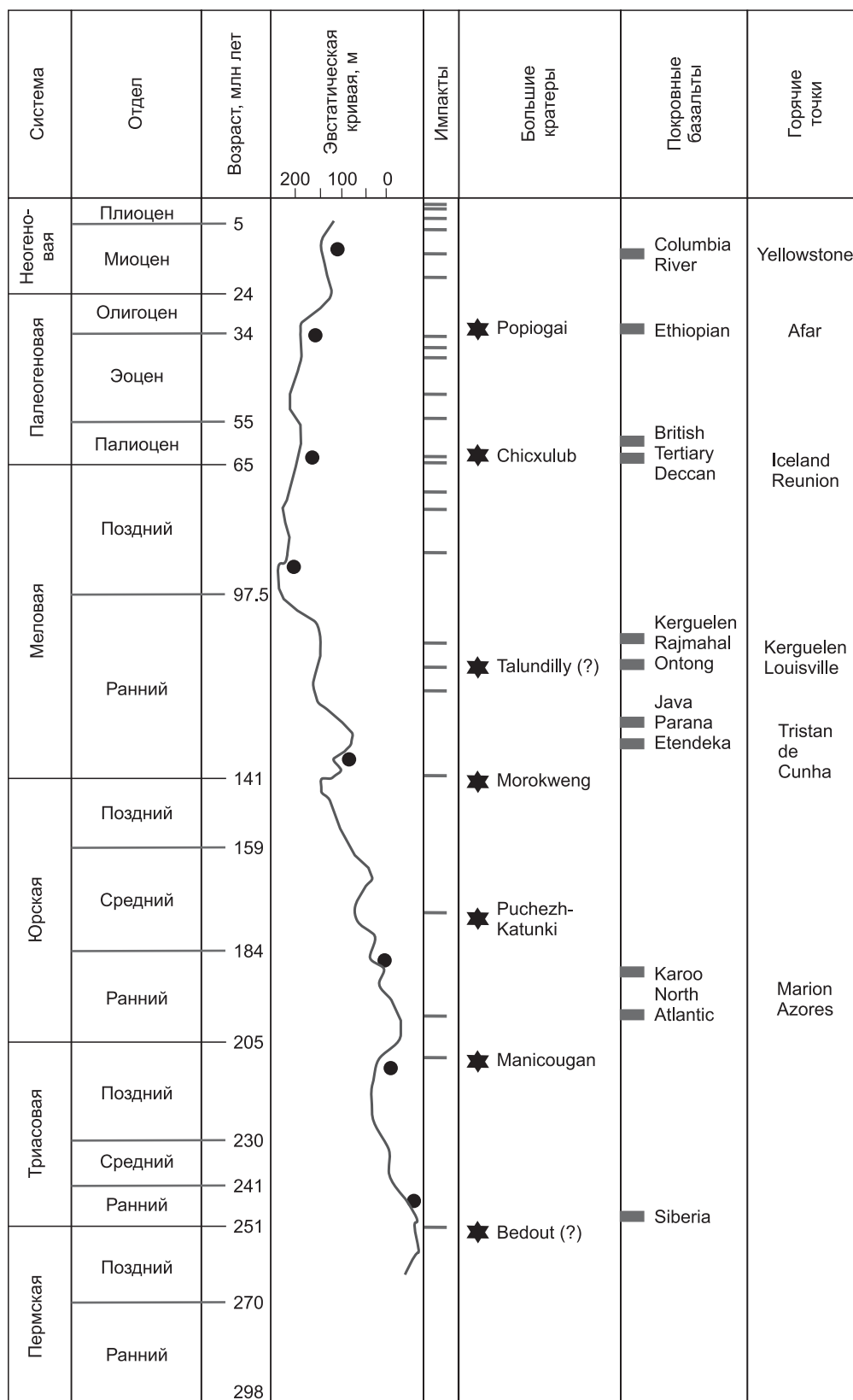


Рис. 16. Корреляция между мегаимпактами, горячими точками, покровными базальтами, изменения эвстатического уровня моря между пермским и неогеновыми периодами, по [Pirajno, 2001].

2.0—1.0 млрд лет, что совпадает с палеопротерозойской импактной фазой: временем формирования и распада суперконтинента Кенорленд (2100—1800 млн лет).

Возможно, в дальнейшем различные геологические процессы, а также импактные события [Монин и др., 1987; Шило, Вошилов, 1989; Глуховский и др., 1994; Авсюк, 1996; Хаин, 2003; Морозов, 2004; Диденко и др., 2005, 2005а; Хаин, Короновский, 2007; Хаин, Полетаев, 2007; Сазонова, 2008; Глуховский, 2009] могли предопределить начало распада существовавшего до этого (2.1—1.8 млрд лет) суперконтинента Кенорленд [Кузьмин и др., 2011].

Таким образом, устанавливается связь между «нелинейным» ходом тектонической эволюции Земли в ее ранней (архей-протерозойской) стадии развития, который зависит, очевидно, не только от солнечно-лунных приливных событий, но и от импактных событий, вызывающих глубокие мантийные потоки в виде суперплюмов. Кроме того, в это же время благодаря началу действий «современного стиля» тектоники литосферных плит происходит формирование первого суперконтинента, который был разбит суперплюмом, формирование которого было определено действием импактных ударов на континентальные массы «горячего поля» Земли. В дальнейшем формирование и раскол суперконтинентов происходил в рамках эволюционного развития Земли [Кузьмин и др., 2011]. Однако крупные импактные события, очевидно, вызывали определенные геологические события в истории Земли.

В этом отношении представляет большой интерес приведенная в работе [Pirajno, 2001] корреляция ряда крупных импактных событий в мезозой-кайнозойское время с изменениями покровных базальтов (рис. 16). Как видим, крупные импактные события часто коррелируются по возрасту с формированием крупных изверженных провинций, представленных покровными базальтами. Однако следует заметить, что есть провинции, никак не связанные с импактными событиями, а также то, что проявление на поверхности Земли излияний покровных базальтов и падение крупных метеоритов происходит в удалении друг от друга в районе земного шара. Очевидно, вопрос о связи импактов с геологическими событиями в истории Земли следует детально исследовать в будущем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволяют говорить, что получены следующие важные выводы.

Впервые на территории России (Анабарский щит) выделена Котуйканская кольцевая структура, которую по дистанционным космогеологическим, тектоническим, геофизическим, структурно-вещественным, изотопно-геохронологическим критериям можно идентифицировать как крупную палеопротерозойскую астроблему Земли, сравнимую с такими импактными структурами, как Вредефорт и Садбери.

Кроме того, в пределах Сибирского кратона выявлены косвенные признаки еще двух крупных структур подобного генезиса: Куонамской и Арга-Салинской. Тем самым показана перспективность обнаружения ископаемых астроблем на выступах фундамента других древних платформ и под их чехлами, что гармонирует с предсказаниями многих ученых о массивированной бомбардировке поверхности Земли в докембрии.

Важно отметить, ко времени интенсивной бомбардировки (~2000 млн лет) на Земле сформировались процессы, связанные с тектоникой плит современного стиля, по В.Е. Хаину [Хаин, 2003], которые, очевидно, были ответственны за формирование первого суперконтинента (Кенорленд) в истории Земли.

Положение первого в истории Земли суперконтинента в зоне экватора и закономерное массивированное падение крупных астероидов в эту зону позволяет связывать возрастную активность импакт-триггерного плюмового магматизма, ареального метаморфизма и другие эндогенные глобальные процессы палеопротерозойского термотектогенеза с высокоэнергетическими ударами космических тел о поверхность планеты.

Таким образом, удары космических тел о поверхность планеты определили высокую активность импакт-триггерного плюмового магматизма, которая определила появление суперплюма, разбившего суперконтинент Кенорленд и появление на Земле базальт-ультраосновных массивов, несущих Cu-Ni-Pt минерализацию. Этот суперплюм, поднявшийся с низов нижней мантии (слоя D'') во многом был связан, очевидно, с ударным характером массовой бомбардировки Земли в период около 2 млрд лет. В дальнейшем, скорее всего, появление последующих суперконтинентов и их распад был связан с закономерным развитием внутрипланетных глубинных геологических процессов. Фанерозойские импакты могли, конечно, иметь влияние на отдельные региональные геологические явления, но не определяли глобальные закономерности развития Земли в целом.

Можно думать, что масштабные импактные события в докембрии оказывали существенное влияние на дискретный и необратимый ход тектонической эволюции ранней Земли. Такие радикальные отклонения от последовательного характера ее геологического развития укладываются в концепцию нелинейной геодинамики, движущей силой которой являлись различные внутрипланетные и внепланетные факторы, которые уже нельзя игнорировать, на что указывал В.Е. Хаин [Хаин, 2003].

Работа выполнена при поддержке интеграционного проекта СО РАН № 87.

ЛИТЕРАТУРА

- Авсюк Ю.Н.** Приливные силы и природные процессы. М., ОИФЗ РАН, 1996, 188 с.
- Баренбаум А.А.** Галактика, Солнечная система, Земля. Соподчиненные процессы и эволюция. М., ГЕОС, 2002, 394 с.
- Веселовский Д.В., Павлов В.Э., Петров П.Ю.** Новые палеомагнитные данные по Анабарскому поднятию и Учуро-Майскому району и их значение для палеогеографической корреляции рифея Сибирской платформы // *Физика Земли*, 2009, № 7, с. 3—24.
- Водовозов В.Ю., Диденко А.Н., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Донская Т.В.** Результаты палеомагнитных исследований раннепротерозойских образований Байкальского выступа Сибирского кратона // *Физика Земли*, 2007, № 10, с. 60—72.
- Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий масштаба 1 : 500 000 /** Ред. Н.С. Малич. СПб., ВСЕГЕИ, 2000.
- Глуховский М.З.** Геологическая эволюция фундаментов древних платформ (нуклеарная концепция). М., Наука, 1990, 215 с.
- Глуховский М.З.** Палеопротерозойский термотектогенез — ротационно-плюмовая модель Алданского щита // *Геотектоника*, 2009, № 3, с. 57—78.
- Глуховский М.З., Кузьмин М.И.** Геохимия палеопротерозойских псевдотахилитов Анабарского щита и механизм их образования // *Докл. РАН*, 2010, т. 431, № 5, с. 662—667.
- Глуховский М.З., Моралев В.М., Кузьмин М.И.** Горячий пояс ранней Земли и его эволюция // *Геотектоника*, 1994, №6, с. 3—15.
- Глуховский М.З., Кузьмин М.И., Баженова Г.И., Баянова Т.В., Елизаров Д.В., Серов П.А.** Sm-Nd- и Rb-Sr-возраст и возможная природа псевдотахилитов Анабарского щита // *Докл. РАН*, 2009, т. 425, № 4, с. 513—518.
- Гравиметрическая карта России масштаба 1:5000000 (редукция Буге) /** Под ред. О.В. Петрова, А.Ф. Морозова, А.В. Липилина, В.И. Колесникова, Т.П. Литвиновой, Ф.В. Мясникова, Ю.М. Эрничера, В.Д. Каминского // СПб., Изд-во МПР РФ, ВСЕГЕИ, ВНИИГеофизика, 2004.
- Гуревич Е.Л.** Палеомагнитные исследования докембрийских отложений севера Сибирской платформы // *Палеомагнетизм верхнего докембрия СССР*. Л., Изд-во ВНИГРИ, 1983, с. 39—51.
- Гуров Е.П., Гурова Е.П.** Геологическое строение и вещественный состав пород импактных структур. Киев, Наук. думка, 1991, 160 с.
- Гурьянов В.А., Приходько В.С., Пересторонин А.Н., Петухова Л.А., Потоцкий Ю.П., Соболев Л.П.** Новый тип медно-никелевых месторождений юго-востока Алдано-Станового щита // *Докл. РАН*, 2009, т. 425, № 4, с. 505—508.
- Диденко А.Н., Водовозов В.Ю., Гладкочуб Д.П.** Сибирский кратон в раннем протерозое: новые палеомагнитные и изотопно-геохронологические данные // *Тектоника земной коры и мантии. Тектонические закономерности размещения полезных ископаемых (Матер. XXXVIII тектонического совещания)*. Т. 1. М., ГЕОС, 2005а, с. 205—209.
- Диденко А.Н., Водовозов В.Ю., Козаков И.К., Бибикина Е.В.** Палеомагнитное и геохронологическое изучение постколлизийных раннепротерозойских гранитов юга Сибирской платформы: методические и геодинамические аспекты // *Физика Земли*, 2005б, № 2, с. 66—83.
- Жарков В.Н.** Внутреннее строение Земли. М., Наука, 1983, 416 с.
- Карта аномального магнитного поля (ΔT) России, сопредельных стран (в границах бывшего СССР) и прилегающих территорий масштаба 1:5000000 /** Ред. Т.П. Литвинова. СПб., Изд-во МПР РФ, ФГУП «ВСЕГЕИ», 2000.
- Катастрофические воздействия космических тел /** Под ред. В.В. Адушкина, И.В. Немчинова. М., ИКЦ «Академкнига», 2005, 310 с.
- Костюченко С.Л.** Структура коры и глубинные механизмы формирования приарктических осадочных бассейнов Сибири // *Региональная геология и металлогения*, 2000, № 10, с. 125—135.
- Кузьмин М.И., Ярмолюк В.В., Кравчинский В.А.** Фанерозойский внутриплитный магматизм Северной Евразии: абсолютные палеогеографические реконструкции Африканской низкоскоростной мантийной провинции // *Геотектоника*, 2011, № 6, с. 3—23.
- Ларичев А.И., Машак М.С., Старосельцев К.В., Капитонов И.Н., Адамская Е.В., Сергеев С.А.** Уранинит и коффеинит в гранулитах Анабарского щита // *Региональная геология и металлогения*, 2008, № 34, с. 92—102.
- Лутц Б.Г., Оксман В.С.** Глубокоэродированные зоны разломов Анабарского щита. М., Наука, 1990, 260 с.

- Марков М.С., Федоровский С.В.** К проблеме геодинамики ранней Земли: аспекты сравнительной планетологии и раннего докембрия // Геотектоника, 1986, № 6, с. 21—39.
- Мащак М.С., Орлова Ж.В.** Проявление ударных деформаций в нижнепротерозойских брекчиях района озера Суавъярви (Центральная Карелия) // Метеоритика, 1986, вып. 45, с. 137—143.
- Мейсон Б., Мелсон У.Б.** Лунные породы. М., Мир, 1973, 164 с.
- Метелкин Д.В., Верниковский В.А., Казанский А.Ю., Белоносов И.В.** Сибирский кратон в структуре суперконтинента Родиния: анализ палеомагнитных данных // Докл. РАН, 2005, т. 404, № 3, с. 389—394.
- Михайлов Н.П., Кравченко С.Н., Панских Е.Н.** О палеомагнитной характеристике анортозитовых массивов Дальнего Востока // Тихоокеанская геология, 1986, № 5, с. 50—56.
- Монин А.С., Сорохтин О.Г., Ушаков С.А.** О вкладе лунных приливов в эволюцию Земли // Докл. АН СССР, 1987, т. 239, № 6, с. 1341—1345.
- Морозов Ю.А.** Цикличность кинематических инверсий в подвижных поясах в свете лунно-земных связей // Геотектоника, 2004, № 1, с. 21—50.
- Налдретт А.Дж.** Магматические сульфидные месторождения медно-никелевых и платинометаллических руд // СПб., Изд-во СПбГУ, 2003, 487 с.
- Павлов В.Э.** Место рождения Сибирской платформы // Области активного тектогенеза в современной и древней истории Земли (Материалы XXXIX тектонического совещания). Т. 2. М., ГЕОС, 2006, с. 89—91.
- Розен О.М., Вишневский А.Н., Глуховский М.З., Злобин В.А., Клименко В.Л., Куликов Ю.П., Лазур О.Г., Лутц Б.Г., Потапов С.В., Рачков В.С., Самков В.В., Турченко С.И.** Строение земной коры Анабарского щита. М., Наука, 1986, 198 с.
- Розен О.М., Журавлев Д.З., Суханов М.К., Бибикина Е.В., Злобин В.Л.** Изотопно-геохимические и возрастные характеристики раннепротерозойских террейнов, коллизионных зон и связанных с ними анортозитов на северо-востоке Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2000, т. 41 (2), с. 163—180.
- Ронка Л.Б.** Метеоритный удар и вулканизм // Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 174—183.
- Саврасов Д.И.** Палеомагнитные исследования на кристаллических породах Анабарского щита // Геология и геофизика, 1990, № 1, с. 94—104.
- Садовский М.А.** Естественная кусковатость горной породы // Докл. АН СССР, 1979, т. 247, № 4, с. 829—831.
- Сазонова Л.В.** Результаты столкновения космических тел с Землей: астроблемы и слагающие их породы-импактиты // <http://ises.iem.ac.ru/presentation/sazonova> // 2008.
- Светцов В.В., Шувалов В.В.** Воздействие ударов крупных космических тел на поверхность ранней Земли // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 6, с. 812—814.
- Степанов Л.Л.** Радиогенный возраст полиметаморфических пород Анабарского щита // Раннедокембрийские образования центральной части Арктики и связанные с ними полезные ископаемые. Л., Изд-во ВНИИГА, 1974, с. 76—83.
- Степанюк Л.М.** Уран-свинцовый возраст микроклиновых гранитов Анабарского щита // Докл. АН УССР, 1991, № 10, с. 127—129.
- Суханов М.К.** Анортозитовая ассоциация Анабарского щита // Анортозиты Земли и Луны. М., Наука, 1984, с. 61—85.
- Тетерев А.Л., Немчинов И.В., Рудак Л.В.** Удары крупных планетезималей по ранней Земле // Астрономический вестник, 2004, т. 38, № 1, с. 43—52.
- Фельдман В.И., Грановский Л.Б., Капусткина К.Г., Коротаева Н.Н., Сазонова Л.В., Дабига А.И.** Импактиты. М., Изд-во Моск. ун-та, 1981, 240 с.
- Флоренский К.П., Базилевский А.Т., Иванов Б.А., Яковлев О.И., Фельдман В.И., Грановский Л.В.** Ударные кратеры на Луне и планетах. М., Наука, 1983, 200 с.
- Хаин В.Е.** Крупномасштабная цикличность в тектонической истории Земли и ее возможные причины // Геотектоника, 2000, № 6, с. 3—14.
- Хаин В.Е.** Основные проблемы современной геологии. М., Научный мир, 2003, 345 с.
- Хаин В.Е., Короновский Н.В.** Планета Земля от ядра до ионосферы. М., Изд-во КДУ, 2007, 244 с.
- Хаин В.Е., Полетаев А.И.** Ротационная тектоника: предыстория, современное состояние, перспективы развития // Ротационные процессы в геологии и физике. М., Изд-во КомКнига, 2007, с. 17—38.

- Шорт Н.М.** Ударные процессы в геологии // Взрывные кратеры на Земле и планетах. М., Мир, 1968, с. 30—67.
- Шило Н.А., Вошилов Ю.Я.** Роль земных приливов в тектонической эволюции Земли // Эволюция геологических процессов // Доклады советских геологов на XXVIII МГК. М., Наука, 1989, с. 97—113.
- Эрнст Р.Э., Хейнс Дж.А.Б., Пучков В.Н.** Рекогносцировочное Ar-Ar-датирование протерозойских долеритовых даек и силлов Сибири и на Южном Урале: идентификация новых крупных магматических провинций и использование при реконструкции суперконтинента Нуна (Коламбия) // Материалы XLI тектонического совещания. Т. 1. М., ГЕОС, 2008, с. 492—495.
- Ярмолюк В.В., Коваленко В.И., Сальникова Е.Б., Никифоров А.В., Котов А.Б., Владыкин Н.В.** Позднерифейский рифтогенез и распад Лаврентии: данные геохронологических исследований щелочно-ультраосновных комплексов Сибирской платформы // Докл. РАН, 2005, т. 404, № 3, с. 400—406.
- Abbot D.M., Isley A.E.** Extraterrestrial influences on mantle plume activity // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2002, v. 205, p. 53—62.
- Binder A.B.** The moon: its figure orbital evolution // *Geophys. Res. Lett.*, 1982, v. 9, № 1, p. 33—36.
- Brink M.C., Waanders F.B., Bisschoff A.A.** Vredefort: a model for the anatomy of an astrobleme // *Tectonophysics*, 1997, № 270, p. 83—114.
- Brink M.C., Waanders F.B., Bisschoff A.A.** Evolution of the ringed basin around Vredefort, South Africa // *Meteorit. Planet. Sci.*, 1999, № 34, p. A-19-20.
- Condie K.C.** Continental growth during a 1.9 Ga superplume event // *J. Geodynam.*, 2002, v. 34, p. 249—264.
- Condie K.C., Des Marais D.I., Abbot D.M.** Precambrian superplumes and supercontinents: a record in black shales, carbon isotopes, and paleoclimates // *Precamb. Res.*, 2001, v. 106, № 2—4, p. 239—266.
- Glikson A., Vickers J.** The 3.26—3.24 Ga Barberton asteroid impact cluster: tests of tectonic and magmatic consequences, Pilbara Craton, Western Australia // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2006, v. 241, p. 11—20.
- Grieve R.A.F.** Terrestrial impact structures // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1987, v. 15, p. 245—270.
- Grieve R.A.F., Therriault A.** Vredefort, Sudbery, Chicxulub: three of a kind // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2000, v. 28, p. 305—338.
- Haines G.V.** Magsat vertical field anomalies above 40° N from spherical cap harmonic analysis // *J. Geophys. Res.*, 1985, v. 90, № B3, p. 2593—2598.
- Kyte F.T., Shukolyukov A., Lugmair G.W., Lowe D.R., Byerly G.R.** Early Archean spherule beds: chromium isotopes confirm origin through projectiles of carbonaceous chondrite type // *Geology*, 2003, v. 31, № 3, p. 283—286.
- Koeberl C.** Impact processes on early Earth // *Elements*, 2006, v. 2, № 4, p. 211—216.
- Kumazawa M., Yoshida S., Ito T., Yoshioka H.** Archean-Proterozoic boundary interpreted as a catastrophic collapse of the stable density stratification in the core // *J. Geol. Soc. Japan*, 1994, v. 100, № 1, p. 50—59.
- Lana C., Gibson R.L., Kisters A.F.M., Reimold W.U.** Archean crustal structure of the Kaapvaal craton, South Africa — evidence from the Vredefort dome // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, v. 200, p. 133—144.
- Lana C., Gibson R.L., Reimold W.U.** Impact tectonics in the core of the Vredefort dome, South Africa: implications for central uplift formation in very large impact structures // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2003a, v. 38, № 7, p. 1093—1107.
- Lana C., Reimold W.U., Gibson R.L., Koeberl C., Siegesmund S.** Nature of the Archean midcrust in the core of the Vredefort Dome central Kaapvaal craton, South Africa // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2004, v. 68, № 3, p. 623—642.
- Lighfoot P.C., Zotov I.A.** Geology and geochemistry of the Sudbery Igneous Complex: origin of nickel sulfide mineralization associated with an impact melt sheet // *Geol. Ore Deposits*, 2005, v. 47, № 5, p. 349—381.
- Melosh H.J.** Multi-ringed revelation // *Nature*, 1997, v. 390, № 6659, p. 439—440.
- Melosh H.J.** The mechanics of pseudotachylite formation in impact events. Submitted to the Proceedings of the June 2002 Mora, Sweden Impact Conf. 28 April 2003. <http://www.lpl.arizona.edu/~imelosh/pseudotachylites.pdf>. 30 p.
- Morgan J.V., Warner M.R., Brittan J., Buffer R., Camargo A., Christenson G., Denton P., Hildebrand A., Hobbs R., Macintyre H., Mackenzie G., Maguire P., Marin L., Nakamura Y., Pilkington M., Sharpon V., Shyder D., Soares G., Trejo A.** Size and morphology of the Chicxulub impact crater // *Nature*, 1997, v. 390, № 6659, p. 472—476.
- Morgan J.V., Warner M.R., Collins, Melosh H.J., Christenson G.L.** Peak-ring formation in large impact crater: geophysical constraints from Chicxulub // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2000, v. 183, p. 347—354.

Pesonen L.J., Elming S.-Å., Mertonen S., Pisarevsky S., D'Agella-Eilho M.S., Meert J.G., Schmidt P.W., Abrahamsen N., Byling G. Paleomagnetic configuration of continents during Proterozoic // *Tectonophysics*, 2003, № 375, p. 289—324.

Pirajno F. Ore deposits and mantle plumes. Dordrecht, Boston, London, Kluwer Academic Pub., 2001, v. XX, 556 p.

Reimold W.U., Koeberl C., Johnson S., McDonald J. Early Archean spherule beds in the Barberton mountain land, South Africa: impact or terrestrial origin? // *Impact Early Earth*, 2000, v. 91, p. 117—180.

Rondot J. Pseudotachylite and mylonitite. Abstr. program 52th Ann. Meet. Meteorit. Soc. Vienna. July 31 — August 4, 1989. Houston (Tex.) 1989, p. 209.

Shneider H. Shock-induced mechanical deformation in biotites from crystal line rocks of the Ries crater (Southern Germany) // *Contr. Miner. Petrol.*, 1972, v. 37, № 1, p. 75—85.

The Earth impact database // <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>. 2007.

Turtle E.P., Pierazzo E. Constrains on the size of the Vredefort impact crater from numerical modeling // *Meteorit. Planet. Sci.*, 1998, v. 33, № 2, p. 483—490.

Turtle E.P., Pierazzo E., O'Brien D.P. Numerical modeling of impact heating and cooling of the Vredefort impact structure // *Meteorit. Planet. Sci.*, 2003, v. 38, № 2, p. 293—303.

Valley J.W. Early Earth // *Elements*, 2006, v. 2, № 4, p. 201—204.

*Рекомендована к печати 23 марта 2012 г.
В.А. Верниковским*

*Поступила в редакцию
5 марта 2012 г.*