

На рис. 2 приведен пример прогнозирования землетрясения по импульсам акустической эмиссии, полученных по превышению импульсов над огибающей сигналов с учетом фонового распределения импульсов.

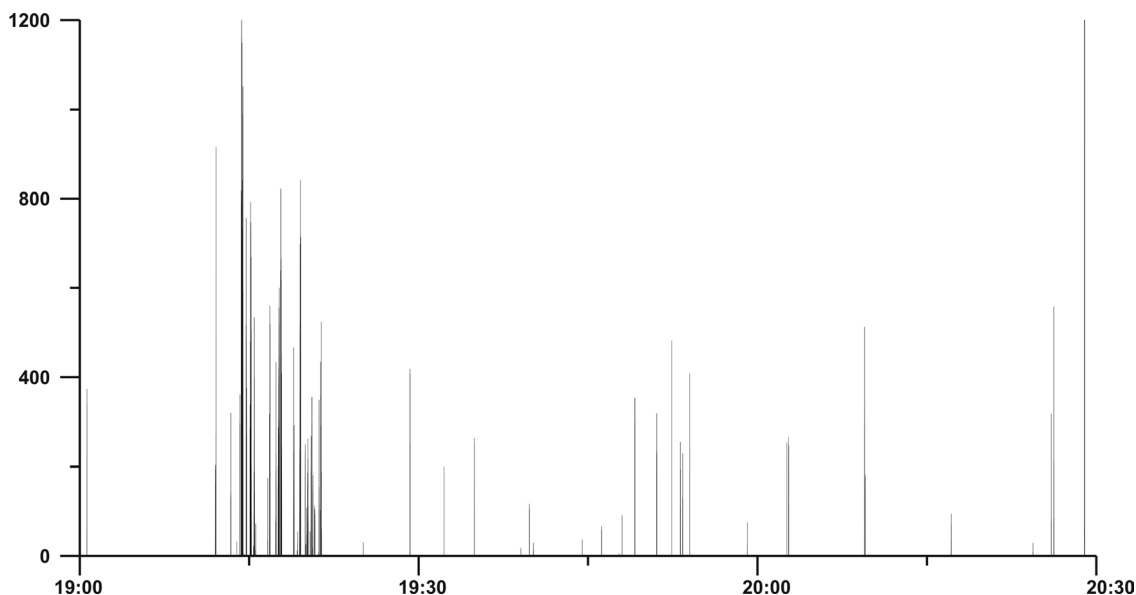


Рис. 2. Распределение импульсов акустической эмиссии перед землетрясением 2 ноября 2005 года в 20:11:45

Землетрясения с магнитудой $M=2.6$ произошло в 20:11:45 на расстоянии $R=138.5$ км. Как следует из рисунка 2, серия импульсов наблюдалась за 50–60' в течение около 15 минут. После землетрясения импульсы прекратились. Одиночные импульсы происходили перед землетрясением и после него и были вызваны, по-видимому, микроземлетрясениями, которые происходили начиная с 20:01:00 и были, вероятно, активизированы основным землетрясением.

ГЕОЛОГО-ГЕОФИЗИЧЕСКИЕ СВИДЕТЕЛЬСТВА КРУПНОГО ИМПАКТНОГО СОБЫТИЯ В ПАЛЕОПРОТЕРОЗОЕ НА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЕ (Котуйканская кольцевая структура)

Глуховский М.З.¹, Баженова Г.Н.²

¹Геологический институт РАН, г. Москва, marat@ilran.ru

²Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН, г. Москва

Цель исследования – идентификация крупной (диаметр 250 км) Котуйканской кольцевой структуры на севере Сибирской платформы как реликта ударного кратера, путем решения задач по выявлению мега-, макро- и микроскопических критериев импактного события [7].

К мегаскопическим критериям относят кольцевые структуры, которые видны на космических снимках низкого и среднего разрешения, а также характеристики их аномальных геофизических полей – магнитного и гравитационного.

Котуйканская кольцевая структура (см. рис.), видна на всех без исключения космических снимках, полученных с разных спутников и в разные времена года. Ее больший западный сегмент охватывает область развития платформенного чехла, а восточный занимает западную часть Анабарского щита. Если первый из них отличается темным фототонном, то второй – светлым, что связано с особенностями ландшафта. Так, в пределах платформенной части развита густая лиственная тайга, которая контрастирует с окружающей лесотундрой. На щите – это ортогональная система гидросети с залесенными долинами на преобладающем светлом фоне каменных развалов на склонах и водоразделах. Эти ландшафтные особенности Котуйканской структуры связаны с раздробленностью фундамента, что способствовало выходу глубинного теплового потока и появлению аномального растительного ареала, а также ориентировке гидросети (см. ниже).

Глубинные неоднородности и морфология Котуйканской структуры подчеркиваются кольцевой зональностью магнитных положительных и отрицательных аномалий, особенно в центре структуры. Общее гравитационное поле структуры (в редукции Буге) характеризуется дефицитной плотностью, тогда как в ее центре выделяется изометричный (до 80 км в диаметре) ареал избыточной плотности.

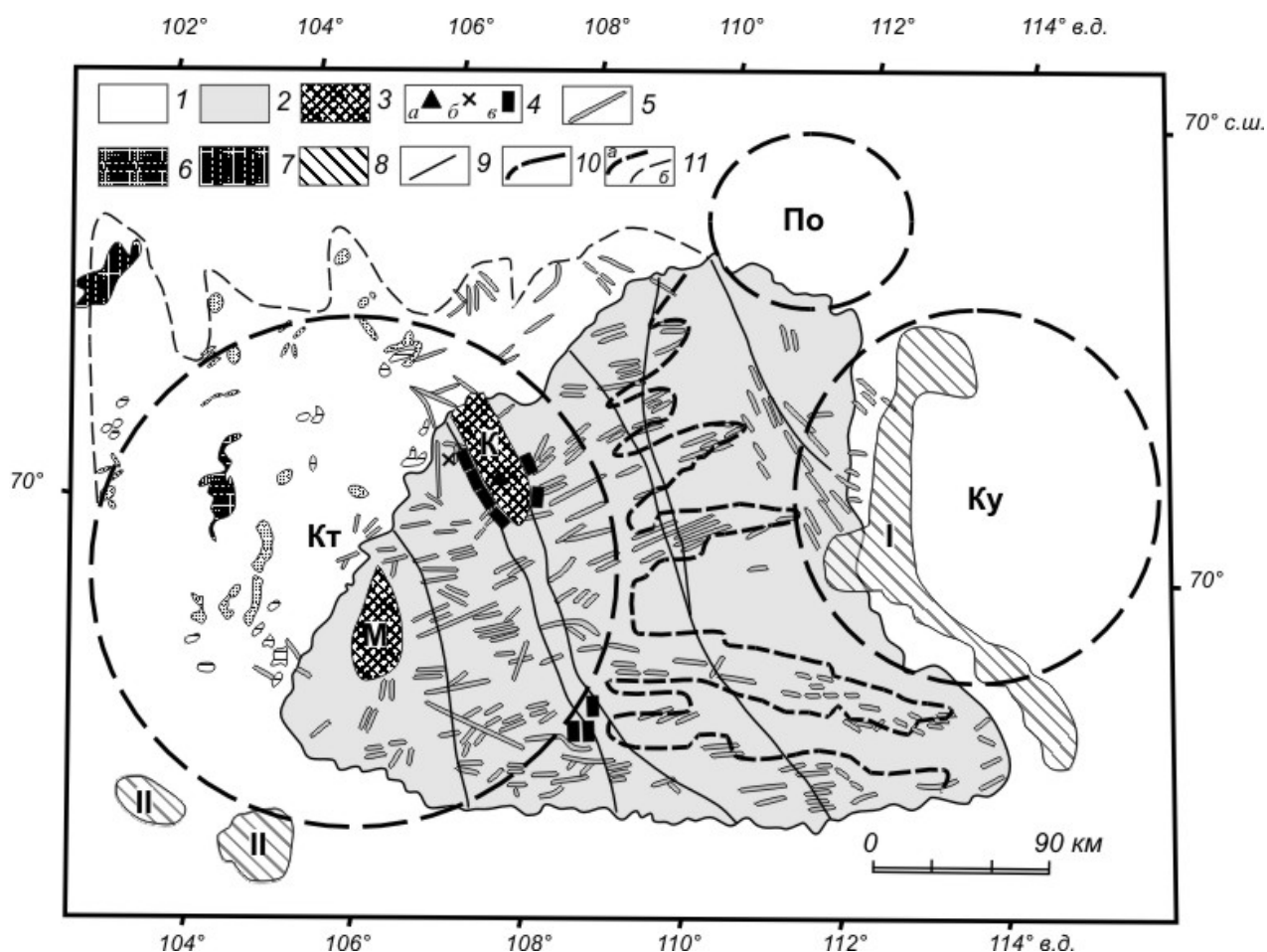


Схема размещения кольцевых структур Анабарского щита и прилегающей территории, мест находок признаков импактного события и проявлений докембрийского и фанерозойского магматизма (составлена по данным дистанционного зондирования, наземных и аэровизуальных наблюдений и литературных источников [1, 3]).

1, 2 – нерасчлененные образования: 1 – платформенного чехла и 2 – Анабарского щита; 3 – купольные структуры анортозитов Котуйканской (К) и Маганской (М) групп; 4 – места находок признаков импактного события: а) – конусов разрушения, б) – брекчий, в) – псевдотехилитов и апопсевдотехилитов; 5 – палео- и мезопротерозойские дайки долеритов; 6 – габбро-диабазы раннего триаса; 7 – ультраосновные щелочные интрузивы триаса; 8 – поля кимберлитов - триасово-юрских (I) и девонско-каменноугольных (II); 9 – древние зоны разломов фундамента; 10 – границы кольцевых структур: Котуйканской (Кт), Куанамской (Ку) и Попигайской астроблемы – 36 млн. лет (По); 11 – границы зон трещиноватости высокой плотности: а) – установленные по данным компьютерной обработки линеаментной сети и б) – предполагаемые

Макроскопические признаки импактной природы Котуйканской структуры были выявлены только в пределах Анабарского щита. Это разнопорядковая тектоническая раздробленность фундамента (от блоков до брекчий), конуса разрушения и псевдотехилиты.

Ортогональная блоковая структура видна на космических снимках среднего и высокого разрешения. Блоки ограничены радиальными и дуговыми разломами, которые контролируют развитие системы гидросети соответствующей конфигурации. Геометрия ортогональных блоков не зависит ни от состава субстрата, ни от линейной (северо-западного простирания) полосчатой структуры архейских метаморфических пород. Видимых горизонтальных перемещений блоков также не отмечено. Размеры блоков имеют иерархическую соподчиненность кратную двум. Наименьший размер 0.5×0.5 км, наибольший обозримый – 30×30 км. Особое внимание привлекает то, что дешифрируемые на космических снимках купола с заключенными в них палеопротерозойскими массивами анортозитов Котуйканской и Маганской групп (см. рис.), не несут следов блоковой делимости вмещающей рамы. Это свидетельство формирования анортозитовых куполов и выдвигания анортозитов в верхние горизонты коры после блокового тектогенеза.

Компьютерная обработка линеаментной сети Анабарского щита и прилегающих районов платформы (по величине отношения длины линеаментов к единице площади) показала, что Анабарский сегмент Котуйканской структуры характеризуется трещиноватостью высокой плотности. Поля высокой плотности трещин выступают и за пределы контура Котуйканской структуры в виде протяженных радиальных апофиз (см. рис.).

Брекчии в виде обломков амфиболитов, сцементированных кварц-полевошпатовым материалом, и деформированные конуса разрушения были встречены в долине р. Котуйкан (см. рис.).

Среди псевдотахилитов выделены две разновидности. Первая из них развита в бассейне р. Бол. Куонамка, вблизи с границей Котуйканской структуры. Здесь они слагают маломощные жилы и прожилки (от 1 см до 10 м) как среди бластомилонитов, так и востоку от них, вдоль радиальной зоны трещиноватости. Они состоят из черного стекла, содержат мелкие обломки пород и минералов и по химическому составу близки боковым породам, за счет плавления которых они и произошли [3]. Вторая разновидность – это, апопсевдотахилитовые микробрекчии (определение Л.В.Сазоновой, МГУ), слагающие мощные от первых – до 200 и более метров жилы и дайкоподобные тела вокруг массивов Котуйканской группы (см. рис.). Они состоят из черной пылевидной микрокристаллической основной массы (раскристаллизованное стекло) с округлыми мелкими включениями, полевого шпата и амфибола.

Микроскопические критерии импактного события – это планарные деформаций в породообразующих минералах (PDFs). Главными их признаками является присутствие стрессовых структур со следами плавления (стекла), которые отражают воздействие шокового давления (до 5 ГПа) и температур (до 1673° К) [7, 8]. Исследование обломков в апопсевдотахилитовых брекчиях (Л.В.Сазонова, МГУ), показало наличие в альбите тонкого механического двойникового и двух систем трещин. В округлых зернах полевых шпатов и амфиболов видны ромбовидная микротрещиноватость, а также структуры шокового разрыва. И, наконец, в кварце из эндербитов В.Е. Сонюшкиным (ИЛ РАН) в 1988 г установлены дислокационные структуры, типичные для PDFs, но без расплавной фазы. Все это свидетельствует о том, что рассмотренные минералы испытали сильное динамическое воздействие. Однако отсутствие расплавной фазы не позволяет говорить о классических планарных деформациях в этих минералах.

Как видно (см. рис.), на Анабарском щите вскрывается периферия Котуйканской структуры с кристаллическими породами регрессивно метаморфизованными в амфиболитовой фации. Центральное ядро структуры и ее западный сегмент перекрыты платформенным чехлом. Результаты числового моделирования импактной структуры Вредефорт [7, 8], соизмеримой с Котуйканской, показали, что начальные величины шоковых давлений и температур распределяются зонально как по латерали, так и на глубину. Чем ближе к центру удара, тем выше положение изотерм с $T = 1673-1173^{\circ}\text{K}$ и изобар с $P = 30$ и более ГПа. К периферии кратера изолинии этих показателей постепенно погружаются. На глубине современного эрозионного среза (6-10 км) в радиусе 80 и более км температура опускается до 573°K, а давление – до 2 и менее ГПа. В итоге, такие признаки импактного события как высокобарические минералы (до 10 ГПа), PDFs (до 5 ГПа) и конуса разрушения (до 2 ГПа) концентрируются соответственно в радиусах до 40, 60 и 80 км. Поэтому не исключено, что изометричные геофизические аномалии фундамента в ядре Котуйканской структуры отражают плотностные и петрологические неоднородности коры в ареале максимального шокового метаморфизма и, возможно, погребенного центрального поднятия кратера. Масштабность импактного события, глубина и диаметр кратера зависят от размеров ударника, скорости его падения и характера строения мишени. Так, по модели [4], Котуйканский кратер диаметром 250 км имел глубину 6-8 км и трещиноватость, проникающую до мантии – (45-50 км), которая распространялась по латерали в виде радиальных лучей на десятки километров. Эти параметры структуры соответствуют удару астероида размером 14-20 км, со скоростью падения до 20 км/сек [2, 7, 8].

Таким образом, положение обнаженной части глубоко эродированного кратера на периферии крупной импактной структуры объясняет природу режима ретроградного метаморфизма в условиях амфиболитовой фации, а также редкость находок конусов разрушения и отсутствие минералов с PDFs. Псевдотахилиты имеют более широкое латеральное распространение. Их образование, равно как и блоковое дробление или кусковатость (по М.А. Садовскому) пород мишени, были связаны с землетрясением, вызванным ударом астероида. За пределами шокового центра это сопровождалось малоамплитудным трением стенок трещин и плавлением боковых пород.

Возраст апопсевдотахилитов, определенный по породе Sm-Nd и Rb-Sr изохронными методами (Т.Б. Баянова, П.А. Серов, лаборатория геохронологии и изотопной геохимии ГИ КНЦ РАН) равен, соответственно, 1856 ± 58 и 1936 ± 30 млн. лет. В среднем возраст Котуйканского импактного события, с учетом ошибок определения, оценивается в 1900 млн. лет, а практически отсутствие временного интервала между зарождением псевдотахилитов (Sm-Nd изохрона) и закрытием Rb-Sr изотопной системы (раскристаллизация стекла) говорит об исключительно быстром импактном процессе. Впоследствии Котуйканский кратер был уничтожен в ходе интенсивных процессов эрозии и среза глубиной более чем на 6 км, пронизан роем мафических даек палео- и мезопротерозоя 1730-1503 млн. лет [5], трассирующих систему радиальных трещин (см. рис.) и перекрыт платформенными отложениями рифея (ильинская свита), залегающими на мощной (до 30 м) коре выветривания интенсивно раздробленного архейского фундамента.

Можно думать, что многочисленные проявления полихронного мантийного магматизма в районе Котуйканской структуры, скорее всего, связаны с глубокой, доходящей до мантии, тектонической раздробленностью коры, порожденной ударом крупного астероида. Все они концентрируются в ареале геодинамического влияния структуры и контролируются радиальной системой повышенной трещиноватости и магматической проницаемости. Проведенные исследования не касаются Куанамской кольцевой структуры, которая по характеру отражения на космических снимках, адекватна Котуйканской и контролирует размещение даек и кимберлитовых полей (см. рис.).

Таким образом, по большинству геолого-геофизических признаков Котуйканская кольцевая структура представляет собой след крупного палеопротерозойского ударного кратера, впервые выявленного на территории России. Она стоит в ряду с такими палеопротерозойскими импактными структурами как Вредефорт (Каапваальский кратон, 2023 млн. лет, диаметр 300 км) и Садбери (Канадский щит, 1850 млн. лет, диаметр 250 км) [2, 6-8].

ЛИТЕРАТУРА

1. Геологическая карта Сибирской платформы и прилегающих территорий масштаба 1:1 500 000. 1999 г. Главный редактор Н.С. Малич. С.-П.: ВСЕГЕИ. 2000.
2. Катастрофические воздействия космических тел. /Под ред. В.В.Адушкина и И.В.Немчинова/. Институт динамики геосфер РАН. М.: ИКЦ «Академкнига». 2005. 310 с.
3. Лутц Б.Г., Оксман В.С. Глубокоэродированные зоны разломов Анабарского щита. М.: Наука. 1990. 260 с.
4. Ронка Л.Б. Метеоритный удар и вулканизм. // Взрывные кратеры на Земле и планетах. М.: Мир. 1968. С. 174-183.
5. Эрнст Р.Э., Хейнс Дж.А.Б., Пучков В.Н. и др. Рекогносцировочное Ar-Ar датирование протерозойских долеритовых даек и силлов в Сибири и на Южном Урале: идентификация новых крупных магматических провинций и использование при реконструкции суперконтинента Нуна (Коламбия). // Общие и региональные проблемы тектоники и геодинамики. Матер. XLI Тектонического совещания. Т.1. М.: ГЕОС. 2008. С. 492-495.
6. The Earth Impact Database // <http://www.unb.ca/passc/ImpactDatabase/index.html>
7. Turtle E.P., Pierazzo E. Constraints on the size of the Vredefort impact crater from numerical modeling // Meteorit. Planet. Sci. 1998. V. 33. № 2. P. 483-490.
8. 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.

РУДНЫЕ ФОРМАЦИИ И МЕТАЛЛОГЕНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ КАРЕЛИИ

Голубев А.И., Иващенко В.И., Трофимов Н.Н., Кондрашова Н.И., Лавров О.Б.

Институт геологии Карельского НЦ РАН, г. Петрозаводск, golubev@krc.karelia.ru; ivashche@krc.karelia.ru

Рудноформационный анализ является одним из наиболее эффективных методических подходов при металлогенических исследованиях [3, 4, 6, 7. и др.] и играет важную роль в прогнозе и поисках месторождений полезных ископаемых. И хотя он был зарожден на основе геосинклинальной теории (Ю.А. Билибин, М.Б. Бородаевская, Д.И. Горжевский, В.Н. Козеренко, Р.М. Константинов, А.И. Кривцов, В.А. Кузнецов, В.В. Попов, Д.В. Рундквист, В.И. Смирнов, Г.Н. Щерба, Г.Ф. Яковлев и др.), его научная значимость и востребованность налицо и в рамках, сменивших ее, новых «авангардных» геологических парадигм – рифтогенной, плейттектонической и плюмовой.

Методологической базой рудноформационного анализа является по существу широко применяемый в других отраслях науки системный анализ, предопределяющий в металлогеническом аспекте его главную задачу в выявлении, сравнении и анализе пространственно-временных соотношений и устойчивых связей геологических, метасоматических и рудных формаций в их иерархической соподчиненности (структурированности) с другими разноранговыми компонентами геологических, в том числе, и рудных систем. При рудноформационных исследованиях анализируется последовательный ряд соподчиненных признаков: рудная формация – метасоматическая формация – геологическая формация, в котором для каждой отдельно взятой пары соседних признаков слева, если следовать математической терминологии, располагается функция, а справа – аргумент [7]. Соответственно прогноз рудоносности осуществляется при движении от аргумента к функции. В качестве основного принципа рудноформационного анализа общепризнанным считается принцип соответствия геологических, метасоматических и рудных формаций, что позволяет решать вопросы о генетических связях и этапности образования оруденения, а также устанавливать региональные закономерности его размещения в тесной взаимосвязи с эволюцией тектонических, магматических, метаморфических и других процессов.

Карельский регион по совокупности признаков большинством исследователей подразделяется на три домена, в категориях металлогении соответствующих металлогеническим субпровинциям: Карельской, Свекофенской и Беломорской. В их пределах развито разнообразное оруденение, относящееся к различным рудным формациям, отражающим специфику геологического развития этих доменов и металлогеническое своеобразие эпох рудообразования, с которыми связано их формирование. Существенные различия геологических, структурно-тектонических, геодинамических, формационных, геохронологических и др. особенностей названных субпровинций нашли адекватное отражение и в их металлогении. За основу типизации рудных формаций и металлогенических комплексов взяты наиболее информативные в металлогеническом аспекте детерминационные признаки (табл.). Кроме этого, применялся также критерий масштабности, согласно которому определенная рудная формация выделялась только на основе имеющегося месторождения или высокоперспективного рудопроявления при условии наличия реальных предпосылок для перевода его в ранг месторождения при соответствующем доизучении.