

## О геологическом картографировании импактных структур

Рассмотрены вопросы, связанные с изображением на госгеолкартах древних импактных структур космического происхождения, иногда встречающихся в отдельных регионах. Их диагностика основана на изучении необходимых и достаточных главным образом литолого-петрографических признаков ударного метаморфизма. Выделение различных видов импактитов и импактных брекчий и их ассоциаций в качестве картографируемых единиц базируется на сочетании данных о вещественном составе, структурах и текстурах пород и строении слагаемых ими тел. Импактные структуры показываются и на картах полезных ископаемых, так как в них встречаются залежи различного минерального сырья, иногда весьма крупные.

Ключевые слова: *геокартографирование, импактная структура, астроблема, коптогенные породы, импактиты, импактные брекчи.*

V. L. MASAITIS (VSEGEI)

## Geological map compiling of impact structures

Paper discusses the issues associated with displaying on the State Geological Maps of ancient spaceborne impact structures sometimes encountered in certain regions. Their diagnosis is based on a study of necessary and sufficient, mainly lithologic and petrographic evidence of impact metamorphism. Selection of different types of impactites and impact breccias and their associations as mappable units is based on a combination of data on material composition, structures, and textures of rocks and the structure of bodies they form. Impact structures are shown on maps of minerals, as they contain deposits of various raw materials, sometimes very large ones.

Keywords: *geological mapping, impact structure, astrobleme, coptogenic rocks, impactites, impact breccias.*

**Введение.** Основной объем земной коры составляют различные осадочные, магматические и метаморфические породы, среди которых импактиты и импактные брекчи древних метеоритных кратеров или астроблем, возникших при ударах крупных метеоритов и астероидов, имеют ограниченное распространение и могут рассматриваться как акцессорные. Эти геологические импактные структуры стали достоверно диагностировать лишь в середине прошлого века, их выявление и исследование приобрели широкий размах в 60–80-х годах, почти одновременно с началом исследований космоса с помощью автоматических и пилотируемых аппаратов. Геологическое изучение этих структур имеет сравнительно короткую историю, что, наряду с их редкой встречаемостью на земной поверхности, ограничивает знакомство с ними значительной части практикующих геологов. Такие импактные структуры в отдельных случаях вносят определенный вклад в геологическое строение некоторых регионов, а иногда являются месторождениями различных полезных ископаемых, порой уникальных. Ошибки при опознании импактных структур приводят к серьезному искажению составляемых геологических карт, а также к неверной оценке минерагенического потенциала отдельных территорий.

Принципы и методы выявления импактных структур в настоящее время хорошо разработаны. В их основе лежат физическая теория импактного

кратерообразования [6, 13], а также детальное изучение вещества горных пород, подвергшихся воздействию высоких давлений и температур, превышающих характерные для обычных магматических, метаморфических и тектонических процессов в земной коре и даже под ней [1, 20, 22]. Импактное кратерообразование – фундаментальный геологический процесс, постоянно и неизменно происходящий в космосе и существенно влияющий на формирование облика населяющих его твердых тел [13]. Импактное кратерообразование не ограничивается только возникновением впадины в рельефе, окруженной валом, одновременно происходят существенные структурные нарушения в залегании пород места удара, изменения самих пород – дробление, плавление и испарение, а также образование плаща выбросов из возникшего кратера. Поэтому в широком смысле этот процесс может быть назван коптогенезом (от *греч.* копто – разрушать ударами) по аналогии с осадконакоплением, магматизмом и метаморфизмом [10, 27]. Соответствующие горные породы могут быть названы коптогенными. Выявление необходимых и достаточных признаков, позволяющих надежно диагностировать коптогенные породы импактных структур, оконтуривать и изображать их на геологических картах, требует знания некоторых основ теории импактного кратерообразования, подобно тому как при картографировании ассоциаций осадочных, магматических и метаморфических пород

необходимо владеть основами структурной геологии, тектоники, литостратиграфии, петрографии и петрологии.

Изображение импактных структур и присущих им пород на Госгеолкартах масштабов 1 : 200 000 и 1 : 1 000 000 предусмотрено рядом регламентирующих документов [7, 14, 15]. Краткие данные о картографируемых подразделениях коптогенных пород опубликованы [16, 18], однако значительная часть практических сведений об этих объектах содержится в статьях, помещенных в малодоступных изданиях, подчас многолетней давности.

**Импактные структуры, их диагностика и строение.** Для надежного опознания импактной структуры важными являются литолого-петрографические признаки ударных преобразований пород, четко выделяющие импактиты и импактные брекчии и заключающие их импактные структуры среди других объектов разного происхождения [1, 17, 20]. Иногда в импактных породах геохимическими методами могут быть установлены распыленные остатки вещества ударившего тела [25], однако они требуют специального сопоставления составов различных пород и определения соотношений некоторых показательных элементов (siderофилы, платиноиды). Макроскопически устанавливаемым признаком ударных преобразований служит присутствие особой трещиноватости, вызывающей появление конусов разрушения, которые могут наблюдаться в различных породах [21]. Однако наиболее распространены признаки ударного метаморфизма в горных породах и их минералах, наблюдаемые под микроскопом [22]. К ним относится присутствие фаз высокого давления (коэсит, стишовит, алмаз), а также диаплектовых стёкол по кварцу, полевым шпатам и др. Таким же признаком являются мономинеральные и полиминеральные высокотемпературные стёкла. Наиболее легко диагностируемые микроскопически являются ударные деформации в некоторых породообразующих минералах, в частности в кварце. Это так называемые планарные деформационные элементы в виде тонких параллельных трещин с закономерной оптической ориентировкой, позволяющей оценить величину ударной нагрузки, испытанной породой. Другие геологические, геоморфологические, геофизические особенности структур, литология пород и пр. принимаются во внимание только после того, как четко определены основные петрографические или минералогические признаки ударных преобразований пород. Весьма сложна и неоднозначна диагностика раннедокембрийских импактных структур в областях развития регионально метаморфизованных пород [2]. Если не принимать во внимание признаки ударного метаморфизма, то некоторые грубообломочные и вулканические образования (например, тектониты, олистостромы, тиллиты, отложения грязевых потоков, различные пирокластические образования и пр.) могут быть ошибочно отнесены к тем или иным видам коптогенных пород.

Процесс импактного кратерообразования обычно подразделяют на ряд быстро сменяющих друг друга стадий: 1) стадию проникновения ударника в поверхностные толщи пород (породы мишени) и их сжатия; 2) стадию экскавации и роста кратера, а также выброса раздробленного, расплавленного и испарившегося материала мишени; 3) стадию

модификации кратера в результате возвратных движений дна и бортов кратера и его заполнения выброшенным материалом [13]. Иногда последнюю рассматривают как стадию ранней модификации, а к поздней относят последующие процессы перемещения блоков, связанные с установлением равновесия в насыпном материале, а также отложение материала перемытых выбросов ресургентной волной, если кратер образуется на мелководье. Вещество ударившего тела обычно полностью испаряется и в распыленном виде входит в состав импактитов.

Образование импактных кратеров диаметром более ста метров обусловлено переходом энергии космического тела, летящего со скоростью 15–20 км/с, в тепло и соответственно происходящим при этом тепловом взрыве. При падении больших масс развивается давление в несколько десятков гигапаскалей и более, остаточная температура за фронтом ударной волны достигает нескольких тысяч градусов. Импульс сжатия, последующее разрежение, нагрев, дифференциальные движения вещества являются основными факторами различных превращений пород [4, 13, 20], присущих исключительно импактному кратерообразованию. Его параметры радикально отличаются от катастрофического процесса от всех других в земной коре и на ее поверхности.

Различают истинный кратер – воронку, выработанную в породах цоколя и заполненную продуктами взрыва, и видимый кратер – округлую депрессию в рельефе, дно и борта которой образованы насыпным материалом, на бортах, кроме того, нередко выступают деформированные породы цоколя. В цоколе кратера, в истинном кратере и заполняющих его импактиках и брекчиях, в видимом кратере и отложенных в нем осадках выделяют различные морфологические и структурные элементы. Импактные структуры подразделяют на простые с чашеобразным профилем диаметром до 2–3 км и сложные с центральным и (или) кольцевым поднятием, их диаметр достигает десятков и первых сотен километров. Импактные структуры могут быть видоизменены тектоническими движениями и региональным метаморфизмом, что значительно усложняет их диагностику, геологическое картирование и картографирование. В геологическом строении древних импактных структур, особенно крупных, могут быть выделены структурно-литологические комплексы, подразделения и номенклатура которых основаны на их отношении к соответствующему импактному событию [4]. Эти комплексы обладают автономным внутренним строением, сложены обычно разновозрастными и различными по составу и генезису породами. Цокольный комплекс – это разнообразные породы места удара (мишени), в которых возник кратер, они частично разрушены и преобразованы (аутигенная литическая импактная брекчия), особенно в центральной его части. Здесь нередко возникают особые деформационные структурные формы, они наблюдаются и по периферии кратера в окружающих породах. Деформации постепенно ослабевают по радиусам и на глубину, что доказано бурением, например, данными по глубокой скважине в центре Пучеж-Катунской импактной структуры [5]. Коптогенный комплекс представлен аллогенной литической импактной брекчией и импактиками, эти породы заполняют впадину кратера и встречаются

в виде плаща выбросов за его пределами. Внутренняя структура комплекса нередко хаотичная, но может характеризоваться псевдостратификацией. Иногда в верхней части общего разреза можно встретить неяснослоистые обломочные породы, такими же могут быть и отложения ресургентной волны, перекрывающие брекчии и импактиты. Собственно образования коптогенного комплекса, несмотря на подчас значительную мощность, возникают практически синхронно, к ним неприменимы известные принципы, используемые при изучении и картографировании стратифицированных толщ.

Различные осадочные породы (гравелиты, песчаники, сланцы и пр.), развитые локально в погребенной впадине кратера, иногда отложенные длительное время спустя после его образования и залегающие на брекчиях и импактитах, относятся к заполняющему комплексу. Перекрывающий комплекс — это регионально распространенные толщи, обычно осадочные, налегающие на все предыдущие образования и полностью захороняющие импактную структуру. Последняя иногда отражается в строении этих толщ, даже в случае их большой мощности, что может быть показано на геологическом разрезе. Соотношения перечисленных комплексов могут быть выявлены скважинами или геофизическими методами. Образования перекрывающего, заполняющего и цокольного (в части, существенно не затронутой ударными преобразованиями) изображаются на геологической карте согласно способам, принятым для осадочных, изверженных и метаморфических пород. Коптогенный комплекс (иногда сложного строения) выделяется особо в качестве картируемой единицы и получает собственное название.

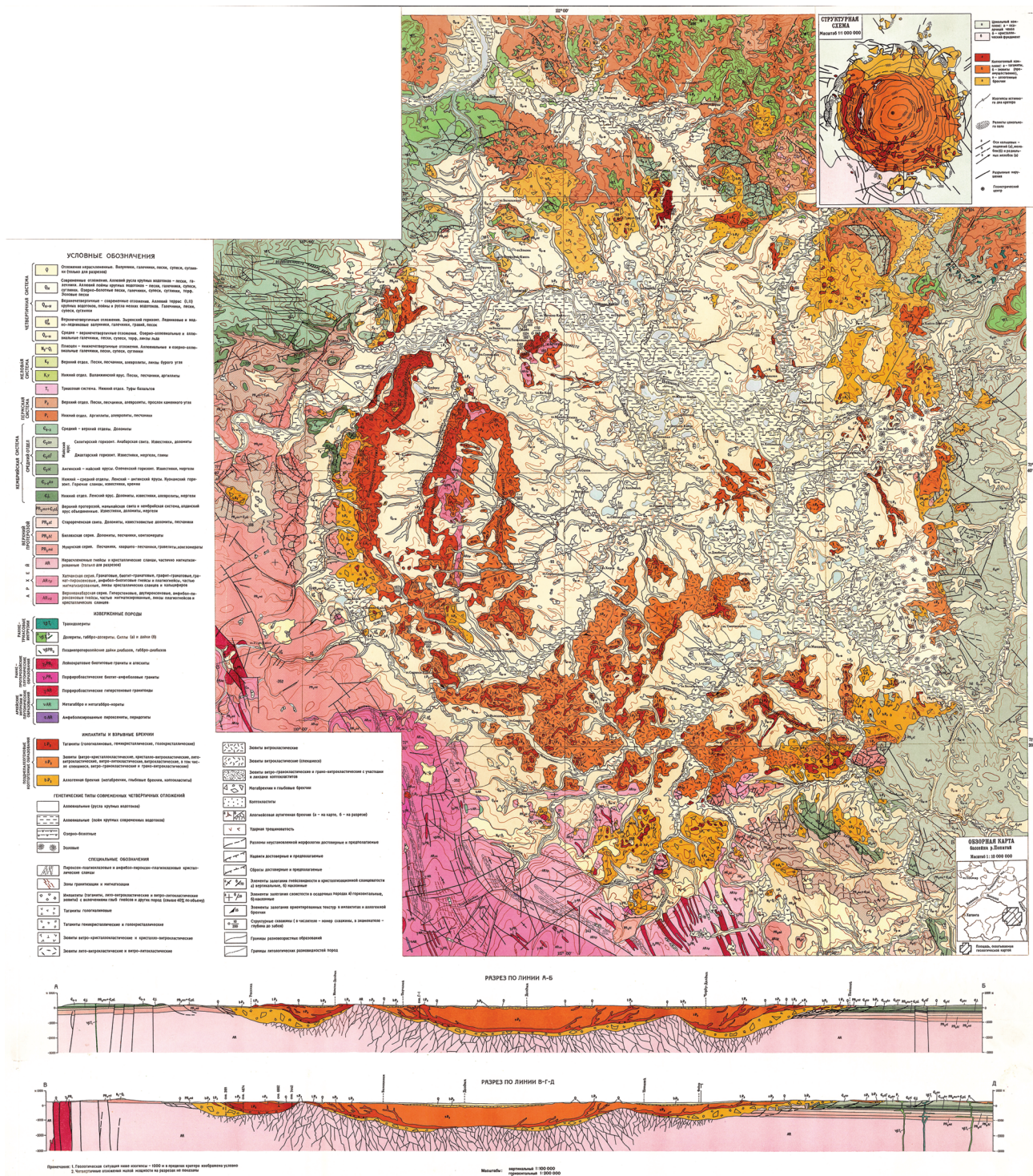
**Горные породы импактных структур и их картографируемые подразделения.** Один из наиболее сложных вопросов картографирования коптогенного комплекса, особенно в относительно крупных структурах, — расчленение слагающих его ассоциаций и выделение картографируемых единиц. Литология коптогенных пород и их совокупностей определяется весьма изменчивыми и независимыми группами факторов. Внешними факторами являются скорость и масса ударившего тела, в меньшей степени его состав и траектория, внутренними — состав, свойства, форма залегания, размеры тел пород мишени, их обводненность, палеогеография места удара. Энергия ударника определяет размер образующейся импактной структуры, а также масштабы преобразований пород мишени и количественные соотношения испарившихся, расплавленных и раздробленных пород, в частности импактитов и литических брекчий. Влияние внутренних факторов поливариантно, первостепенное значение имеют взаимосвязанные состав и свойства пород мишени, а также присутствие водных масс, влияющих на характер кратерообразования, изменения нагретого вещества горных пород и на процессы последующего захоронения брекчий и импактитов. Однотипные породы в импактных кратерах разного диаметра, возникшие в различных геологических и палеогеографических обстановках, могут существенно отличаться друг от друга по внешним признакам. Количественные соотношения импактных пород разных типов будут также различны, поэтому расчленение и выделение картографируемых

единиц в породах коптогенного комплекса в каждом случае представляют особую задачу.

Классификацию и номенклатуру видов импактных брекчий и импактитов нельзя считать полностью упорядоченными и согласованными, особенно в международном масштабе, как, например, это сделано для различных видов изверженных пород [8]. Для пород из импактных кратеров и их ассоциаций в свое время за рубежом было предложено большое число различных терминов, разные авторы вкладывали в соответствующие понятия разное содержание. Подразделение видов пород было основано на разных признаках — генезисе, условиях залегания, гранулометрии обломков, петроструктурных особенностях и пр. Эти же недостатки имела и номенклатура картографируемых единиц. Ряд таких несоответствий сохранился и в рекомендациях Подкомиссии МСГН по систематике и номенклатуре метаморфических пород [28]. Например, термином «импактит» предлагается обозначать вообще все породы, подвергшиеся ударным воздействиям, даже слабо ударно-метаморфизованные песчаники и сланцы, макроскопически неотличимые от совершенно неизмененных. Породы, состоящие в основном из застывших и частью раскристаллизованных продуктов плавления, которые образуют матрицу, названы «импактными расплавленными породами» (*impact melt rock*), что является по существу их генетическим описанием, а не термином. В тех же случаях, когда эти продукты плавления присутствуют в виде частиц и обломков, иногда количественно преобладающих в составе пород, их почему-то относят уже не к «импактным расплавленным породам», а к полимиктовым брекчиям и именуют «зювитами». Они, как принято в петрографии, получают имя собственное. При общей классификации импактных пород какие-либо количественные соотношения в них различных минеральных образований (обломков минералов, пород, стеклов, цементирующей массы и др.) в рекомендациях Подкомиссии не учитываются и т. д.

Первые геологические карты импактных структур на зарубежных территориях (Рис, Сьерра-Мадра, Маникуаган и др.), составленные в среднем и крупном масштабах, были опубликованы в конце 60 — начале 70-х годов прошлого века. Природа этих структур при этом не всегда учитывалась. На картах выделялись литические аллогенные брекчии и продукты застывания импактного расплава, иногда их некоторые разновидности. В нашей стране в 1980 г. была издана первая карта древнего импактного кратера — Попигаийской астроблемы масштаба 1 : 200 000 (рисунок) [3]. Она составлена на основе специализированного картирования, при котором были выделены различные по составу подразделения коптогенного комплекса и их разновидности, показаны детали строения окружающих деформированных пород.

Выявление и картирование импактных структур, начавшееся в 70–80-х годах прошлого века (Попигаийской, Карской, Пучеж-Катунской и др.), потребовали разработки детальных схем расчленения и номенклатуры импактных образований [9, 17, 19]. Эти схемы учитывали петрографическую практику изучения изверженных и метаморфических пород, особенно применительно к продуктам плавления и кристаллизации импактных расплавов. В настоящее время такие схемы апробированы при геологическом изучении и картировании



Геологическая карта Попигаийского метеоритного кратера. Масштаб 1 : 200 000. 1980 г.

ряда импактных структур на территории России, их использование регламентировано при составлении госгеолкарт [16]. За основу классификации, как и других типов пород, приняты различные литолого-петрографические признаки.

Схема классификации основных видов коптогенных пород приведена в табл. 1. Ударно-метаморфизованные породы обычно сохраняют облик исходных, в то время как ударно-метаморфические полностью утрачивают структуру пород, за счет которых они образовались. К импактитам отнесены только породы, содержащие более 10 % продуктов

ударного плавления, что согласуется с первоначальным пониманием содержания этого термина. В схему включены только породы, слагающие картируемые и картографируемые единицы, а относительно более редкие виды пород, встречающиеся среди импактитов и импактных брекчий, не показаны. Разновидности коптогенных пород могут выделяться по различным особенностям состава, текстуры и структуры. Таковыми могут быть соотношения и размеры кластов разных пород и стекол, степень раскристаллизации стекловатой матрицы, ее текстура и структура, химический состав, присутствие

Основные группы и виды коптогенных пород

Ударно-метаморфизованные породы (неперемещенные или аутигенные)		Ударно-метаморфические породы (перемещенные или аллогенные)		
Породы слабо, умеренно и интенсивно ударно-метаморфизованные	Литические брекчии (преимущественно мономиктовые)	Литические брекчии (преимущественно полимиктовые, содержат 0–10 % импактного стекла)	Импактиты (содержат > 10 % импактного стекла)	
Различные осадочные, изверженные и метаморфические породы, в том числе брекчированные	Мезо- и мегабрекчии	Микро-, мезо- и мегабрекчии	Зювиты (содержат импактные стекла в виде частиц и обломков)	Тагамиты (импактное стекло или продукты его кристаллизации образуют матрицу)
Подразделяются в соответствии с составом исходных пород		Подразделяются по составу обломков и наличию примеси стекла	Подразделяются по содержанию и гранулометрии различных кластов, по агрегатному состоянию матрицы и ее химическому составу	

специфических включений, бомб импактного стекла и др. Отдельные группы коптогенных пород, а также их виды и разновидности, могут залегать в виде линз, пластов даек и пр., однако форма залегания не является критерием классификации. Импактные литические брекчии принято подразделять на неперемещенные (аутигенные) и перемещенные (аллогенные), изображаемые на картах отдельно. Первые, обычно мономиктовые, залегают в составе цокольного комплекса, имея постепенные переходы к слабо ударно-метаморфизованным и неизменным породам мишени, вторые, главным образом полимиктовые и содержащие примесь тонкообломочного цемента, широко представлены в составе коптогенного комплекса и залегают в виде сплошных покровообразных масс и неправильных линз.

Особо следует сказать о материале дальних выбросов из тех или иных импактных структур, которые могут залегать в виде тонких прослоев на больших расстояниях от точки удара. Их принадлежность к дистальным отложениям импактных кратеров доказывается присутствием частиц и сферул импактных стекол, кластов с признаками ударных деформаций или на основании определенных геохимических признаков. Несмотря на малую мощность, такие прослои имеют важное стратиграфическое значение маркеров импактных событий. Время образования импактной структуры и пород коптогенного комплекса определяется геологическими методами, но чаще различными изотопно-геохимическими по некоторым минералам и стеклам.

Расчленение пород коптогенного комплекса и выделение картографируемых единиц требуют принятия во внимание их особенностей, обусловленных генезисом и индивидуальными чертами той или иной импактной структуры, о чем частично говорилось выше. В общем это кратковременность процесса кратерообразования и практическая синхронность различных фациальных обстановок формирования материала исходных пород, его перемещения и отложения. Отсюда проявления псевдостратификации, негомогенности тел, сложных какими-либо видами пород, и их взаимные переходы, включения одних в другие, наличие в верхней части общего разреза коптогенных образований

с неясной слоистостью, возможные постепенные переходы к вышележащим отложениям ресургентной волны и к породам заполняющего комплекса. К импактным брекчиям и импактитам, залегающим внутри кратерных структур, неприменим принцип суперпозиции при оценке соотношений разных пород, которые являются нестратифицированными образованиями [9]. При их картографировании используются подходы, аналогичные тем, которые применяются для тел плутонических и гипабиссальных изверженных пород, которые по существу являются литодемами [24].

**Способы изображения картографируемых подразделений.** Из сказанного выше совершенно ясно, что картографирование импактной структуры как определённого объекта, имеющего морфологическое, структурное и вещественное выражение, может выполняться на основании ее точной диагностики, определения состава и условий залегания образований коптогенного комплекса. Каждая структура имеет однозначно устанавливаемые с помощью различных методов геологические и геоморфологические границы, она обычно находит отображение в физических полях (магнитном, гравитационном и т. д.). При определении положения и границ структуры используются также дистанционные методы. Они включают анализ аэрофотоматериалов, материалов высотных съемок, космической съемки, результатов гравитационных и магнитных наблюдений, сейсморазведочных и электроразведочных работ, скважинного каротажа. При этом следует различать непосредственно наблюдаемые морфологические и структурные элементы, сохранившиеся от эрозии, а также реконструируемые, которые могут быть восстановлены по различным косвенным признакам. На картах разного масштаба обнажающиеся на поверхности импактные структуры в зависимости от диаметра могут быть показаны по-разному: условными знаками, сплошной закраской без детального расчленения коптогенного комплекса или с детальным выделением различных картографируемых единиц (табл. 2). Погрешенные импактные структуры всех диаметров показываются условным знаком или знаком внешней границы структуры, установленной каким-либо методом.

Изображение импактных структур на геологических картах

Диаметр импактной структуры, км	На картах м-ба 1 : 200 000	На картах м-ба 1 : 1 000 000
1–3 и менее	Условный знак или коптогенный комплекс нерасчлененный	Условный знак
3–10	Коптогенный комплекс нерасчлененный или его подразделения	Условный знак или коптогенный комплекс нерасчлененный
Более 10	Подразделения коптогенного комплекса	Коптогенный комплекс нерасчлененный или его подразделения

Интенсивно эродированные импактные структуры позволяют изучать и показывать на карте строение деформированных пород цокольного комплекса, различные складки, разломы, инъекции жил брекчий и импактитов и другие детали. При этом необходимо принимать во внимание общий характер деформаций, центростремительное в центральной части структуры и центробежное по ее периферии направления смещения пород цоколя.

Импактиты и аллогенные литические брекчии расчленяются на картографируемые единицы по литологическим и петрографическим признакам, а также по конституционному строению, отражающему динамику формирования подразделения. Ассоциации пород близкого состава выделяются в качестве толщ, в свою очередь состоящих из отдельных тел, сложенных каким-либо преобладающим видом пород. Толщи именуется по составу этой породы. В отдельных телах (пластах, линзах и т. п.) крапом могут быть показаны особенности их состава и строения. Время образования импактной структуры и пород коптогенного комплекса определяется геологическими методами, но чаще различными изотопно-геохимическими по некоторым минералам и стеклам.

На геологических картах импактных структур и в легендах породы коптогенного комплекса закрашиваются согласно времени импактного события. Учитывая, что его формирование геологически мгновенно, закрашка полей развития отдельных групп пород может производиться с некоторыми вариациями: импактитов более густым оттенком, перемешанных брекчий более бледным. Крапы, наносимые голубым цветом, используются для обозначения различий в литологии брекчий и импактитов, включений и пр.

В тех случаях, когда это установлено, на геологической карте показываются разновозрастные разломы: 1) возникшие в цоколе до импактного события; 2) одновременные с образованием импактной морфоструктуры в стадии компрессии, экскавации и ранней модификации; 3) возникшие при поздней модификации; 4) связанные с последующим геологическим развитием. Разломы всех этих групп имеют разную морфокинематическую характеристику и обозначаются разными линиями. Разломы групп 2 и 3 в породах цоколя обычно имеют радиально-концентрический план и листрический характер на глубину, ограничивая полигональные блоки.

Глубинное строение импактных структур показывается на различных картах, схемах и разрезах, которые строятся исходя из конкретных наблюдений и с учетом модели кратерообразования. Такими, например, карты со снятым перекрывающим

комплексом, со снятым заполняющим комплексом, со снятым коптогенным комплексом (они частично отражают геологическую ситуацию, существовавшую до удара, и строение концентрических зон деформаций в цоколе). Могут быть также составлены различные петрографические и литологические карты отдельных комплексов, или горизонтов, или отдельных тел. Возможно составление различных структурных карт или схем, например, изогипс истинного дна (или, что то же, подошвы коптогенного комплекса), изогипс первичного видимого дна (или, что то же, кровли коптогенного комплекса), изогипс подошвы и кровли импактитов или отдельных крупных тел этих пород, изопакит отдельных комплексов или входящих в их состав тел. Иногда составляют структурные карты и схемы деформированного цоколя, в том числе по какому-либо маркирующему горизонту, схемы ориентировки конусов разрушения, зональности ударного метаморфизма и т. д. При построении разрезов нельзя допускать более чем в 2–3 раза превышения вертикального масштаба над горизонтальным, что ведет к значительным искажениям глубинного строения.

**Полезные ископаемые в импактных структурах.** Сегодня в импактных структурах мира установлены пункты минерализации, проявления и месторождения различного рудного и нерудного минерального сырья, горючих полезных ископаемых, подземных вод. Во многих случаях такие месторождения ранее длительно эксплуатировались, но лишь сравнительно недавно было надежно установлено, что заключающие их геологические структуры имеют импактное происхождение [23, 26]. Минерагеническая нагрузка импактных структур весьма разнообразна и зависит как от масштабов отдельного ударного события, геологической и палеогеографической обстановки, в которой оно происходило, так и от последующего геологического развития и истории развития рельефа. Все эти особенности так или иначе играют роль рудогенерирующих факторов. На картах полезных ископаемых и закономерностей их размещения соответствующими знаками показываются конкретные рудные объекты импактных структур, а также другие элементы минерагенической нагрузки.

В табл. 3 перечислены виды полезных ископаемых, установленные в различных импактных структурах, однако нет сомнения, что разнообразие видов минерального сырья может быть значительно большим. Полезные ископаемые, встречающиеся в импактных структурах, подразделяются на несколько групп исходя из соотношения времени их образования с ударным

Виды полезных ископаемых импактных структур

Генетические группы	Основные минерагенические процессы	Виды полезных ископаемых	Локализация залежей
Прогенетическая	Брекчирование и перемещение исходных пород	Кремнезем Железо, уран, золото	Цокольный и коптогенный комплексы
Сингенетическая	Фазовые переходы исходного углеродистого вещества Плавление исходных сульфидных залежей (?)	Импактные алмазы Медь, никель, платиноиды, стекла	Коптогенный комплекс, тела импактитов в цокольном комплексе
Эпигенетическая	Гидротермальные преобразования брекчий и импактитов Размыв импактитов и переотложение материала Химическая и биохимическая седиментация в кратерных озерах Подземная фильтрация в благоприятные ловушки	Свинец, цинк, уран, цеолиты, агат Россыпи импактных алмазов Цеолиты, бентониты, эвапориты, горючие сланцы, диатомиты, лигниты, янтарь, фосфориты Нефть, газ, пресные и минерализованные воды	Заполняющий комплекс, частично коптогенный и цокольный комплексы

событием – это про-, син- и эпигенетические группы. К прогенетическим относятся те, которые существовали в толщах пород места удара и залежи которых или их части были деформированы или перемещены при экскавации или модификации кратера. Таковы известные в ряде импактных структур железо, уран, золото и некоторые другие. Сингенетические полезные ископаемые возникают в процессе кратерообразования как его непосредственное следствие. К сингенетическим относятся импактные алмазы, медно-никелевые руды с металлами платиновой группы, импактные стекла, представляющие интерес как поделочные камни. Эпигенетическими являются скопления минерального сырья, формирующиеся вслед за завершением кратерообразования или некоторое время спустя в условиях перемещения флюидных фаз в пористых толщах, при размыве импактитов, при последующем осадконакоплении и т. д. В числе эпигенетических видов находятся гидротермальные руды цветных металлов (свинец, цинк и др.), урана, колчеданы, поделочные камни (агат), цеолиты, россыпи алмазов, янтаря, эвапориты, горючие сланцы, лигниты, диатомиты, фосфориты, а также нефть, природный газ, пресные и минерализованные воды. Кроме того, породы различных комплексов импактных структур во многих случаях используются как строительные материалы.

Различные виды минерального сырья, встречающиеся в импактных структурах, локализуются в породах цокольного, коптогенного и заполняющего структурно-литологических комплексов. В породах первого из них заключены такие полезные ископаемые, которые первоначально были присущи породам, в которых образовался кратер и которые были деформированы вместе с соответствующими залежами (твердые ископаемые) или же испытали фильтрацию в возникшие структурные неоднородности (жидкости и газы), а также осаждение из растворов (гидротермальные новообразования). В породах коптогенного комплекса находятся те виды минерального сырья, которые возникли непосредственно при преобразовании

исходных пород и минералов или при эволюции возникшего импактного расплава, а также при последующей циркуляции или фильтрации подвижных фаз. Например, брекчии, обладающие повышенной пористостью, иногда являются местами газобразных и жидких углеводородов, мигрирующих из окружающих кратер нефтематеринских толщ. В брекчиях могут присутствовать также фрагменты и перемещенные массы рудных образований, принадлежавшие первоначально к породам цоколя. В толщах заполняющего комплекса размещаются месторождения и проявления, возникшие при размыве и переотложении пород цокольного и коптогенного комплексов, а также сингенетичные озерным или морским осадкам каустобиолиты, эвапориты и др. Иногда эти осадки могут быть и нефтематеринскими. Известны примеры уникальных по масштабам месторождений, связанных с импактными структурами. Таковы, например, медь и никель импактной структуры Садбери в Канаде, нефтяные залежи Мексиканского залива, локализованные в выбросах брекчий из кратера Чиксулуб, месторождения импактных алмазов в импактитах Попигайского кратера [11, 12].

Закономерности локализации того или иного вида минерального сырья могут значительно варьировать, хотя общая приуроченность его к породам различных комплексов достаточно определена. Например, сингенетические полезные ископаемые чаще всего располагаются непосредственно в импактитах, а локализация эпигенетических контролируется морфологическими, структурными и литологическими неоднородностями пород заполняющего, коптогенного и цокольного комплексов. Если закономерности локализации того или иного вида сырья установлены, то они могут быть отражены на прогнозно-минерагенической схеме мелкого масштаба.

**Заключение.** Пространственный диапазон преобразований геологического вещества земной коры под воздействием ударов малых космических тел исключительно велик – от деформаций

кристаллических решеток минералов до образования гигантских круговых структур в сотни километров в поперечнике. Картируемые и картографируемые в среднем и мелком масштабах, эти импактные круговые структуры, несмотря на относительную редкость, вносят определенный вклад в понимание геологического строения и развития отдельных территорий. Несмотря на особый характер их генезиса, диагностика этих образований, основанная на структурно-вещественных признаках, достаточно надежна, что определяет возможность и необходимость отображения этих объектов на государственных геологических и других картах, тем более что импактные структуры несут подчас определенную минерагеническую нагрузку. Методы такого картографирования отличаются некоторым своеобразием и еще недостаточно знакомы всем геологам, что иногда приводит к отнесению заведомо космогенных структур к вулcano-тектоническим, тектоническим или к появлению ошибочно выделенных объектов якобы внеземного происхождения. И то, и другое приводит подчас к неверной оценке перспектив отдельных территорий на различные полезные ископаемые.

---

1. Вальтер А.А., Гуров Е.П. Ударный метаморфизм и ударное плавление — уникальные геологические процессы, связанные с образованием взрывных метеоритных кратеров // Метеоритные структуры на поверхности планет. — М.: Наука, 1979. — С. 81–98.

2. Выявление докембрийских импактных структур и методы исследования обломочных импактитов: Методич. руководство. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1998. — 34 с.

3. Геологическая карта Попигаевского метеоритного кратера. М-6 1 : 200 000 / ред. В.Л. Масайтис. — Л.: Аэрогеология, 1980.

4. Геология астроблем. — Л.: Недра, 1980. — 231 с.

5. Глубокое бурение в Пучеж-Катунской импактной структуре / ред. В.Л. Масайтис, Л.А. Певзнер. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 1999. — 392 с.

6. Иванов Б.А. Удары космических тел как геологический фактор // Катастрофические воздействия космических тел / ред. В.В. Адушкин, И.В. Немчинов. — М.: ИКЦ «Академкнига», 2005. — С. 118–150.

7. Инструкция по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты России масштаба 1 : 1 000 000 (третьего поколения). — СПб.: ВСЕГЕИ, 2003. — 240 с.

8. Классификация магматических (изверженных) пород и словарь терминов. Рекомендации Подкомиссии по систематике изверженных пород МСГН: Пер. с англ. — М.: Недра, 1997. — 248 с.

9. Масайтис В.Л. Методы изучения астроблем // Метеоритные структуры на поверхности планет. — М.: Наука, 1979. — С. 53–64.

10. Масайтис В.Л. Импактное кратерообразование // Планета Земля: Энциклопед. справочник. Том «Тектоника и геодинамика» / ред. Л.И. Красный, О.В. Петров, Б.А. Блюман. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2004. — С. 221–226.

11. Масайтис В.Л. Минерагенические следствия притока космического вещества // Планета Земля: Энциклопед. справочник. Том «Минерагения». Кн. 1 / ред. Б.А. Блюман и др. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2008. — С. 249–260.

12. Масайтис В.Л., Кириченко В.Т., Мацак М.С., Федорова И.Г. Коренные месторождения и россыпи импактных алмазов Попигаевского района (Северная Сибирь) // Регион. геология и металлогения. 2013. № 54. — С. 89–98.

13. Мелюх Г. Образование ударных кратеров: геологический процесс. — М.: Мир, 1994. — 336 с.

14. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третьего поколения). — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 196 с.

15. Методическое руководство по составлению и подготовке к изданию листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 (второго издания). — СПб.: ВСЕГЕИ, 2010. — 164 с.

16. Петрографический кодекс. Издание третье. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2009. — 200 с.

17. Райхлин А.И., Селивановская Т.В. Брекчии и импактиты взрывных метеоритных кратеров и астроблем // Метеоритные структуры на поверхности планет. — М.: Наука, 1979. — С. 65–80.

18. Стратиграфический кодекс. Издание третье. — СПб.: Изд-во ВСЕГЕИ, 2006. — 96 с.

19. Структуры и текстуры взрывных брекчий и импактитов. — Л.: Недра, 1983. — 159 с.

20. Ударные кратеры на Земле и планетах / ред. М.А. Садовский. — М.: Наука, 1983. — 200 с.

21. Baratoux D., Reimold W.U. The current state of knowledge about shatter cones: Introduction of special issue // Meteoritics and Planet. Sci. 2016. Vol. 51. No 8. — P. 1389–1434.

22. French B.M., Koeberl C. The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: what works, what doesn't, and why // Earth-Sci. Rev. 2010. Vol. 98. — P. 123–170.

23. Grieve R.A.F., Masaitis V.L. The economic potential of terrestrial impact craters // Intern. Geol. Rev. 1994. Vol. 36. — P. 105–151.

24. King D.T., Petruny L.W. Application of stratigraphic nomenclature to terrestrial impact derived and impact related materials // Impact Markers in the Stratigraphic Records / eds. C. Koeberl, F. Martinez-Ruiz. — Berlin–Heidelberg: Springer-Verlag, 2003. — P. 41–64.

25. Koeberl C. Identification of meteoritic component in impactites // Meteorites: Flux with Time and Impact Effects / M.M. Grady, R. Hutchinson, G.J.H. McCall, D. Rothery (Eds.). — Geol. Soc., London, Sp. Publ. 1998. Vol. 140. — P. 133–153.

26. Masaitis V.L. The economic geology of impact craters // Intern. Geol. Rev. 1989. Vol. 31. — P. 922–933.

27. Masaitis V.L. Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview // Australian J. of Earth Sci. 2005. Vol. 52. No 4/5. — P. 509–528.

28. Stöffler D., Grieve R.A.F. Impactites: Chapter 2.11 // Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences / D. Fettes, J. Desmons (Eds.). — Cambridge: University Press, UK, 2007. — P. 82–92.

---

1. Valter A.A., Gurov E.P. Shock metamorphism and shock melting of the unique geological processes associated with the formation of explosive meteorite craters. *Meteoritic structures on the surface of planets*. Moscow: Nauka. 1979. Pp. 81–98. (In Russian).

2. Vyyavlenie dokembriiskikh impactnykh struktur i metody issledovaniya oblomochnykh impactitov: Metodicheskoe rukovodstvo [The identification of Precambrian impact structures and methods of fragmental impactites: Methodological manual]. St. Petersburg: VSEGEI. 1998. 34 p.

3. Geologicheskaya karta Popigaiskogo meteoritnogo kratera, masshtab 1 : 200 000 [Geologic map of the Popigai meteorite crater, scale of 1:200,000]. Ed. by V.L. Masaitis. Leningrad: Aerogeologia. 1980.

4. Geologia astroyblom [The Geology of astroblems]. Leningrad: Nedra. 1980. 231 p.

5. Glubokoe burenie v Puchezh-Katunskoi impactnoi struktur [Deep drilling v Puchezh-Katunski impact structure]. Ed. by V.L. Masaitis, L.A. Pevzner. St. Petersburg: VSEGEI. 1999. 392 p.

6. Ivanov B.A. The impact of cosmic bodies as a geological factor. *Catastrophic impact of cosmic bodies*. Ed. by V.V. Adu-

- shkin, I.V. Nemcinov. Moscow: IKC "Akademkniga". 2005. Pp. 118–150. (In Russian).
7. Instrukciya po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov Gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossii masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie) [Instructions for compilation and preparation for publication of sheets of the State geological map of Russia of scale 1:1,000,000 (third generation)]. St. Petersburg: VSEGEI. 2003. 240 p.
  8. Klassifikatsiya magmaticheskikh (izverzhennykh) porod i slovar' terminov. Rekomendatsii Podkomissii po sistematike izverzhennykh porod MSGN: Perevod s angl. [Classification of igneous rocks and Glossary of terms. Recommendations of the Subcommittee on the systematics of igneous rocks IUGS: Translation from English]. Moscow: Nedra. 1997. 248 p.
  9. Masaitis V.L. Methods study astroblem. *Meteorite structures on the surface of planets*. Moscow: Nauka. 1979. P. 53–64. (In Russian).
  10. Masaitis V.L. Impact createrootpane. *Planet Earth: Encycloped. reference. Vol. "Tectonics and geodynamics"*. Ed. by L.I. Krasnyii, O.V. Petrov, B.A. Blyuman. St. Petersburg: VSEGEI. 2004. Pp. 221–226. (In Russian).
  11. Masaitis V.L. Mineral investigation of the inflow of cosmic matter. *Planet Earth: Encycloped. reference. Vol. "Metallogeny"*. Book 1. Ed. by B.A. Blyuman i dr. St. Petersburg: VSEGEI. 2008. Pp. 249–260. (In Russian).
  12. Masaitis V.L., Kirichenko V.T., Mashchak M.S., Fedorova I.G. The primary deposits and deposits of impact diamonds of the Popigai region (Northern Siberia). *Region. geologiya i metallogeniya*. 2013. No 54. Pp. 89–98. (In Russian).
  13. Melosh G. Obrazovanie udarnykh kraterov: geologicheskii process [The formation of impact craters: a geological process]. Moscow: Mir. 1994. 336 p.
  14. Metodicheskoe rukovodstvo po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov Gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 1 000 000 (tret'ego pokoleniya) [Guidance on drafting and preparation for publication of sheets of the State geological punishment of the Russian Federation of scale 1:1,000,000 (third generation)]. St. Petersburg: VSEGEI. 2010a. 196 p.
  15. Metodicheskoe rukovodstvo po sostavleniyu i podgotovke k izdaniyu listov Gosudarstvennoi geologicheskoi karty Rossiiskoi Federatsii masshtaba 1 : 200 00 (vtorogo izdaniya) [Guidance on drafting and preparation for publication of sheets of the State geological punishment of the Russian Federation of scale 1:200,00 (second edition)]. St. Petersburg: VSEGEI. 2010b. 164 p.
  16. Petrograficheskii kodeks. Izdanie tret'e [Petrographic code. Third edition]. St. Petersburg: VSEGEI. 2009. 200 p.
  17. Raikhlin A.I., Celivanovskaya T.V. Breccias and impactites of explosive meteorite craters and astroblems. *Meteorite structures on the surface of planets*. Moscow: Nauka. 1979. Pp. 65–80. (In Russian).
  18. Stratigraficheskii kodeks. Izdanie tret'e [Stratigraphic code. Third edition]. St. Petersburg: VSEGEI. 2006. 96 p.
  19. Struktury i tekstury vzryvnykh brekchii i impaktitov [Structure and texture of explosive breccias and impactites]. Leningrad: Nedra. 1983. 159 p.
  20. Udarnye krateri na zemle i planetakh [Impact craters on Earth and planets]. Ed. by M.A. Sadovskii. Moscow: Nauka. 1983. 200 p.
  21. Baratoux, D., Reimold, W.U. 2016: The current state of knowledge about shatter cones: Introduction of special issue. *Meteoritics and Planetary Science*, vol. 51. 8. 1389–1434.
  22. French, B.M., Koeberl, C. 2010: The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: what works, what doesn't, and why. *Earth-Science reviews*, vol. 98. 123–170.
  23. Grieve, R.A.F., Masaitis, V.L. 1994: The economic potential of terrestrial impact craters. *Intern. Geol. Review*, vol. 36. 105–151.
  24. King, D.T., Petruny, L.W. 2003: Application of stratigraphic nomenclature to terrestrial impact derived and impact related materials. In Koeberl, C. and Martinez-Ruiz, F. (eds.): *Impact markers in the stratigraphic records*. 41–64. Springer-Verlag Berlin/Heidelberg.
  25. Koeberl, C. 1998: Identification of meteoritic component in impactites. In Grady, M.M., Hutchinson, R., McCall, G.J.H., Rothery, D. (eds.): *Meteorites: Flux with Time and Impact Effects Geol. Soc., London, Sp. Publ., vol. 140*. 133–153.
  26. Masaitis, V.L. 1989: The economic geology of impact craters. *International Geology Review*, vol. 31. 922–933.
  27. Masaitis, V.L. 2005: Morphological, structural and lithological records of terrestrial impacts: an overview. *Australian Journal of Earth Sciences*, vol. 52. 4/5. 509–528.
  28. Stöffler, D., Grieve, R.A.F. 2007: Impactites, Chpt. 2.11. In Fettes, D., Desmons, J. (eds): *Metamorphic Rocks: A Classification and Glossary of Terms, Recommendation of the International Union of Geological Sciences*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. 82–92.

*Masaitis Viktor Lyudvigovich* – доктор геол.-минер. наук, гл. науч. сотрудник, Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского (ВСЕГЕИ). Средний пр., 74, Санкт-Петербург, 199106, Россия. <Victor\_Masaitis@vsegei.ru>

*Masaitis Victor Liudvigovich* – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, Chief Researcher, A.P. Karpinsky Russian Geological Research Institute (VSEGEI). 74, Sredny Prospect, St. Petersburg, 199106, Russia. <Victor\_Masaitis@vsegei.ru>