ISSN 2221-3198

ГЕОЛОГИЯ И ГЕОФИЗИКА ЮГА РОССИИ

№ 4 / 2018

УДК 551.242.51; 504.54

DOI:10.23671/VNC.2018.4.20149

ПРИРОДНЫЕ И ТЕХНОГЕННЫЕ ИМПАКТНЫЕ СТРУКТУРЫ: ЭКОЛОГО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЙ АСПЕКТ

© 2018 А. В. Николаев¹, д. ф.-м. н., член-корр. РАН, В. Т. Трофимов²,
д. г.-м. н., А. Д. Жигалин^{1, 2}, к. г.-м. н., В. С. Лавров¹

¹ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995,
г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1, e-mail: zhigalin. alek@yandex. ru;

²ФГБОУВО Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова,
Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, e-mail: trofimov@rector. msu. ru

Образование природных и техногенных импактных (ударных) геологических структур происходило в условиях воздействия очень высоких температур и давления. В природных импактных структурах формировались месторождения алмазов, золота, урана, меди и других ценных полезных ископаемых. Искусственные импактные структуры, образовавшиеся при проведении подземных ядерных взрывов, характеризуются неустойчивостью быстрой изменчивостью во времени и возможностью проявления отдаленных экологических эффектов в виде спонтанной радиоактивности. В статье обобщены результаты последних исследований импактных структур; полученные результаты отрывают новый взгляд на генезис минералов, возможную роль трансмутации элементов.

Ключевые слова: природные и техногенные импактные структуры, подземные ядерные взрывы, полезные ископаемые, георадиологические эффекты.

Введение

Импактные геологические структуры образовались в результате падений крупных метеоритов, астероидов, а также при проведении ядерных взрывов.

На поверхности Земли эпицентральные области этих воздействий имеют кольцевую форму. Крупные кольцевые структуры, вызванные падением астероидов, астроблемы, имеют в поперечнике 100 км и более.

Изучение импактных структур на поверхности Земли, Луны и планет земной группы показывает, что «бомбардировка» планет малыми космическими телами является ординарным явлением, по крайней мере, в рамках Солнечной системы. Наиболее полное представление о характере импактных структур дает поверхность обратной стороны Луны, испещренная астроблемами, кольцевыми структурами – следами падения астероидов. Сторона, обращенная к Земле, имеет совершенно иной облик – сравнительно небольшое количество астроблем, вулканические кальдеры. Земля экранирует видимую сторону Луны от падения астероидов, вместе с тем обратная сторона Луны показывает насколько интенсивной оказывается бомбардировка метеоритами. На поверхности Земли геологические процессы стерли почти все следы импактного воздействия. Поэтому оставшиеся кольцевые структуры, астроблемы, сравнительно немногочисленны.

Техногенные импактные структуры – это вторичные геологические образования, сформированные в течение нескольких десятков лет после проведения

подземных ядерных взрывов. По своим характеристикам они отличаются от своих природных аналогов, поскольку формируются в специфических условиях – в момент взрыва и в течение очень короткого, $\sim 10^{-6}$ с интервала времени после него. Вследствие чрезвычайно высокой температуры, $\sim 10^6$ °C и громадного избыточного давления, $\sim 10^6$ ГПа, сопутствующим подземному ядерному взрыву, происходит скоротечное расширение находящихся в малом объеме под высоким давлением раскаленных газов и продуктов взрыва, образовавшихся в результате термических перевоплощений горных пород, образуется взрывная полость; с удалением от очага следует зона механического разрушения горных пород, трещин, пластических деформаций и механических колебаний в массиве горных пород. Для большинства геологических условий сред взрывная полость не является устойчивой, вследствие чего происходит постепенное обрушение ее кровли. Зона механической разгрузки образует поднимающийся к поверхности земли «столб обрушения». Взрывная полость заполняется обломками обрушенной кровли. Наши скважинные наблюдения в Воротиловской глубокой скважине показывают, что зона разгрузки в астроблеме за 35 млн лет погрузилась ниже 6500 м. Это процесс должен происходить и в очаговых зонах ядерных взрывов, однако, эта проблема остается пока неизученной.

Природные импактные структуры

Природные импактные структуры, образовавшиеся падении на Землю крупных метеоритов и астероидов, начали идентифицироваться как самостоятельные геологические объекты с середины прошлого века, но систематическое их исследование приобрело широкий размах в 60-80-е годы одновременно с началом углубленного изучения Земли и околоземного космического пространства автоматическими и пилотируемыми аппаратами. В научный обиход в это время были введены термины «астроблема» и «импактный кратер», а число открываемых ударно-взрывных структур начало быстро возрастать. Сейчас на земной поверхности выявлено с достоверной доказанностью происхождения более 150-180 (по разным данным) таких объектов. Современный полный каталог импактных структур на поверхности Земли насчитывает 1526 образований, из которых 223 считаются достоверными, 251 – вероятными, 951 – возможными, которые еще требуют исследований, 101 – неустановленными. Такое расхождение данных объясняется, в первую очередь, неутрачиваемыми спорами о происхождении целого ряда обнаруженных структур – «кандидатов» в астроблемы, но еще не признанных таковыми. Карты размещения выявленных ударных кратеров на земной поверхности говорят не о вероятном наличии таких форм на нашей планете, а скорее об уровне исследований этой проблемы в тех или иных частях земного шара. Более того, огромная территория океанов, как можно предполагать с высокой степенью вероятности, прячет в своих водах не меньше, а существенно больше, если учесть соотношение площадей океана и суши, подобных структур.

В нашей стране среди выявленных импактных структур различного возраста (от 3,5-5 до 380-700 млн лет) и разной величины (диаметр от 0,25-3 до 65-100 км) наиболее известными являются Попигайский метеоритный кратер (Попигайская астроблема) в Восточной Сибири, в долине р. Попигай, и Пучеж-Катунская (Пучеж-Катунская) астроблема, первая из обнаруженных в нашей стране структур подобного рода, находящаяся в Нижегородской области. Схематический поперечный разрез импактной структуры (кратера) представлен на рисунке 1 [Вишневецкий, 2016; Масайтис, 2016].

Попигайская астроблема, диаметр которой составляет около 100 км, по величине делит четвертое место в мире с кратером Маникуаган в Канаде, имеет возраст примерно 36 млн лет. Котловина кратера была открыта в 1946 г. В 1970 году была выдвинута гипотеза о её метеоритном происхождении, основанная на изучении выходящих на поверхность горных пород, носящих следы дробления и ударного плавления. В результате геологоразведочных работ в пределах Попигайского кратера, вблизи «мишени» и на значительном удалении от нее, были обнаружены месторождения алмазов, а в 2012 г. были обнародованы сведения о том, что в районе кратера находится крупнейшее в мире месторождение импактных алмазов (рис. 2).

Рис. 1. Схематический геологический разрез импактной структуры (астроблемы):
1 – центральное поднятие (мишень); 2 – кольцевые поднятия (выбросы) у кратеров большого диаметра; 3 – разрушенная коренная порода; 4 – импактиты (расплавленные горные породы);
5 – брекчированные породы

Пучеж-Катунский кратер диаметром около 80 километров, имеющий возраст около 167 млн лет, располагается примерно в 80 км севернее г. Нижний Новгород. В рельефе кратер никак не выражен, поскольку заполнен более поздними осадочными отложениями. С другой стороны, на космических снимках района хорошо просматривается округлая структура диаметром 140 км, центрированная относительно геометрического центра кратера. Эта, близкая по форме к кольцевой, структура отображается в дугообразной форме верхнего течения р. Лух на западе и р. Керженец и ее правого притока на востоке. Учитывая размеры Пучеж-Катунской астроблемы и предполагаемую силу удара, при которой она сформировалась, можно говорить о ее возможной алмазоносности, сходной с алмазоносностью Попигайской импактной структуры. Правда, речь идет о так называемых импактных алмазах, имеющих очень малые размеры и не пригодных для ювелирной огранки. Однако такого рода алмазы обладают повышенными, по сравнению с обычными алмазами, абразивными свойствами, что может представлять интерес для промышленного производства. В настоящее время идея разработки месторождений импактных алмазов рассматривается как оптимистичная перспектива, а не как планы ближайшего будущего. Предпочтение пока безоговорочно отдается традиционным алмазоносным кимберлитовым трубкам (это приблизительно 90% всех запасов алмазных месторождений). Что касается происхождения кимберлитовых алмазов, считается, хотя и не без

Рис. 2. Находки алмазов (черные кружки) в импактитах Попига́йской астроблемы (выделена белым) в 1971-1973 гг. [Вишневский, 2007]

проблемных дискуссий, что алмазы кристаллизовались очень глубоко – на глубине нахождения ультраосновных пород в условиях воздействия высоких температуры и давления, после чего залежи увлекались потоками магмы наверх. При этом некоторые алмазы могли возникать уже в процессе подъема породы вместе с магмой к поверхности земной коры (рис. 3).

Исследования алмазоносных структур, проведенные методом микросейсмического зондирования (ММЗ), показали, что самая верхняя часть субвертикальной неоднородности имеет больший диаметр, чем глубокое тело трубки, а само тело имеет «бокалообразную форму» [Николаев, Французова, 2017].

Природные импактные структуры (астроблемы) представляют собой своего рода памятники геологической истории Земли во всем ее многообразии. И в то же время, перспектива освоения в будущем месторождений импактитовых алмазов и других «экзотических» минеральных полезных ископаемых, сопутствующих импактным структурам, ставит астроблемы в ряд наиболее интересных с практической точки зрения объектов природы.

Как существенная особенность известных на сегодняшний день импактных структур отмечается отсутствие следов радиации, сколько-нибудь превышающей региональные фоновые значения для места их нахождения при том, что эти структуры отображаются в геофизических полях иной природы, например, в гравитационном и геомагнитном. В некоторых «околонаучных» публикациях импактные структуры рассматриваются как свидетельства ядерных войн, имевших место в

Рис. 3. Формирование алмазоносной кимберлитовой трубки в соответствии с теорией вулканического происхождения. Показано, как по стволу, увлекаемые магмой, поднимаются породы, содержащие алмазы

весьма далеком прошлом. Однако отсутствие следов радиоактивности в импакти-тах, противоречит такого рода предположениям.

Техногенные импактные структуры

К техногенным импактным структурам могут быть отнесены геологические новообразования, сформированные подземными ядерными или большими химическими взрывами. Подземные ядерные взрывы применялись для испытаний новых образцов ядерного оружия.

Эпоха «промышленных атомных взрывов» в нашей стране началась в марте 1965 г., когда в Башкирии был произведён подрыв сразу двух ядерных зарядов. Это была первая попытка использовать атомный взрыв для интенсификации добычи нефти на «проблемном» месторождении. В 1966 г. в Казахстане атомным зарядом была создана полость-хранилище в подземном массиве каменной соли. В 1969 г. на Ставрополье ядерным фугасом попытались интенсифицировать дебитную добычу газа. В 1970 г. в Оренбургской обл. создали подземную ёмкость для хранения газа.

Подземные ядерные взрывы как технологический процесс развиваются по определённому алгоритму. При начальной стадии развития взрыва в горных породах возникают и распространяются тепловая волна, ударная волна и волна сжатия (сейсмическая или сейсмозрывная волна). В общих чертах, создается ситуация, сходная с той, которая возникает при импактном воздействии на поверхность Земли. С той лишь разницей, что «форс-мажорные» условия создаются не на земной поверхности, а на большой глубине. В результате в очаге ядерного взрыва образует-

ся сферическая взрывная полость. Для большинства грунтов взрывная полость оказывается неустойчивой, вследствие чего происходит обрушение кровли и полость заполняется обломками породы с высоким содержанием радиоактивных материалов. Над полостью образуется коническая фигура с вершиной, обращенной вниз, к очагу взрыва. Если взрыв происходит в скальных грунтах, находящихся под слоем осадков, то полость, образовавшаяся после взрыва, также заполняется обломками, оставляя на поверхности просевший кратер (рис. 3).

При подземном ядерном взрыве в осадочных породах земная поверхность остается неизменной. Примерно через 1 мс после взрыва полость начинает раздуваться, сбрасывая давление до миллиона атмосфер. Расширение продолжается до тех пор, пока давление газов не уравнивается с давлением в окружающих породах. Температура к тому моменту снижается до нескольких тысяч градусов и внутри полости накапливается значительный слой расплавленного скального материала, в котором остается большинство тяжелых радиоактивных изотопов.

При подземных ядерных взрывах создаются условия, сходные с теми, которые сопутствуют природным импактным событиям, а именно чрезвычайно высокая температура и давление. Как следствие, в очаговой области взрыва протекают сложные процессы минерогенеза с образованием новых минералов, возможно, что в том числе и алмазов. Следует отметить, что пока сведения о находках алмазов в местах проведения подземных ядерных взрывов отсутствуют, равно как и сведения о проведении исследований в этом направлении. Не исключено, что серьезным препятствием для этого служит «экологический фактор».

Радиоэкология техногенных импактных структур

Принято считать, что при подземном ядерном взрыве на большой глубине проникающая радиация поглощается грунтом, радиоактивные продукты взрыва остаются в полости и заполняющей ее толще разрушенной породы. В то же время, нахождение радиоактивных материалов всегда сопряжено с риском возникновения радиационной опасности. Так, при проведении мирных ядерных взрывов в нашей стране, согласно официальным данным, в четырех случаях произошло радиоактивное загрязнение территории. К 1994 г., спустя 20-30 лет после проведения взрывов, также по официальным данным, в 24 случаях из 115 остались «локальные надфоновые загрязнения вокруг скважин». Временная неустойчивость полостей, образовавшихся вследствие подземных ядерных взрывов, дает основание предполагать, что со временем возможно формирование аналогичных локальных надфоновых аномалий радиоактивности, превышающих санитарные нормативные показатели, какие возникли как чрезвычайные ситуации при проведении взрывов. Это обстоятельство является ограничивающим «экологическим фактором» при изучении возможности поисков полезных ископаемых, характерных для природных импактных структур, в окрестностях эпицентров проводившихся подземных ядерных взрывов.

С течением времени все отчетливее вырисовывается проблема отдаленных последствий ядерных взрывов. Выходящие за рамки статьи вопросы остаточной радиации, возникшей в результате проведения испытательных ядерных взрывов в атмосфере, в водной среде и на поверхности, в данном случае не рассматриваются. Речь идет лишь о том, что подземные полости, образовавшиеся при проведении взрывов на больших глубинах (а это почти два десятка гигантских подземных газо- и нефтехранилищ, сооруженных в пластах каменной соли с помощью атомных взрывов), с течением времени не только накапливают радиоактивный рассол, но и

выдавливают его к поверхности земли, что может заметно ухудшать радиационную обстановку. Некоторые из этих ёмкостей уже пришлось замуровать. Место, где был когда-то произведён подземный атомный взрыв, фактически становится захоронением радиоактивных отходов. Правда, оно скрыто в земной толще на глубине 1-2 км (хотя было зафиксировано 5 неудачных случаев, когда при подземном взрыве его продукты сразу же вырывались на поверхность). Но со временем подвижки земной коры, мигрирующие грунтовые воды, подверженные коррозии трубы и обсадные колонны могут привести к распространению радионуклидов. Поэтому места взрывов законодательством определены как ядерные установки в стадии вывода из эксплуатации, что требует долговременного расходования средств для контроля их состояния и поддержания в надёжной изоляции. Специалисты в области радиогеоэкологии склоняются к тому, что атомные взрывы оказались неприемлемы для строительных работ на поверхности земли (сооружение каналов, водохранилищ, насыпных плотин и т. д.) – радиоактивное заражение местности, пусть даже небольшое, не оправдывает достигаемых целей. В силу этого существует необходимость изучения радиогеоэкологической обстановки во всех местах проведения ядерных взрывов, не только подземных, но и камуфлетных, и других видов, как «военных», так и мирных. Особенно это важно для мест перспективного промышленного и градостроительного освоения.

Некоторые задачи, связанные с уменьшением опасности освоения территорий, отчужденных в свое время для проведения ядерных взрывов, могут быть решены. Так, для дезактивации территории в окрестностях Чернобыльской АЭС используется «бактериологическая» технология, ускоряющая распад радионуклидов. Такая же технология используется для дезактивации Теченского каскада водоемов в Челябинской области, куда в течение 1948-1956 гг. сбрасывались отходы химкомбината в г. Озерске [Корнилова, Высоцкий, 2017]. Эта технология пока имеет ограниченное применение, но обнадеживающие перспективы и в дальнейшем, возможно, будет широко применяться при решении задач радиогеоэкологического контроля.

Заключение

Природные и техногенные импактные структуры имеют много сходных черт – и тот, и другой виды геологических структур формировались при очень высоких термодинамических условиях. В этих условиях исходные горные породы в «мишенях» импактных структур и подземных полостях претерпевали значительные изменения, в результате чего могли формироваться пригодные для разработки месторождения «экзотических» полезных ископаемых – алмазов, нефти, угля, золота, урана, меди, никеля и др. Это привлекает внимание к этим структурам – природным как к памятникам геологической истории Земли и месторождениям ценных полезных ископаемых, а также техногенным как к объектам повышенного «радиогеоэкологического интереса» и как лабораториям по изучению последствий ядерных взрывов.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, Грант 16-05-00-276

Авторы выражают благодарность В. Л. Масайтису (ВСЕГЕИ), С. А. Вишневному (ИГМСО РАН), А. А. Корниловой (МГУ), В. И. Французовой (ИЭПС УрО РАН) и другим коллегам, чьими материалами они воспользовались при работе над статьей, а также Российскому фонду фундаментальных исследований за материальную поддержку.

Литература

1. Вишневский С. А. Попигайская астроблема. – Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2016. – 71 с.
2. Гласс И. И. Ударные волны и человек. М.: Изд-во «Мир», 1977. 192 с.
3. Корнилова А. А., Высоцкий В. И. Синтез и трансмутация стабильных и радиоактивных изотопов в биологических системах РЭНСИТ // Ядерная физика. – 2017. – № 1. Т. 9. – С. 52-64.
4. Масайтис В. Л. О геологическом картографировании импактных структур. // Региональная геология и металлогения. – 2016. – № 67. – С. 61-69.
5. Николаев А. В., Французова В. И. Сейсмическая томография: о генезисе алмазоносных трубок // Геология и геофизика Юга России. – 2017. – № 4. – 73-83.

NATURAL AND TECHNOGENIC IMPACT STRUCTURES: GEOLOGICAL AND ECOLOGICAL ASPECT

© 2018 A. V. Nikolaev¹, Sc. Doctor (Phys.-Math.), Prof., V. T. Trofimov², Sc. Doctor (Geol.-Min.), Prof., A. D. Zhigalin¹, Sc. Candidate (Geol.-Min.), V. S. Lavrov¹

¹Schmidt Institute of Physics of the Earth of the RAS, Russia, 123995, Moscow, Bolshaya Gruzinskaya Str., 10/1, e-mail: zhigalin. alek@yandex. ru;

²Educational Institution of Higher Education M. V. Lomonosov Moscow State University, Russia, 119991, Moscow, Leninskie Gory, 1, e-mail: trofimov@rector. msu. ru

The formation of natural and man-made impact (shock) geological structures occurred under the influence of very high temperatures and pressure. Natural impact structures formed deposits of diamonds, gold, uranium, copper and other valuable minerals. Artificial impact structures developed during underground nuclear explosions are characterised by time instability and the possibility of remote environmental effects in the form of spontaneous radioactivity. The article summarizes the results of recent studies of impact structures, the results reveal a new view on the Genesis of minerals, the possible role of transmutation of elements.

Keywords: natural and technogenic impact structures, underground nuclear explosions, minerals, georadiological effects.

References

1. Vishnevskij S. A. Popigajskaya astroblema [Popigai Astrobleme]. Novosibirsk: Akademicheskoe izd-vo “Geo”, 2016. 71 p. (in Russian)
2. Glass I. I. Udarnye volny i chelovek [Shock waves and man]. M. Izd-vo “Mir”, 1977. 192 p. (in Russian)

3. Kornilova A.A., Vysockij V.I. Sintez i transmutaciya stabil'nyh i radio-aktivnyh izotopov v biologicheskikh sistemah RENSIT [Synthesis and transmutation of stable and radioactive isotopes in biological systems RENSIT]. Yadernaya fizika. 2017. No. 1. Vol. 9. Pp. 52-64. (in Russian)
4. Masajtis V.L. O geologicheskom kartografirovanii impaktnykh struktur [On the geological mapping of impact structures]. Regional'naya geologiya i metallogeniya. 2016. No. 67. Pp. 61-69. (in Russian)
5. Nikolaev A.V., Francuzova V.I. Seismicheskaya tomografiya: o genezise almazonosnykh trubok [Seismic tomography: about the genesis of diamond tubes]. Geologiya i geofizika Yuga Rossii. 2017. No. 4. Pp. 73-83. (in Russian)